

ALTERACIÓN DEL BALANCE RADIATIVO DE LA TIERRA POR PM10 y  
PM2,5

BLANCA KARINA DÁVILA ROJAS

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FALCULTAD DE CIENCIAS  
ESCUELA DE CIENCIAS  
ESPECIALIZACIÓN EN QUÍMICA AMBIENTAL  
BUCARAMANGA  
2019

ALTERACIÓN DEL BALANCE RADIATIVO DE LA TIERRA POR PM10 y  
PM2,5

BLANCA KARINA DÁVILA ROJAS

Trabajo de grado para optar al título de  
ESPECIALISTA EN QUÍMICA AMBIENTAL

Director  
JULIO ROBERTO PINZÓN  
PhD Química

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE CIENCIAS  
ESCUELA DE CIENCIAS  
ESPECIALIZACIÓN EN QUÍMICA AMBIENTAL  
BUCARAMANGA  
2019

## CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	10
1. MATERIAL PARTICULADO	12
1.1 ORIGEN Y COMPOSICIÓN QUÍMICA DE PM10	14
1.2 ORIGEN Y COMPOSICIÓN QUÍMICA DE PM 2.5	15
2. BALANCE RADIATIVO DE LA TIERRA	16
3. ALTERACIÓN DEL BALANCE RADIATIVO DE LA TIERRA	18
3.1 EFECTO DIRECTO	18
3.2 EFECTO INDIRECTO	18
4. EFECTOS ADVERSOS PARA LA SALUD POR PM	18
4.1 EXPOSICIÓN A PM10 Y PM2.5	18
4.2 ENFERMEDADES CAUSADAS POR PM	20
4.3 MORBILIDAD Y MORTALIDAD POR PM10 Y PM2.5	21
4.4 TOXICOLOGÍA DE LA EXPOSICIÓN A PM10 Y PM2.5	22
4.4.1 Estrés oxidativo.	22
5. CONCLUSIONES	24
BIBLIOGRAFÍA	25

## LISTA DE FIGURAS

		Pág.
Figura 1	Material particulado y su dinámica atmosférica	14
Figura 2	Balance radiativo de la tierra	17
Figura 3	Representación de los efectos indirectos	21
Figura 4	Ubicación del PM en el Tracto Respiratorio	22
Figura 5	Enfermedades causadas por PM	24
Figura 6	Interacción contaminantes del aire con ERO en el ELF	27

## LISTA DE ABREVIATURAS

AEMA	Agencia europea del medio ambiente
ACS	Sociedad Americana del cáncer
CN	Carbón negro
CO	Carbón orgánico
DMS	Dimetil sulfuro
ELF	Fluido del revestimiento epitelial
EOR	Especies de oxígeno reactivas
FR	Forzamiento radiativo
HAPs	Hidrocarburos aromáticos policíclicos
NCN	Núcleos de condensación de nubes
NH	Núcleos de hielo
MO	Materia orgánica
OC	Onda corta
OL	Onda larga
OMS	Organización mundial de la salud
PM	Material particulado
PM10	Material particulado con diámetro $\leq 10\mu\text{m}$
PM2.5	Material particulado con diámetro $\leq 2.5\mu\text{m}$
TOA	Techo de la atmósfera
VOCs	Compuestos orgánicos volátiles

## RESUMEN

**TITULO:** ALTERACIÓN DEL BALANCE RADIATIVO DE LA TIERRA POR PM10 y PM2,5\*

**AUTOR:** BLANCA KARINA DÁVILA ROJAS\*\*

**Palabras clave:** Contaminación, PM10, PM2.5, absorción, dispersión, mortalidad, morbilidad.

### DESCRIPCIÓN:

Las partículas de PM10 y PM2.5 tienen efectos en el balance radiativo de la tierra y en la salud. A través de los efectos directo e indirecto generan cambios en el clima de la tierra absorbiendo y dispersando la radiación solar, y modificando las propiedades de las nubes. Los efectos producidos dependen de la circulación de masas de aire, las estaciones, la ubicación geográfica, el tamaño, la forma, la composición química y la concentración. Las características físicas y químicas de las partículas dependen también de su origen. Son emitidas a la atmósfera a través de fuentes naturales y como resultado de las actividades industriales y la combustión de combustibles fósiles. El aumento de la concentración de partículas de PM10 y PM2.5 en el aire debido en mayor parte, a la combustión del diésel y la gasolina, tiene consecuencias graves en la salud de la población. Incrementa la morbilidad y la mortalidad. Las partículas de PM10 penetran en los alvéolos de los pulmones. Las partículas de PM2.5 pueden ingresar al torrente sanguíneo. Inciden en enfermedades como el asma, cáncer de pulmón, enfermedad obstructiva pulmonar, arritmias cardíacas, aterosclerosis, entre otras. Por su composición química producen especies reactivas de oxígeno en exceso dando lugar al estrés oxidativo y la inflamación.

---

• Trabajo de grado

\*\* Facultad de ciencias. Escuela de Química. Especialización en Química Ambiental. Director: Julio Roberto Pinzón, Ph.D. En Química.

## ABSTRACT

**TITLE:** ALTERATION OF THE BALANCE BY PM10 AND PM2,5 EARTH RADIATIVE \*

**AUTHOR:** BLANCA KARINA DÁVILA ROJAS\*\*

**Keywords:** Pollution, PM10, PM2.5, absorption, scattering, mortality and morbidity.

### DESCRIPTION:

The particles of PM10 and PM 2.5 have effects on the radiative balance of the earth and on health. Through the direct and indirect effects they generate changes in the Earth's climate by absorbing and dispersing the solar radiation, and modifying the properties of the clouds. The effects produced depend on the circulation of air masses, seasons, geographical location, size, shape, chemical composition and concentration. The physical and chemical characteristics of the particles also depend on their origin. They Are emitted into the atmosphere through natural sources and as a result of industrial activities and the combustion of fossil fuels. The increase in the concentration of PM10 and PM 2.5 particles in the air due in large part to the combustion of diesel and petrol, has serious consequences in the health of the population. Increases Morbidity and mortality. PM10 particles penetrate into the alveoli of the lungs. The particles of PM 2.5 can enter the bloodstream. They affect illnesses such as asthma, lung cancer, obstructive pulmonary disease, cardiac arrhythmias, atherosclerosis, among others. Due to their chemical composition they produce reactive oxygen species in excess giving rise to oxidative stress and inflammation.

---

• Research work

\*\* Faculty of Sciences. School of chemistry. Specialization in environmental chemistry. Director: Julio Roberto Pinzon, Ph, D. In chemistry.

