

EL BAÚL DE LA CIENCIA

La calidad del aire que respiramos: impacto en la salud y el medio ambiente

Fernanda Isabel Oduber Pérez¹

Departamento de Física Aplicada, Facultad de Ciencias Biológicas y Ambientales
Universidad de León, 24071 León, España

¹fodup@unileon.es

Resumen

Con el incremento de las áreas urbanas y como consecuencia de la globalización es cada vez más necesario estudiar las implicaciones que tiene la calidad del aire en el clima y la salud. Este tipo de estudios permite establecer nuevos métodos de monitorización de la contaminación atmosférica, así como desarrollar las herramientas necesarias para mitigar el cambio climático y el número de enfermedades relacionadas con la contaminación del aire. Desde hace muchos años, en Europa se vienen realizando esfuerzos para reducir los niveles de contaminantes atmosféricos y así proteger la salud, la vegetación y los ecosistemas naturales. Además de las recomendaciones globales adoptadas en la Unión Europea, es necesario revisar las medidas específicas que acoge cada país y que van enfocadas a las emisiones y las necesidades locales y regionales. El grupo de investigación en Ambiente Atmosférico de la Universidad de León focaliza su actividad en el estudio de las características físicas y químicas del aerosol atmosférico, así como la sinergia que se establece entre los aerosoles y la precipitación como principal mecanismo de transporte de éstos hacia la superficie terrestre.

Palabras clave

Aerosoles, atmósfera, clima, contaminación, emisión, fuentes

El creciente interés del estudio de los contaminantes atmosféricos

Según los datos estadísticos publicados por Eurostat, (2016), más del 70 % de los ciudadanos de la Unión Europea viven en zonas urbanas donde los elevados niveles de contaminación atmosférica son causados principalmente por las altas densidades de población y las actividades económicas. La exposición a estos niveles de contaminantes atmosféricos puede causar efectos adversos tanto en la salud humana (ej. problemas respiratorios y cardíacos, cáncer), como en el clima y el medio ambiente. El estudio de los contaminantes atmosféricos y sus fuentes, así como los mecanismos de eliminación de los mismos ha experimentado un creciente interés en las últimas décadas, ya que representa una herramienta importante que permite establecer nuevos métodos de monitorización de la contaminación del aire, así como examinar las políticas necesarias para reducir la contaminación atmosférica de una localidad.

Se define como contaminación atmosférica a la presencia de sustancias en la atmósfera que pueden provenir de actividades humanas o de procesos naturales y que tienen un impacto negativo sobre el medio ambiente y la salud hu-

mana (Directiva 2008/50/CE). Los principales contaminantes atmosféricos son el monóxido de carbono (CO), los óxidos de nitrógeno (NO_x), el dióxido de azufre (SO_2), el ozono (O_3) y el aerosol o material particulado (PM). El aerosol atmosférico se define como el conjunto de partículas líquidas o sólidas suspendidas en la atmósfera (incluyendo el material biogénico y no biogénico), y que tienen un tamaño típico que va desde unos pocos nanómetros a unos cientos de micras. Entre los aerosoles más importantes a nivel troposférico debido al impacto directo con la salud humana y el medio ambiente se encuentra el PM_{10} (partículas de menos de 10 micras) y el $\text{PM}_{2,5}$ (partículas de menos de 2,5 micras).

Las concentraciones de aerosoles y sus características tanto físicas como químicas dependen de varios factores, como las condiciones meteorológicas y las fuentes locales y regionales de emisión, etc. (Oduber et al., 2021a; Oduber et al., 2021b). En las zonas urbanas las principales fuentes de contaminación son aquellas que involucran la quema de combustible fósil o biomasa, como el tráfico, la generación de energía, los sistemas de calefacción, la incineración de desechos y las industrias. Diferentes estudios muestran que el alto consumo de energía, especialmente en ciudades muy pobladas, es una de las principales causas de los altos niveles de contaminación atmosférica (Xu et al., 2017; Yuan et al., 2018). Los aerosoles procedentes de las fuentes naturales de origen primario son principalmente el polvo mineral, el aerosol marino y los aerosoles biogénicos primarios, mientras que los aerosoles naturales de origen secundario son aquellos que se forman por la conversión gas-partícula, a partir de las emisiones de gases precursores provenientes de fuentes naturales. Sin embargo, las características del material particulado (concentración, composición y distribución de tamaños de las partículas atmosféricas) pueden variar temporal y espacialmente, debido a los procesos de transporte, transformación y eliminación. Este último proceso puede ocurrir bien sea por deposición seca (sin intervención del agua) o por deposición húmeda.