## INTRODUCCIÓN

El aire constituye la atmósfera y rodea la tierra. Su composición aproximada es 77% de nitrógeno, 20% de oxígeno y lo restante corresponde a vapor de agua, dióxido de carbono y otros gases.<sup>1,2</sup> Poder respirar un aire sin contaminantes, es indispensable para la salud y la vida.<sup>3</sup> El deterioro de la calidad del aire afecta a las personas, las plantas, los animales, los ecosistemas y el clima.<sup>4,5,6</sup>

La contaminación del aire ha estado presente siempre, desde los inicios de la humanidad.<sup>7,8</sup> La combustión de la madera fue durante muchos años una de las principales fuentes de contaminación atmosférica, seguida de la combustión de carbón mineral.<sup>9</sup> Con el aumento de la industrialización varios episodios de contaminación con emisiones de SO<sub>2</sub> y hollín que produjeron enfermedades y la muerte a miles de personas fueron registrados: Mosa, Bélgica 1930; Los Ángeles, EUA, 1944; Donora, EUA, 1948; Londres, Inglaterra 1952; Los Ángeles, EUA, 1955 y Londres Inglaterra 1962.<sup>10</sup> Estos episodios tuvieron la característica de ocurrir en medio de inversiones térmicas, en las cuales la temperatura de una capa de aire que sube desde la superficie se incrementa y se sitúa sobre una capa de aire inferior con menor temperatura <sup>11</sup> De tal manera que los contaminantes no pueden ser dispersados por el viento y quedan atrapados en esta capa.<sup>12,13</sup>

---

1 MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL Resolución 610 (24, de marzo de 2010) Colombia, 2010, p 8.

2 GLUECKAUF, E. The Composition of Atmospheric Air. In: Malone T.F. (eds) Compendium of Meteorology. American Meteorological Society, Boston, MA. [en línea]. 1951. P. 3-10.

3 MONKS, P. S, et al. Atmospheric composition change – global and regional air quality. Atmospheric Environment. October, 2009, Vol 43. No 33. p. 5268-5350.

4 DE MARCO, Alessandra. Impacts of air pollution on human and ecosystem health, and implications for the National Emission Ceilings Directive: Insights from Italy. Environment International. 2019, Vol 125. p. 320-333.

5 QUEROL, Xavier. Calidad del aire, partículas en suspensión y metales. Rev Esp Salud Pública. 2008, Vol 82. No 5. 447-453.

6 BAKLANOV, Alexander; MOLINA, Luisa y GAUSS, Michael. Megacities, air quality and climate. Atmospheric Environment. 2016, Vol 126. p. 235-249.

7 AVERBUJ, Eduardo. El fuego en el origen. En El hierro se volvió oro; S.A., M. E., Ed.; Madrid, 1988; pp 11-16.

8 MAKRA, L. Anthropogenic Air Pollution in Ancient Times. In Toxicology in Antiquity. 2019, p 27-287.

9 JACOBSON Mark Z. URBAN AIR POLLUTION. In Atmospheric Pollution: History, Science, and Regulation; 2002; pp 81-114. Cambridge: Cambridge University Press.

10 RODRÍGUEZ, Julio Flores. Contaminación atmosférica. En Introducción a la toxicología ambiental; Metepec, México. 1997, p. 123-147.

11 TINGTING, Xu, et al. Temperature inversions in severe polluted days derived from radiosonde data in North China from 2011 to 2016. Science of the Total Environment. 2019, Vol. 647, p.1011-1020.

12 GRAMSCH, E, et al. Influence of surface and subsidence thermal inversion on PM 2.5 and black carbon concentration. Atmos. Environ. J. 2014, Vol. 98, p.290-298.

En la actualidad la combustión del diésel y la gasolina en los vehículos de transporte es la mayor fuente de contaminación.<sup>14</sup> Las industrias, minas, centrales termoeléctricas, refinerías y calefacción domiciliaria, también son fuentes de contaminación.<sup>15,16,17</sup> Los principales contaminantes del aire son el CO, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, O<sub>3</sub> troposférico y PM como PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>.<sup>18</sup> Los procesos naturales como incendios forestales, erupciones volcánicas, entre otros también generan contaminantes.<sup>19,20</sup> Los contaminantes pueden ser primarios producidos en la fuente o secundarios formados a partir de los primarios como el O<sub>3</sub> troposférico formado a partir de NO<sub>x</sub> y VOCs.<sup>21</sup>

Recientemente ciudades como Pekín 2015, Milán 2015, Nueva Delhi 2016 y París 2016, vivieron episodios de contaminación, debido a la circulación de vehículos.<sup>22, 23, 24, 25</sup> La presencia de una niebla densa en Pekín y Nueva Delhi que disminuyó la visibilidad fue atribuida a niveles altos de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> que superaron los máximos sugeridos por la OMS.<sup>25,26,27</sup> Concentraciones altas de contaminantes cambian el clima, ocurre el deshielo de los glaciares, el nivel del mar aumenta y los fenómenos meteorológicos suceden con más frecuencia.<sup>28</sup>

---

13 FARAJI, Maryam, et al. Effects of airborne particulate matter (PM 10) from dust storm and thermal inversion on global DNA methylation in human peripheral blood mononuclear cells (PBMCs) in vitro. *Atmospheric Environment*. 2018, Vol. 195, p.170-178.

14 RAJÉ, Fiona; TIGHT Miles and POPE Francis D. Traffic pollution: A search for solutions for a city like Nairobi. *Cities journal*. 2018, Vol. 82, p.100-107.

15 ALBERT PALACIOS, Lilia América. Contaminación ambiental. Origen, clases, fuentes y efectos. En *Toxicología ambiental*. 2004, p. 37-52.

16 DASOM, Kim, et al. Air pollutants and early origins of respiratory diseases. *Chronic Diseases and Translational Medicine*. 2018, Vol. 4 No 2., p.75-94.

17 JELEŃSKA, Maria, et al. Evaluation of indoor / outdoor urban air pollution by magnetic, chemical and microscopic studies. *Atmospheric Pollution Research journal*. 2017, Vol. 8 p. 754-766.

18 ZHAO Danting, et al. Air pollution and its influential factors in China's hot spots. *Journal of Cleaner Production*. 2018, Vol. 185, p.619-627.

19 BAN-WEISS, George and COLLINS, William D. Role in Radiative Transfer. In *Encyclopedia of Atmospheric Sciences 2nd Edition*. Elsevier. 2015, Vol. 1 p. 66-75.

20 LOHMANN, Ulrike. Aerosol – Cloud Interactions and Their Radiative Forcing. In *Encyclopedia of Atmospheric Sciences 2nd Edition*. Elsevier, 2015, Vol. 1 p. 17-22.

21 BALLESTER, Ferran. Contaminación atmosférica, cambio climático y salud *Rev Esp Salud Pública*. 2005, Vol. 79, No 2, p.159-175.

22 Deutsche Welle. Pekín en alerta ambiental por contaminación del aire, 2015. Disponible en: <http://p.dw.com/p/1HF7p>

23 *Íbid.* Disponible en: <http://p.dw.com/p/1HUQf>

24 *Íbid.* Disponible en: <http://p.dw.com/p/2TshH>

25 *Íbid.* Disponible en: <http://p.dw.com/p/2SEdM>

26 *Íbid.* Disponible en: <http://p.dw.com/p/1HL6q>

27 *Íbid.* Disponible en: <http://p.dw.com/p/1HP7i>

28 ZHANG, Hua, et al. PM<sub>2.5</sub> and tropospheric O<sub>3</sub> in China and an analysis of the impact of pollutant emission control. *Advances in Climate Change Research*. 2014, Vol.5, No 3, p.136-141.

29 SAIKAWA, Eri, et al. Present and potential future contributions of sulfate, black and organic carbon aerosols from China to global air quality, premature mortality and radiative forcing. *Atmospheric Environment*. 2009, Vol. 43 No 17, p. 2814-2822.

30 SHARMA, Sudhir Kumar and MANDAL, Tuhin Kumar. Chemical composition of fine mode particulate matter (PM 2.5) in an urban area of Delhi, India and its source apportionment. *Urban Climate*. 2017, Vol.21 p.106-122.

Las partículas de PM10 y PM2.5 influyen en el clima del planeta absorbiendo y reflejando la radiación del sol, modificando las nubes y alterando el balance radiativo de la tierra.<sup>29</sup> Respirar un aire con altas concentraciones de PM10 y PM2.5 induce al aumento de enfermedades respiratorias y cardiovasculares en las personas.<sup>30</sup> Este trabajo tiene como objetivo revisar los antecedentes de fuentes de contaminantes primarias y secundarias, describir los tipos alteración del balance radiativo de la tierra, la composición química PM10 y PM2,5 y efectos que produce en la salud.

## 1. MATERIAL PARTICULADO

A las partículas de PM se les conoce como aerosoles.<sup>31</sup> Se encuentran suspendidas en el aire y pueden ser sólidas o líquidas.<sup>32</sup> Son introducidas en la atmosfera a través de fuentes naturales y antropogénicas con formación primaria y secundaria.<sup>33,34</sup> Las partículas de sal que originan las olas al romper en la superficie del mar, las partículas volcánicas, partículas de polvo mineral provenientes de los desiertos y partículas biológicas como bacterias, esporas de hongos, polen, residuos de plantas y material orgánico de la superficie del océano, son fuentes naturales primarias.<sup>35</sup>

Existen partículas naturales con formación secundaria, a partir de compuestos gaseosos como el DMS expulsado por el fitoplancton se forma el SO<sub>2</sub> y después el H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, el cual tiene presión baja y se condensa muy rápido en partículas, el suelo por la acción de las bacterias emite NO<sub>x</sub> y N<sub>2</sub>O y con la posterior oxidación se forma NO<sub>3</sub><sup>-1</sup> un componente de partículas inorgánicas.<sup>35</sup> En las fuentes antropogénicas primarias el SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, derivados de la combustión y el NH<sub>3</sub> de la agricultura se oxidan a SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>1-</sup> y NH<sub>4</sub><sup>1+</sup>, los compuestos aromáticos originados por el uso de combustibles forman abundantes partículas con composición orgánica a con baja presión de vapor por medio de la oxidación y la luz solar.<sup>35,36,37</sup>

Debido a su procedencia las partículas de PM tienen diferente tamaño, composición superficial, densidad, forma, esférica o irregular y composición química.<sup>38</sup> En los procesos de formación de partículas secundarias, las partículas se transforman y pueden variar su composición y tamaño. Como se observa en la figura 1, lo primero que ocurre es la nucleación, se forman los primeros núcleos o partículas, hay una transición de la fase gaseosa a la fase líquida o sólida por condensación o reacción química. En la segunda parte de este proceso ocurre una condensación de gases calientes parecida a la nucleación, en la se originan partículas primarias. Por último, en la coagulación las partículas formadas anteriormente, se aglomeran por el roce y movimiento de las partículas.<sup>39</sup>

La composición tamaño y superficie de las partículas también depende de la época del año, las condiciones climáticas y a la posición geográfica.<sup>40,41</sup> Las partículas de PM son las más estudiadas, por sus características físicas y químicas, consecuencias en la salud e influencia en el clima.<sup>42</sup> De acuerdo con su tamaño se clasifica en PM10, PM2.5 y PM1.0.<sup>43</sup>

---

31 BAO, Mengying, et al. Characteristics and origins of air pollutants and carbonaceous aerosols during wintertime haze episodes at a rural site in the Yangtze River Delta, China. *Atmospheric Pollution Research*. 2017, Vol.8 No 5, p. 900-911.  
32 GREEN, Joanne and SÁNCHEZ Sergio. *La Calidad del Aire en América Latina: Una Visión Panorámica*. Washington D.C. 2013.

33 VECCHI, Roberta; MARCAZZAN, Graziella Maria and VALLI Gianluigi. A study on nighttime – daytime PM10 concentration and elemental composition in relation to atmospheric dispersion in the urban area of Milan (Italy) *Atmospheric Environment* 2007, Vol.41 No 10, p. 2136-2144.

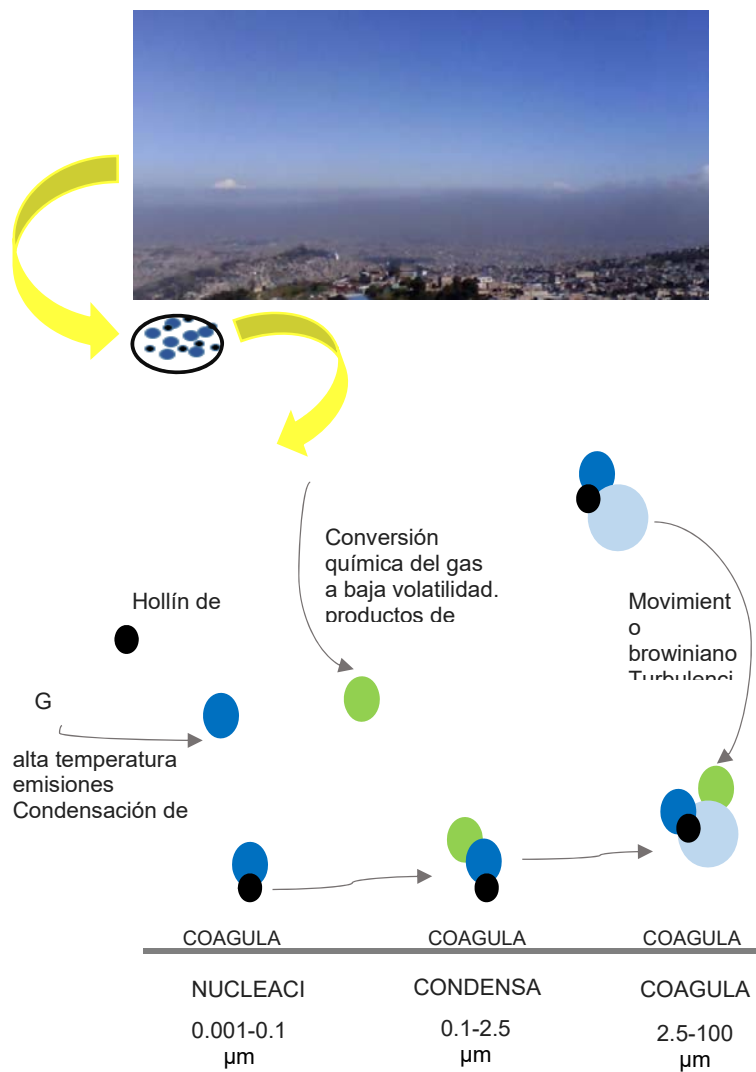
34 WANG, Chenchen, et al. PM 2.5 and Cardiovascular Diseases in the Elderly: An Overview. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 2015, Vol.12 p. 8187-8197.

35 KALBERER, M. *Aerosol Physics and Chemistry*. Encyclopedia of atmospheric sciences 2nd edition. Elsevier, 2015, Vol.1 p. 23-31.

36 HU, Rong, et al. PM 2.5 Exposure Elicits Oxidative Stress Responses and Mitochondrial Apoptosis Pathway Activation in HaCaT Keratinocytes. *Chinese Medical Journal*. 2017, Vol.130 No 18, p. 2205-2214.

37 RODRÍGUEZ FALCÓN, Carlos Iván; Rosas Pérez, Irma y Segura Medina, Patricia. Relación de los mecanismos inmunológicos del asma y la contaminación ambiental. *Rev. Fac. Med* 2017, Vol. 65 No 2, p.333-342.