Impacto de los contaminantes atmosféricos sobre la salud humana y el medio ambiente

La Organización Mundial de la Salud (OMS) estima que 9 de cada 10 personas se ven afectadas por altas concentraciones de contaminantes en el aire y que más del 80 % de las personas que viven en zonas urbanas están expuestas a niveles de calidad del aire que superan los valores límite recomendados para la salud humana. Por otra parte, diversos estudios demuestran que la exposición a altos niveles de contaminantes atmosféricos puede causar enfermedades cardíacas, cáncer de pulmón y enfermedades respiratorias crónicas (Kim et al., 2015; Lelieveld et al., 2015). Sin embargo, los efectos de los aerosoles sobre la salud dependen principalmente del tamaño, composición y concentración de las partículas. En ciudades con altos niveles de PM_{10} , $\text{PM}_{2,5}$, O_3 , CO, SO_2 y NO_2 se asocian a una mayor tasa de admisiones hospitalarias por asma, a un mayor riesgo de sufrir problemas neurológicos, y a una mayor tasa de mortalidad y morbilidad cardíaca, cardiovascular y pulmonar (Curtis et al., 2006; Pascal et al., 2014).

La presencia de altos niveles de contaminantes atmosféricos también puede tener un impacto negativo sobre el clima. La presencia de ciertas partículas que actúan como reflectantes de la energía solar que escapa de la parte superior de la

atmósfera, puede causar un enfriamiento neto en la superficie de la tierra; mientras que los aerosoles absorbentes pueden provocar un efecto de calentamiento neto. Adicionalmente, la extinción de la luz provocada por los aerosoles también puede causar la reducción de la visibilidad, lo que puede conducir a graves problemas para el transporte. Por otro lado, los aerosoles atmosféricos pueden sufrir cambios en sus características físicas y químicas debido a ciertas reacciones químicas que ocurren en la atmósfera, causando una serie de problemas medioambientales. Por ejemplo, los óxidos de nitrógeno (NO_x) y el dióxido de azufre (SO_2) pueden transformarse durante su transporte en ácidos nítrico y sulfúrico, respectivamente, para incorporarse en las nubes y en las gotas que precipitan disminuyendo el pH del agua de lluvia por debajo de 5,6, causando lo que se conoce como lluvia ácida (Akpo et al., 2015; Oduber et al., 2020; Oduber et al., 2021c). Este fenómeno trae como consecuencia la acidificación del agua terrestre y el subsecuente daño al ecosistema acuático, daños en la vegetación y en los materiales de construcción y estructuras (Seinfeld y Pandis, 2016).

Esfuerzos por reducir la contaminación atmosférica en Europa

Desde hace muchos años, en Europa se han implementado una serie de Directivas que tienen como principal objetivo reducir los niveles de contaminantes atmosféricos para proteger la salud, la vegetación y los ecosistemas naturales. Los primeros criterios de evaluación para la calidad del aire se implementaron en 1996 cuando se aprobó la Directiva 96/62/CE sobre Evaluación y Gestión de la Calidad del Aire Ambiente. En los años siguientes se han desarrollado diferentes normativas que establecen criterios y objetivos enfocados en reducir cada vez más las emisiones de contaminantes atmosféricos y mejorar la calidad del aire de los países miembros de la UE. En la actualidad, la Directiva 2008/50/CE relativa a la Calidad del Aire Ambiente y una Atmósfera más Limpia en Europa es la que establece los valores límite para los contaminantes del aire. Recientemente, en El Pacto Verde Europeo del año 2019, se anuncia el objetivo de llegar a una contaminación cero en Europa como parte de la estrategia de la Comisión Europea, por lo que se propone revisar los estándares de la calidad del aire de la UE para alinearlos con las recomendaciones de la OMS. Además de las recomendaciones globales adoptadas en la UE, es necesario revisar las medidas específicas que adopta cada país y que van enfocadas a las emisiones y las necesidades locales y regionales. En este sentido, la Agencia Europea del Medio Ambiente (AEMA), en su informe No 24/2018 publica la colaboración con 10 ciudades europeas (Antwerp (Bélgica), Berlín (Alemania), Dublín (Irlanda), Madrid (España), Malmö (Suecia), Milán (Italia), París (Francia), Plovdiv (Bulgaria), Praga (República Checa) y Viena (Austria)), para dar a conocer los desafíos que plantea la mejora de la calidad del aire a nivel local. Entre las medidas adoptadas por las ciudades para reducir los niveles de contaminación atmosférica se encuentran el fomento del uso de bicicleta, la reducción de los límites de velocidad, la modernización de las estufas y calderas domésticas, el uso de combustibles más limpios para las calefacciones, así como la introducción de zonas de transporte de bajas emisiones, etc. Estas medidas han logrado reducir la contaminación local demostrando que, para obtener mejores resultados las medidas locales y regionales, deben ir en conjunto con las políticas nacionales y de la UE.