Figura 1. Material particulado y su dinámica atmosférica.



Fuente: FALCON RODRIGUEZ, Carlos Iván, et al. Aeroparticles, Composition, and Lung Diseases. *Frontiers in Immunology*. 2016, Vol. 7 p.1-9.

### 1.1 ORIGEN Y COMPOSICIÓN QUÍMICA DE PM10

38 SHEPHERD, Marjorie. Perspective for Managing PM. In *Particulate Matter Science for Policy Markers: A NARSTO Assessment*; Press, C. U., Ed. NARSTO Assessment, 2004.p. 53-68.

39 FALCON RODRIGUEZ, Carlos Iván, et al. Aeroparticles, Composition, and Lung Diseases. *Frontiers in Immunology*. 2016, Vol. 7 p.1-9.

40 VALLIUS, Marko, et al. Concentration and estimated soot content of PM1, PM2.5 and PM10 in a subarctic urban atmosphere. *Environmental Science and Technology*. 2000, Vol.34 No 10, p.1919-1925.

41 QUEROL, Xavier, et al. Speciation and origin of PM10 and PM2.5 in selected European cities. *Atmospheric Environment*. 2004, Vol. 38 p. 6547-6555.

42 TERZI, Eleni, et al. Chemical composition and mass closure of ambient PM10 at urban sites. *Atmospheric Environment*. 2010, Vol. 44 No 18, p. 2231-2239.

43 LEONELLI, Lara, et al. Characterization of aerosols emissions from the combustion of dead shrub twigs and leaves using a cone calorimeter. In *Fire Safety Journal*. July 2017, Vol.91 p. 800-810.

Las partículas de PM<sub>10</sub> tienen un diámetro aerodinámico  $\leq 10 \mu\text{m}$ , o menor que  $10 \mu\text{m}$  y mayor que  $2.5 \mu\text{m}$  PM<sub>(10-2.5)</sub>, se conocen como partículas respirables, provienen principalmente de fuentes naturales como erupciones volcánicas, evaporación, erosión del suelo y arena del desierto entre otras. También de fuentes antropogénicas como la combustión, caminos no pavimentados. Se compone de polen, esporas, residuos de plantas, moho, minerales, partículas de sal, salpicaduras de agua y elementos, resuspensión de PM de las calles debido al viento, a los vehículos, al paso de las personas elementos de la corteza (Si, Al, Ti y Fe), tiene otros componentes NaCl, NO<sub>3</sub><sup>-1</sup>, CaCO<sub>3</sub> y (CN) y (MO).<sup>44,38,43</sup>

## 1.2 ORIGEN Y COMPOSICIÓN QUÍMICA DE PM 2.5

Las partículas de PM<sub>2,5</sub> tienen un diámetro aerodinámico  $\leq 2.5 \mu\text{m}$ , se conocen como partículas finas.<sup>45</sup> Resultan de los productos de la quema de combustibles fósiles, con formación primaria y secundaria. Está compuesto de SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, nitrato, NO<sub>3</sub><sup>1-</sup>, amonio NH<sub>4</sub><sup>1+</sup>, ion hidrógeno H<sup>1+</sup>, carbón negro (CN), carbón elemental (CE) y carbón orgánico (CO), HAPs, metales tales como Pb, Cd, V, Ni, Cu, Zn, Mn y Fe.<sup>46,47,31,35, 38</sup> La formación de PM<sub>2,5</sub> se favorece por temperaturas altas y humedad. Las partículas finas que provienen del escape de diésel le confieren alta suciedad y color negro al PM. El PM<sub>2.5</sub> hace que la visibilidad se reduzca en un lugar determinado y propicia la formación de niebla.<sup>48,40,31</sup>

44 CANALES RODRÍGUEZ, Miguel Á, et al. Las Partículas Respirables PM 10 y su Composición Química en la Zona Urbana y Rural de Mexicali, Baja California en México. Información Tecnológica. 2014, Vol.25 No 6, p.13-22.

SHEPHERD, Marjorie. Perspective for Managing PM. In Particulate Matter Science for Policy Makers. 2004, p.55-56.

LEONELLI, Lara, et al. Characterization of aerosols emissions from the combustion of dead shrub twigs and leaves using a cone calorimeter. 2017, p.801.

45 LI, Deping, et al. Identification of long-range transport pathways and potential sources of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> in Beijing from 2014 to 2015. Journal of Environmental Sciences. 2016, Vol.56 p.214-229.

46 LONATI, Giovanni; GIUGLIANO, Michele and OZGEN, Senem. Primary and secondary components of PM<sub>2.5</sub> in Milan (Italy). Environment International. 2008, Vol.34 No 5, p. 665-670.

47 BERGHMANS, P; PAUWELS, J and ROEKENS, E. relative composition of suspended particulate matter as function of size distribution and location. Journal of Aerosol Science. Vol.30, p. 609-610

BAO, p.Cit, p. 901.

KALBERER, M. Aerosol Physics and Chemistry. Encyclopedia of atmospheric sciences 2nd edition. 2015 p. 27-28.

SHEPHERD, Op. Cit., p.55-56.

48 TESFAYE, Melaku, et al. Simulation of bulk aerosol direct radiative effects and its climatic feedbacks in South Africa using RegCM4. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2016, Vol.142, p.1-19.

VALLIUS, Marko, et al. Concentration and estimated soot content of PM<sub>1</sub>, PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> in a subarctic urban atmosphere. 2000, p.1919.

BAO, Op. Cit., p. 901.

## 2. BALANCE RADIATIVO DE LA TIERRA

La composición de la atmósfera permite que la mayor parte de la radiación solar la atraviese, una parte de ella es reflejada nuevamente al espacio por las nubes y la superficie de la tierra, lo que se conoce como albedo del planeta.<sup>49</sup> El albedo de la tierra está condicionado a las características y color de la superficie marina y terrestre, al revestimiento de las nubes y a la concentración de partículas de PM. Los albedos de la superficie terrestre con abundante vegetación y la parte oscura del océano equivalen al 10%, por lo tanto, reflejan el 10% de la radiación recibida. Las nubes y las superficies heladas reflejan entre el 20 y el 80% de la radiación recibida.<sup>50</sup> La atmósfera de forma natural retiene una parte de la radiación proveniente del sol en forma de calor gracias a una cantidad determinada de gases de efecto invernadero.<sup>51</sup>

El balance radiativo supone una relación entre la radiación proveniente del sol (OC), con la radiación que sale emitida por la tierra (OL), la radiación recibida debe ser igual a la que sale.<sup>52</sup> Como se observa en la figura 2, el promedio de energía solar recibida por la tierra (TOA) es  $340 \text{ W/m}^2$ . El aire y las nubes absorben  $79 \text{ W/m}^2$ . Al espacio se refleja  $100 \text{ W/m}^2$  por las nubes, el aire y la superficie de la tierra. Finalmente  $160 \text{ W/m}^2$  es absorbida directamente por la superficie de la tierra. La superficie de la tierra a su vez emite radiación hacia la atmosfera  $397 \text{ W/m}^2$ , la atmosfera es calentada, una parte es emitida al espacio  $239 \text{ W/m}^2$  y otra es retenida y reemitida nuevamente a la superficie de la tierra  $340 \text{ W/m}^2$ .<sup>49,53</sup>

---

49 FERNÁNDEZ, Walter. Cambios Climáticos: El Calentamiento Global. En: Tecnología en Marcha. 1991, Vol. 2 p. 11-22.

50 DUARTE, C. M, et al. Cambio global Impacto de la actividad humana sobre el sistema Tierra. CSIC. Madrid, 2006.

51 BELMONTE SERRATO, Francisco, et al. Radiación y temperatura en el periodo 1990-1999 en el campo experimentalde «El Ardal» (Murcia): estudio preliminar. Papeles de Geografía. 2002, Vol.35 p. 17-25.

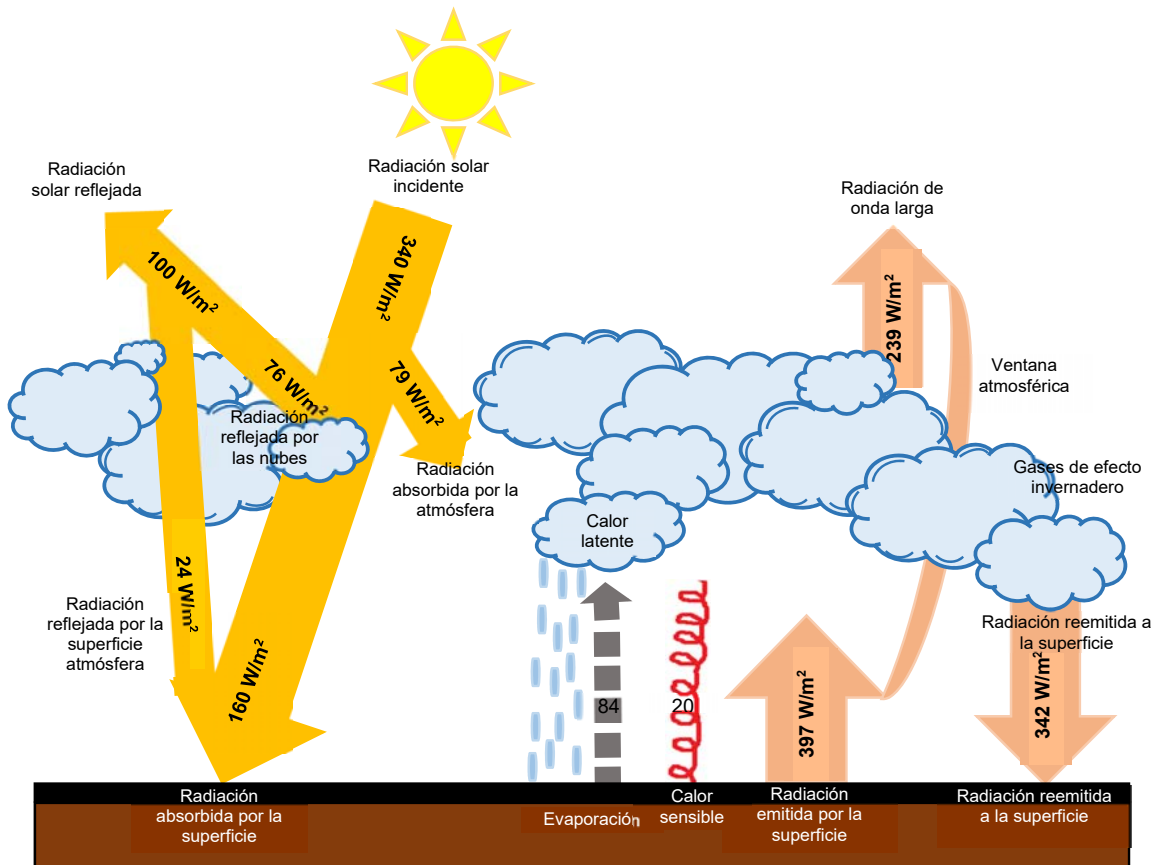
52 KIRKHAM, M. B. Solar Radiation, Black Bodies, Heat Budget, and Radiation Balance. In Principles of Soil and Plant Water Relations (Second Edition). Academic Press. 2014, p. 453-472.

53 WILD, Martin, et al. The global energy balance from a surface perspective. Climate Dynamics. 2013, Vol. 40 No 11-12 p. 3107-3134.

FERNÁNDEZ, Op.Cit. p. 14.

La superficie de la tierra se calienta con la radiación solar  $160 \text{ W/m}^2$  y con la emitida hacia la superficie  $342 \text{ W/m}^2$ , para un total de  $502 \text{ W/m}^2$ , repartidos de la siguiente forma:  $397 \text{ W/m}^2$  radiación de (OL) emitida,  $84$  de calor latente y  $20$  calor sensible. La atmósfera recibe  $581 \text{ W/m}^2$ ,  $79 \text{ W/m}^2$  de radiación solar incidente y  $502 \text{ W/m}^2$  desde la superficie. A su vez emite  $581 \text{ W/m}^2$ ,  $342 \text{ W/m}^2$  hacia la superficie y  $239 \text{ W/m}^2$  hacia el espacio.<sup>49</sup>

Figura 2 Balance radiativo de la tierra.



Fuente: WILD, Martin, et al. The global energy balance from a surface perspective. *Climate Dynamics*. 2013, Vol. 40 No 11-12 p. 3107-3134.

FERNÁNDEZ, Walter. Cambios Climáticos: El Calentamiento Global. 1991, p. 14.

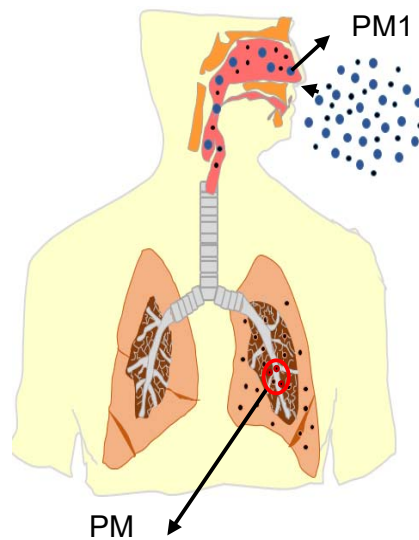
### 3. ALTERACIÓN DEL BALANCE RADIATIVO DE LA TIERRA

#### 4. EFECTOS ADVERSOS PARA LA SALUD POR PM

##### 4.1 EXPOSICIÓN A PM10 Y PM2.5

La exposición a las partículas de PM trae consigo consecuencias graves para la salud. la capacidad para producir algún daño en el organismo depende del espesor, diámetro y composición de las partículas.<sup>65</sup> El PM10 ingresa al tracto respiratorio por las fosas nasales y alcanza los alveolos pulmonares.<sup>66</sup> El PM2.5 pasa por las fosas nasales, el tracto respiratorio, se aloja en los alveolos de los pulmones y puede pasar al torrente sanguíneo, ataca los alveolos, promueve la inflamación, el estrés oxidativo y disminuye la función pulmonar.<sup>67</sup>

Figura 4 Ubicación del PM en Tracto Respiratorio.



Fuente: RODRÍGUEZ COTTO, Rosa. I. Contaminación por material particulado, estrés oxidativo e inflamación. Perspectivas en Asuntos Ambientales. 2015, Vol. 4, p. 58-65. <sup>68</sup>

El tiempo de exposición y el tipo de población son elementos que también influyen en las consecuencias en la salud. Hacen parte de la población susceptible a la contaminación los niños en los que el desarrollo de los pulmones, estructura y función, se ve afectado por los contaminantes, los adultos mayores con enfermedades respiratorias y cardiovasculares previas y las mujeres embarazadas.<sup>69,70</sup>

---

65 SAMEK, Lucina. Overall human mortality and morbidity due to exposure to air pollution. *International Journal of Occupational Medicine and Environmental Health*. 2016, Vol. 29 No 3, p. 417-426.