El impacto de las Directivas y de las medidas implementadas para la reducción de las emisiones de los diversos contaminantes es continuamente evaluado mediante el estudio de las tendencias de las concentraciones de dichos contaminantes en el aire de los estados miembros de la UE. En los datos publicados por la AEMA se observa que entre los años 2005 y 2019 se redujeron las emisiones de SO_x en un 76 % y de NO_x en un 42 %, mientras que las emisiones de los Compuestos Orgánicos Volátiles distintos del Metano (NMVOCs) y del $\text{PM}_{2,5}$ disminuyeron en un 29 %. Estas tendencias decrecientes son en gran parte resultado de la disminución en las emisiones de los sectores de la industria, transporte y de la energía, como consecuencia de los límites establecidos en diferentes Directivas como la Directiva sobre emisiones industriales (Directiva 2010/75/EU) o las normas Euro para vehículos (EC No 692/2008 y EC No 715/2007).

La contaminación atmosférica en León

El grupo de investigación en Ambiente Atmosférico (ATMOSENV) de la Universidad de León, focaliza su actividad investigadora en el estudio de las características físicas y químicas del aerosol atmosférico, tanto de origen orgánico como inorgánico, así como en la interacción aerosol-precipitación. El grupo está integrado por investigadores multidisciplinares de la Universidad de León con titulaciones en Física, Biología, Química, Ciencias Ambientales e Ingeniería, los cuales poseen una amplia experiencia investigadora en sectores tales como polen y alérgenos, precipitación y climatología, aerosol atmosférico y en las técnicas de muestreo y análisis asociadas a estas líneas de investigación.

Los trabajos de investigación realizados por el grupo de ATMOSENV durante los últimos años van enfocados hacia la sinergia que se establece entre los aerosoles y la precipitación como principal mecanismo de transporte de éstos hacia la superficie terrestre. En este sentido, se han publicado diversos artículos que reflejan los principales resultados de los estudios, tanto físicos como químicos, de las partículas que se encuentran en la atmósfera de la ciudad de León. La mayor parte de los resultados se han obtenido en el punto de muestreo ubicado en la Facultad de Veterinaria de la Universidad de León donde se encuentran los equipos de medición de aerosoles atmosféricos (**Fig. 1**).



Figura 1. Equipos de muestreo de PM en la terraza de la Facultad de Veterinaria de la Universidad de León.

Al igual que en el resto de Europa, en España se han adoptado políticas regionales y locales para reducir las emisiones de contaminantes a la atmósfera. Entre las medidas implementadas por la Comunidad Autónoma de Castilla y León se encuentra la Estrategia de Control de la Calidad del Aire de Castilla y León 2001-2010, cuyo principal objetivo es prevenir y reducir la concentración de contaminantes atmosféricos nocivos. En cuanto a la ciudad de León, en el año 2012 se aprobó la Ordenanza Municipal de Protección de la Atmósfera, que regula todas las actividades e instalaciones que puedan generar humo, polvo, gases, vapores y olores en el ámbito municipal. Por otra parte, desde 1997 en León se realiza una evaluación continua de las concentraciones de los contaminantes atmosféricos mediante las mediciones realizadas por la Red de Calidad del Aire de la Junta de Castilla y León, a través de los datos suministrados por dos estaciones fijas distribuidas por la ciudad, según lo estipula el Anexo VII del Real Decreto 102/2011.