66 KIM, Ki-Hyun.; KABIR, Ehsanul and KABIR, Shamin. A review on the human health impact of airborne particulate matter. *Environment International*. January 2015, Vol.74, p. 136-143.

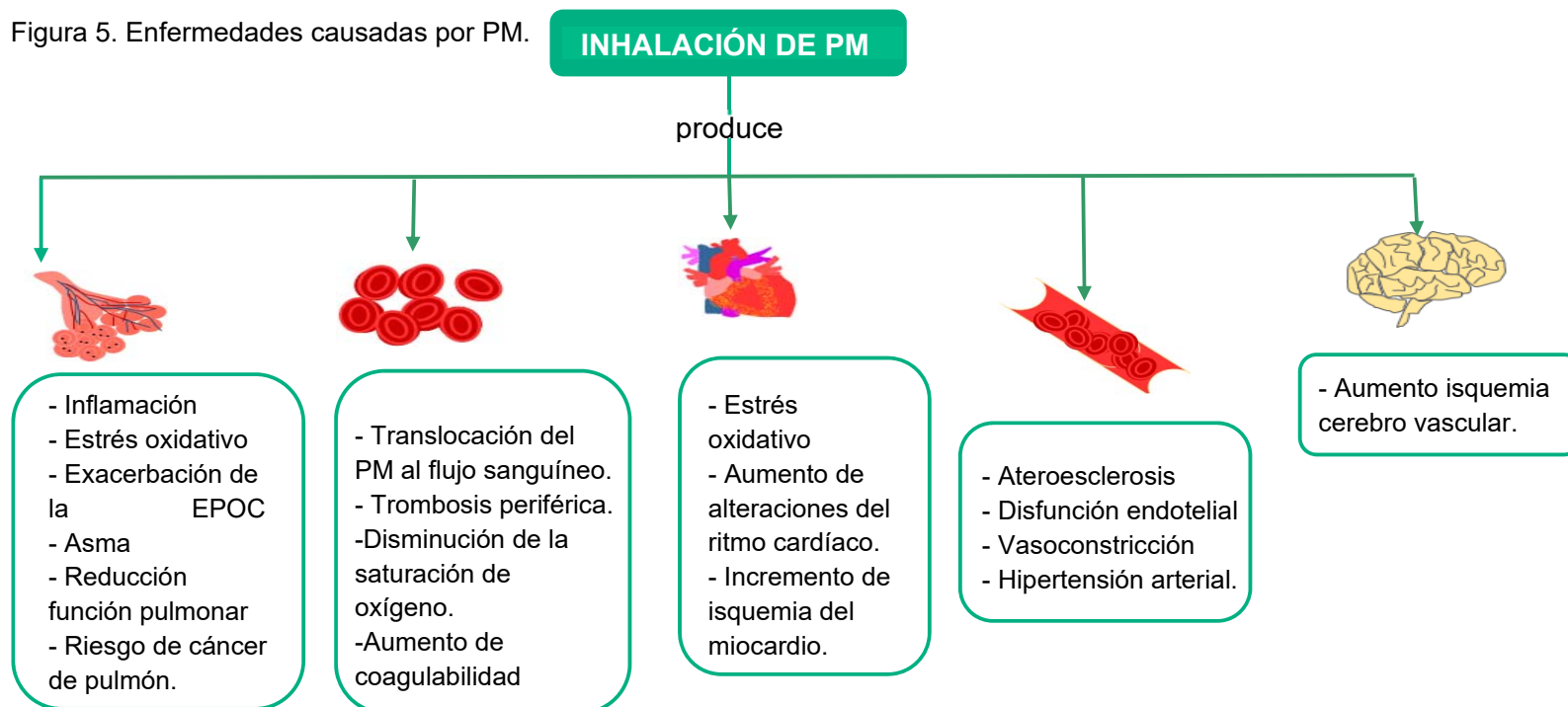
67 ZHANG, Yuting, et al. Investigation on the influences of exposure to winter haze (PM2.5) on 301 subjects' respiratory tract. *Traditional Medicine and Modern*. 2018, Vol. 1 No 3, p.219-222.

69 KURT Ozlem Kar; ZHANG, Jingjing and PINKERTON, K ent E. Pulmonary health effects of air pollution. *Current opinion in pulmonary medicine*. March 2016, Vol. 22 No 2, p.138-143.

70 SACKS, Jason D, et al. Review Particulate Matter – Induced Health Effects: Who Is Susceptible? *Environmental Health Perspectives*. April 2011, Vol. 119 No 4, p. 446-455.

## 4.2 ENFERMEDADES CAUSADAS POR PM

Figura 5. Enfermedades causadas por PM.



Fuente: TCHERNITCHIN, Andrei N. Análisis crítico de la nueva Norma Primaria de Calidad Ambiental para Material particulado Fino Respirable MP 2,5. Cuad Méd Soc(Chile) 2011, Vol.51 No 1, p. 24-28.<sup>71</sup>

<sup>71</sup> TCHERNITCHIN, Andrei N. Análisis crítico de la nueva Norma Primaria de Calidad Ambiental para Material particulado Fino Respirable MP 2,5. Cuad Méd Soc(Chile) 2011, Vol.51 No 1, p. 24-28.

### 4.3 MORBILIDAD Y MORTALIDAD POR PM10 Y PM2.5

La inhalación de partículas de PM en un periodo de tiempo continuo o breve se encuentra asociada con el aumento de emergencias médicas por síntomas respiratorios, enfermedades respiratorias, enfermedades cardiovasculares y con el número de muertes por estas causas.<sup>72,73</sup> Varios estudios confirman que un aumento en la concentración regular de partículas de PM10 y PM2.5 incrementa la morbilidad y la mortalidad de las personas.<sup>74,75,76</sup>

Según un estudio de la ACS el cáncer de pulmón aumentó entre 15 y 27 % por cada 10 µg/m<sup>3</sup> de aumento en la concentración de PM2.5.<sup>77</sup> Para la ACS el PM es carcinógeno para los seres humanos, incide en el desarrollo de cáncer de pulmón y provoca la muerte alrededor del 8% de la población y el 5% de muerte cardiopulmonar.<sup>78,79</sup> Aunque el hábito de fumar sea conocido como la causa más importante del cáncer de pulmón.<sup>80</sup> La EPOC también se relaciona con el aumento de emergencias médicas y el aumento de 10 µg /m<sup>3</sup> en la concentración de PM10. Cerca del 10 % de las personas mayores de 40 años la padecen, pero en las personas mayores los efectos son más agudos, la EPOC es una de las principales causas de muerte en el mundo.<sup>81</sup> La exposición y aumento a PM2.5 también incide en los síntomas del asma.<sup>80</sup> En varias ciudades de Polonia las altas concentraciones de PM2.5 se reflejan en la mortalidad por enfermedades respiratorias más de 42000 muertes y el cáncer de pulmón de 9,6 a 22,8 casos por cada 100 000 habitantes.<sup>82</sup>

72 SONG, Congbo, et al. Health burden attributable to ambient PM 2.5 in China. *Environmental Pollution*. 2017, Vol. 223, p.1-12.

73 LALL Ramona, et al. Estimation of historical annual PM2.5 exposures for health effects assessment. *Atmospheric Environment*. 2004, Vol. 38, p. 5217-5226.

74 POZZI, Roberta, et al. Inflammatory mediators induced by coarse (PM2.5-10) and fine (PM2.5) urban air particles in RAW 264.7 cells. *Toxicology*. 2003, Vol. 183, p. 243-254.

75 DOCKERY D. W. D and POPE, C. A. Acute respiratory effects of particulate air pollution. In: *Annual Review of Public Health*. 1994, Vol.15 No 1, p.107-132.

76 EILSTEIN, D. Exposition prolongée à la pollution atmosphérique et mortalité par pathologies respiratoires. *Revue Française d'Allergologie*. March 2010, Vol. 50 No 2, p. 51-61.

77 XING, Yu-Fei, et al. The impact of PM2.5 on the human respiratory system. *Journal of Thoracic Disease*. 2016, Vol. 8 No 1, p. 69-74.

78 SOSA, Beatriz S, et al. Human health risk due to variations in PM10-PM2.5 and associated PAHs levels. *Atmospheric Environment*. July 2017, Vol. 160, p. 27-35.

79 POPE III, C. Arden, et al. Lung Cancer, Cardiopulmonary Mortality, and Long-term Exposure to Fine Particulate Air Pollution. *JAMA*. March 2002, Vol. 287, No 9, p. 1132-1141.

80 KURT Ozlem Kar; ZHANG, Jingjing and PINKERTON, K ent E. Pulmonary health effects of air pollution. *Current opinion in pulmonary medicine*. March 2016, Vol. 22 No 2, p.138-143.

81 SANTURTÚN, et al. Ana Análisis de la relación entre la enfermedad pulmonar obstructiva crónica y los contaminantes atmosféricos atendiendo al origen y trayectoria de las masas de aire en el Norte de España. *Archivos de Bronconeumología*. 2019, Vol. 53 No 11, p. 616-621.

El estudio de seis ciudades de Harvard descubrió que el aumento en  $10 \mu\text{g} / \text{m}^3$  de la concentración de PM<sub>2.5</sub> aumentaba la mortalidad diaria en 1.5% (CI 95%, 1.1 – 1.9).<sup>83</sup> En Londres un estudio relacionó aumentos de CI 0,5% (95% 0,0 - 0.9) con todas las causas. En Países Bajos, aumento de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> en  $10 \mu\text{g} / \text{m}^3$  se relacionaron con un aumento de 0,5% (IC 95% 0,0 - 0.9) en todas las causas de muerte. En otros países como España y Suecia, la mortalidad por todas las causas también se asocia a la concentración de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>.<sup>66</sup> A la inhalación de PM<sub>2.5</sub> también se le atribuye la inflamación de las arterias e infartos al miocardio por inflamación del endotelio vascular.<sup>84</sup> Además de hipertensión, Arritmia, inflamación y la aterosclerosis.<sup>85,86</sup> En Europa la contaminación del aire, de acuerdo con la AEMA causó la muerte a más de 430.000 personas en el año 2013 por altos niveles de PM<sub>2,5</sub> superiores a los recomendados la OMS.<sup>87</sup> Según un informe de la OMS de 2016 las partículas de PM fueron responsables de 3 millones de muertes en 2012.<sup>88</sup>

#### 4.4 TOXICOLOGÍA DE LA EXPOSICIÓN A PM<sub>10</sub> Y PM<sub>2.5</sub>

**4.4.1 Estrés oxidativo.** El estrés oxidativo se produce cuando hay una cantidad de EOR: radical superóxido,  $\text{O}_2^-$ , radical hidroxilo  $\text{OH}^\bullet$ , radical perhidroxilo y  $\text{O}_2\text{H}^\bullet$ , superior a la normal y los antioxidantes en la mitocondria no son suficientes para evitar el daño en la célula.<sup>89</sup> Los radicales libres son átomos que necesitan un electrón para estabilizarse razón por la cual, su reactividad es alta.<sup>90</sup> Las EOR, radicales y no radicales son las más nocivas para el organismo.<sup>91,92</sup> Se ha demostrado que la inflamación es característica de la enfermedades respiratorias y surge como respuesta adaptativa al estrés oxidativo.<sup>93,39</sup>

---

82 WIDZIEWICZ, Kamila, et al. Original Article Health Risk Impacts of Exposure to Airborne Metals and Benzo(a)Pyrene during Episodes of High PM<sub>10</sub> Concentrations in Poland. *Biomedical Environmental Sciences*. 2018, Vol. 31 No 1, p. 23-36.

83 SCHWARTZ, Joel; LADEN, Francine and ZANOBETTI, Antonella. The Concentration – Response Relation between PM<sub>2.5</sub> and Daily Deaths. *Environmental Health Perspectives*. 2002, Vol. 110 No 10, p. 1025-1029.

KIM, Ki-Hyun.; KABIR, Ehsanul and KABIR, Shamin. A review on the human health impact of airborne particulate matter. 2015, p. 139-140.

84 SHAUGHNESSY, William J; VENIGALLA, Mohan. M and TRUMP, David. Health effects of ambient levels of respirable particulate matter (PM) on healthy, young-adult population. *Atmospheric Environment*. 2015, Vol. 123, p. 102-111.

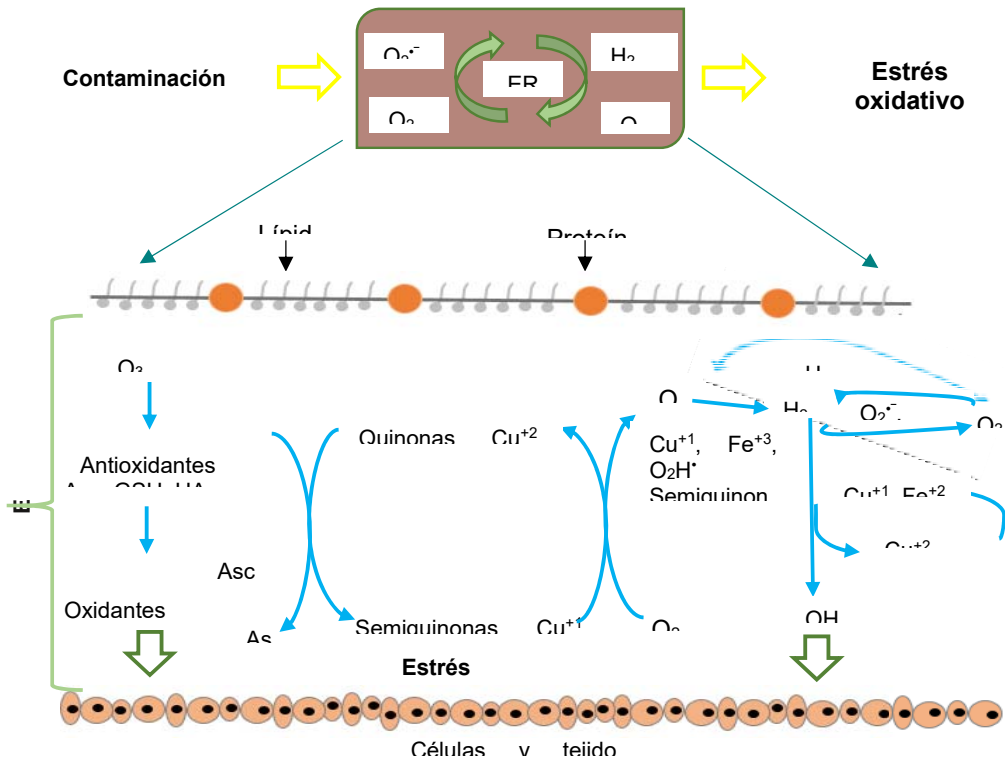
85 DE PAULA RIBEIRO Joaquim, et al. Toxicological effects of particulate matter (PM<sub>2.5</sub>) on rats: Bioaccumulation, antioxidant alterations, lipid damage, and ABC transporter activity. *Chemosphere*. 2016, Vol. 163, p. 569-577.