Los datos publicados por la Red de Calidad del Aire de la Junta de Castilla y León muestran una tendencia decreciente generalizada de las emisiones de contaminantes atmosféricos desde el año 1997. En un estudio realizado en el año 2019 se observa que entre 1997 y 2016 las concentraciones de CO y SO₂ disminuyen un 85 %, las concentraciones de NO_x se reducen entre un 55 y 66 %, mientras que las de PM₁₀ disminuyen en un 76 % (Oduber et al., 2019a). Debido a que las principales fuentes de emisión de aerosoles en León son el tráfico y la quema de combustible fósil (Blanco-Alegre et al., 2019; Oduber et al., 2021b), los valores observados son, probablemente, resultado de una serie de medidas tomadas en diferentes sectores como el de la electricidad pública y el transporte.

A pesar de que los niveles de contaminantes en el aire de León se encuentran generalmente dentro de los límites establecidos por la Directiva actual, en ocasiones se observan episodios de contaminación atmosférica que afectan a la calidad del aire de la ciudad. Un ejemplo de estos episodios fue el vivido en febrero de 2017, cuando una intrusión de polvo sahariano llegó a la ciudad, y como consecuencia, se superó el valor límite permitido para el PM₁₀ (Oduber et al., 2019b). En la **Figura 2a y 2b** se observa el impacto que tuvo la intrusión de polvo sahariano en la calidad del aire de León. Este tipo de evento causa un incremento en las concentraciones de Al, Ca, Si, Fe, Mg y Ti en el material particulado, los cuales están generalmente asociados con la fracción mineral típica del polvo del desierto, responsable de la coloración rojiza que se observa durante los episodios de intrusión sahariana.

Como se mencionó anteriormente, la precipitación es uno de los mecanismos de eliminación de aerosoles de la atmósfera, por lo que la concentración y características químicas del material particulado está estrechamente ligado a las propiedades químicas del agua de lluvia. En la ciudad de León, la precipitación presenta generalmente valores de pH superiores a 5,6, lo que indica que los episodios de lluvia ácida son escasos (Oduber et al., 2021c). Sin embargo, episodios de emisión de partículas como los ocurridos en el verano del año 2016, donde se produjeron varios incendios forestales al noroeste de la península ibérica, provocan el aumento en los niveles de PM₁₀, así como el incremento de los niveles de diferentes especies que causan la acidificación del agua de lluvia. Durante este episodio en particular, la química del agua de lluvia se vio afectada por los aeroso-

les de la quema de biomasa, lo que se reflejó en las altas concentraciones de SO_4^{2-} y NO_3^- de origen antropogénico principalmente, y en las altas concentraciones de carbono orgánico soluble e insoluble en agua (DOC y WIOC, respectivamente) (Oduber et al., 2020).

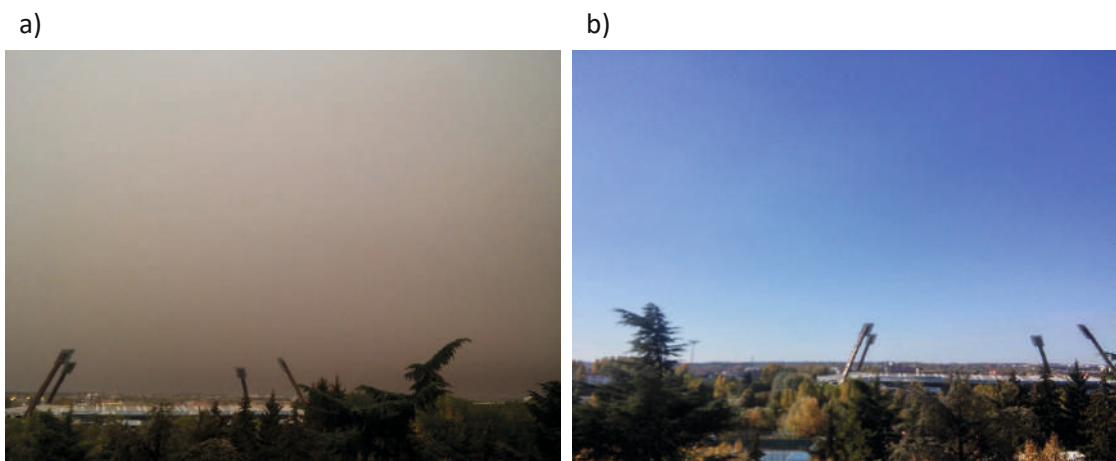


Figura 2. Fotografía en la ciudad de León a) durante el episodio de intrusión de polvo sahariano del 23 de febrero del 2017, b) un día sin evento de intrusión de polvo sahariano.

Los bioaerosoles atmosféricos también forman parte importante de los aerosoles. Comprenden una variedad de partículas biológicas que incluyen bacterias, hongos, polen, algas, amebas y virus. El estudio de bioaerosoles se hace necesario en la ciudad de León, ya que se encuentra rodeada de numerosos bosques con diversos tipos de vegetación que contribuyen con emisiones biológicas primarias al incremento de la concentración de polen en el aire (Calvo et al., 2018; Oduber et al., 2019a). Las concentraciones atmosféricas de bioaerosoles también se ven afectadas por las condiciones meteorológicas. La temperatura, la velocidad del viento, la humedad relativa y la precipitación son parámetros que influyen en la concentración de esporas de hongos en el aire, la floración de las plantas y los períodos de emisión de polen. Las características físicas de la precipitación también afectan al proceso de eliminación y transporte de los bioaerosoles. Así, dependiendo del tamaño de gota de la lluvia, cantidad de agua precipitada o intensidad del evento de lluvia, el bioaerosol puede disminuir o incrementar su concentración en la atmósfera (Blanco-Alegre et al., 2021; Oduber et al., 2021a).

Como conclusión general, los contaminantes del aire desempeñan un papel importante en la salud humana y en los procesos atmosféricos. Los estudios relacionados con los procesos que sufren los aerosoles biogénicos y no biogénicos aportan una información valiosa que puede ayudar al establecimiento de diferentes medidas para la mitigación de la contaminación del medio ambiente y para reducir el impacto de los contaminantes atmosféricos en la salud humana.

Referencias

- AEMA, 2020. Señales de la AEMA 2020, Hacia una contaminación cero en Europa, Agencia Europea del Medio Ambiente.
- Akpo, A. B., Galy-Lacaux, C., Laouali, D., Delon, C., Liousse, C., Adon, M., Gardrat, E., Mariscal, A. y Darakpa, C. 2015. Precipitation chemistry and wet deposition in a remote wet savanna site in West Africa: Djougou (Benin). *Atmos. Environ.* 115:110–123.
- Blanco-Alegre, C., Calvo, A. I., Coz, E., Castro, A., Oduber, F., Prévôt, A. S. H., Močnik, G. y Fraile, R. 2019. Quantification of source specific black carbon scavenging using an aethalometer and a disdrometer. *Environ. Pollut.* 246:336–345.
- Blanco-Alegre, C., Castro, A., Calvo, A. I., Oduber, F., Fernández-González, D., Valencia-Barrera, R. M., Vega-Maray, A. M., Molnár, T. y Fraile, R. 2021. Towards a model of wet deposition of bioaerosols: The raindrop size role. *Sci. Total Environ.* 767:145426.
- Calvo, A. I., Baumgardner, D., Castro, A., Fernández-González, D., Vega-Maray, A. M., Valencia-Barrera, R. M., Oduber, F., Blanco-Alegre, C. y Fraile, R. 2018. Daily behavior of urban Fluorescing Aerosol Particles in northwest Spain. *Atmos. Environ.* 184:262–277.
- Curtis, L., Rea, W., Smith-Willis, P., Fenyves, E. y Pan, Y. 2006. Adverse health effects of outdoor air pollutants. *Environ. Int.* 32:815–830.
- EEA Report No 24/2018 2019. Europe's urban air quality — re-assessing implementation challenges in cities.
- EU, 2010, Directive 2010/75/EU of the European Parliament and of the Council of 24 November 2010 on industrial emissions (integrated pollution prevention and control), OJ L 334, 17.12.2010, p. 17-119.
- EU, 2008, Commission Regulation (EC) No 692/2008 of 18 July 2008 implementing and amending Regulation (EC) No 715/2007 of the European Parliament and of the Council on type-approval of motor vehicles with respect to emissions from light passenger and commercial vehicles (Euro 5 and Euro 6) and on access to vehicle repair and maintenance information, OJ L 199, 28.7.2008, p. 1-136.
- Eurostat, 2016, Urban Europe — statistics on cities, towns and suburbs, Publication Office of the European Union, Luxembourg.
- Kim, K., Kabir, E. y Kabir, S. 2015. A review on the human health impact of airborne particulate matter. *Environ. Int.* 74:136–143.
- Lelieveld, J., Evans, J.S., Fnais, M., Giannadaki, D. y Pozzer, A. 2015. The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale. *Nature* 525:367–371.
- Oduber, F., Calvo, A. I., Castro, A., Alves, C., Blanco-Alegre, C., Fernández-González, D., Barata, J., Calzolari, G., Nava, S., Lucarelli, F., Nunes, T., Rodríguez, A., Vega-Maray, A. M., Valencia-Barrera, R. M. y Fraile, R. 2021a. One-year study of airborne sugar compounds: Cross-interpretation with other chemical species and meteorological conditions. *Atmos. Res.* 251:105417.
- Oduber, F., Calvo, A. I., Castro, A., Blanco-Alegre, C., Alves, C., Calzolari, G., Nava, S., Lucarelli, F., Nunes, T., Barata, J. y Fraile, R., 2021b. Characterization of aerosol sources in León (Spain) using Positive Matrix Factorization and weather types. *Sci. Total Environ.* 754:142045.

- Oduber, F., Calvo, A. I., Blanco-Alegre, C., Castro, A., Alves, C., Cerqueira, M., Lucarelli, F., Nava, S., Calzolari, G., Martín-Villacorta, J., Esteves, V. y Fraile, R. 2021c. Towards a model for aerosol removal by rain scavenging: The role of physical-chemical characteristics of raindrops. *Water Res.* 190:116758.
- Oduber, F., Calvo, A. I., Blanco-Alegre, C., Castro, A., Vega-Maray, A. M., Valencia-Barrera, R. M., Fernández-González, D. y Fraile, R. 2019a. Links between recent trends in airborne pollen concentration, meteorological parameters and air pollutants. *Agric. For. Meteorol.* 264:16–26.
- Oduber, F., Calvo, A.I., Blanco-Alegre, C., Castro, A., Nunes, T., Alves, C., Sorribas, M., Fernández-González, D., Vega-Maray, A.M., Valencia-Barrera, R.M., Lucarelli, F., Nava, S., Calzolari, G., Alonso-Blanco, E., Fraile, B., Fialho, P., Coz, E., Prevot, A.S.H., Pont, V. y Fraile, R. 2019b. Unusual winter Saharan dust intrusions at Northwest Spain: Air quality, radiative and health impacts. *Sci. Total Environ.* 669:213–228.
- Oduber, F., Calvo, A. I., Castro, A., Blanco-Alegre, C., Alves, C., Barata, J., Nunes, T., Lucarelli, F., Nava, S., Calzolari, G., Cerqueira, M., Martín-Villacorta, J., Esteves, V. y Fraile, R. 2020. Chemical composition of rainwater under two events of aerosol transport: A Saharan dust outbreak and wildfires. *Sci. Total Environ.* 734:139202.
- Organización Mundial de la Salud, <https://www.who.int/europe>
- Parlamento Europeo y del Consejo, 2008. Directiva 2008/50/CE: relativa a la calidad del aire ambiente y a una atmósfera más limpia en Europa, Diario Oficial de la Unión Europea.
- Pascal, M., Falq, G., Wagner, V., Chatignoux, E., Corso, M., Blanchard, M., Host, S., Pascal, L. y Larrieu, S. 2014. Short-term impacts of particulate matter (PM₁₀, PM_{10-2.5}, PM_{2.5}) on mortality in nine French cities. *Atmos. Environ.* 95:175–184.
- Real Decreto 102/2011, 2011. Real Decreto 102/2011, de 28 de enero, relativo a la mejora de la calidad del aire. Boletín Of. del estado 25, 9574–9626.
- Seinfeld, J.H. y Pandis, S.N. 2016. Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change, 3rd ed. John Wiley & Sons.
- Xu, Y., Hu, J., Ying, Q., Hao, H., Wang, D. y Zhang, H. 2017. Current and future emissions of primary pollutants from coal-fired power plants in Shaanxi, China. *Sci. Total Environ.* 595:505–514.
- Yuan, J., Na, C., Lei, Q., Xiong, M., Guo, J. y Hu, Z. 2018. Coal use for power generation in China. *Resour. Conserv. Recycl.* 129:443–453.