86 CAO, Jing, et al. Overproduction of reactive oxygen species and activation of MAPKs are involved in apoptosis induced by PM<sub>2.5</sub> in rat cardiac H9c2 cells. *Applied Toxicology*. 2016, Vol.36, p. 609-617.

87 Deutsche Welle. La contaminación del aire provocó 432.000 muertes en la UE en 2013. 2015. Disponible en: <http://p.dw.com/p/1HEe0>

El PM2.5 lleva consigo sustancias tóxicas como metales de transición solubles en agua Cu, Zn, Cr, Fe, Mn y Ni, PAHs, oxo- PAHs, quinonas y ERO.<sup>94</sup> Al depositarse en los pulmones reaccionan con los antioxidantes ascorbato (vitamina C), urato y glutatión presentes en el ELF y se producen ERO, como indica la figura 7.<sup>95</sup>

Figura 6. Interacción de contaminantes del aire y EOR en el ELF.



Fuente: LAKEY, P. S, et al. Chemical exposure-response relationship between air pollutants and reactive oxygen species in the human respiratory tract. SCIENTIFIC REPORTS. 2016, Vol.6, p. 1-6.

94 VISENTIN, Marco, et al. Urban PM 2.5 oxidative potential: Importance of chemical species and comparison of two spectrophotometric cell-free assays. Environmental Pollution. 2016, Vol. 219, p. 72-79.  
 95 LAKEY, P. S, et al. Chemical exposure-response relationship between air pollutants and reactive oxygen species in the human respiratory tract. SCIENTIFIC REPORTS. 2016, Vol.6, p. 1-6.

## 5. CONCLUSIONES

La composición de las partículas de PM10 y PM2.5 es compleja, debido a que proceden de diferentes fuentes y algunas tienen formación secundaria en la atmósfera. Las partículas de PM que provienen de la combustión del diésel y la gasolina son las que más consecuencias traen al medioambiente y a las personas. Medidas para reducir la contaminación por PM como el pico y placa, el día sin carro ayudan a mejorar la calidad del aire. También el fomento del uso de la bicicleta como medio de transporte, el mejoramiento de las condiciones de seguridad, servicio y tipo de combustible del transporte masivo para que pueda ser utilizado por mayor número de personas, disminuirían la concentración de partículas de PM en el aire. La renovación del parque automotor y el ingreso poco a poco de vehículos eléctricos cambiarían el panorama de contaminación que se vive a diario en las ciudades.

Las partículas de PM10 y PM2.5 desempeñan un papel importante en la atmósfera y en la formación de nubes. El balance radiativo de la tierra es perturbado por el aumento de la concentración de partículas lo que tiene repercusiones en el clima e incrementa el calentamiento de la atmósfera. Las partículas de (CN) absorben la radiación y las partículas de  $\text{SO}_4^{2-}$  dispersan la radiación, produciendo un forzamiento radiativo. Es necesario controlar las emisiones de partículas de PM para prevenir los efectos en el clima y desastres naturales, con el cumplimiento de las normas que reglamentan los niveles máximos permitidos de concentración de PM10 y PM2.5.

La contaminación del aire por partículas de PM10 y PM2.5 tiene efectos graves en la salud. Intensifica los síntomas de enfermedades respiratorias: asma, EPOC, reducción de la función pulmonar, cáncer de pulmón, genera estrés oxidativo y causa inflamación, enfermedades cardiovasculares: arritmias cardíacas, infarto del miocardio, translocación de partículas finas al torrente sanguíneo, entre otras y provoca la muerte por estas causas. Estas enfermedades están asociadas con el aumento de la concentración de PM10 y PM2.5. La población más afectada la conforman los niños y los adultos mayores con enfermedades preexistentes.

## BIBLIOGRAFÍA

- ALBERT PALACIOS, Lilia América. Contaminación ambiental. Origen, clases, fuentes y efectos. En Toxicología ambiental. 2004, p. 37-52.
- AVERBUJ, Eduardo. El fuego en el origen. En El hierro se volvió oro; S.A., M. E., Ed.; Madrid, 1988; pp 11-16. ISBN 84-397-1396-7.
- AYASH, Tarek; GONG, Sunling and JIA, Charles. Understanding climatic effects of aerosols: Modeling radiative effects of aerosols. ACS Symposium Series. American Chemical Society. January 2009, Vol. 1005 p. 149-166. ISBN: 978-0-8412-6973-6.
- BALLESTER, Ferran. Contaminación atmosférica, cambio climático y salud Rev Esp Salud Pública. 2005, Vol. 79, No 2, p.159-175.
- BAKLANOV, Alexander; MOLINA, Luisa y GAUSS, Michael. Megacities, air quality and climate. Atmospheric Environment. 2016, Vol 126. p. 235-249.
- BAN WEISS, George and COLLINS, William D. Role in Radiative Transfer. In: Encyclopedia of Atmospheric Sciences 2nd Edition. Elsevier. 2015, Vol. 1 p. 66-75.
- BAO, Mengying, et al. Characteristics and origins of air pollutants and carbonaceous aerosols during wintertime haze episodes at a rural site in the Yangtze River Delta, China. Atmospheric Pollution Research. 2017, Vol.8 No 5, p. 900-911.
- BELMONTE SERRATO, Francisco, et al. Radiación y temperatura en el periodo 1990-1999 en el campo experimentalde «El Ardal» (Murcia): estudio preliminar. Papeles de Geografía. 2002, Vol.35 p. 17-25.
- BERGHMANS, P; PAUWELS, J and ROEKENS, E. relative composition of suspended particulate matter as function of size distribution and location. Journal of Aerosol Science. 2000, Vol.30, p. 609-610.
- CANALES RODRÍGUEZ, Miguel Á, et al. Las Partículas Respirables PM 10 y su Composición Química en la Zona Urbana y Rural de Mexicali, Baja California en México. Información Tecnológica. 2014, Vol.25 N° 6, p.13-22.

CAO, Jing, et al. Overproduction of reactive oxygen species and activation of MAPKs are involved in apoptosis induced by PM 2.5 in rat cardiac H9c2 cells. *Applied Toxicology*. 2016, Vol.36, p. 609-617.

CÁRDENAS RODRÍGUEZ, Noemí y PEDRAZA CHAVERRI, José. Especies reactivas de oxígeno y sistemas antioxidantes: aspectos básicos. *Educ. Química* 2007, Vol.17 No 2, p. 163-173.

DASOM, Kim, et al. Air pollutants and early origins of respiratory diseases. *Chronic Diseases and Translational Medicine*. 2018, Vol. 4 No 2., p.75-94.

DE MARCO, Alessandra. Impacts of air pollution on human and ecosystem health, and implications for the National Emission Ceilings Directive: Insights from Italy. *Environment International*. 2019, Vol 125. p. 320-333.

DE PAULA RIBEIRO Joaquim, et al. Toxicological effects of particulate matter (PM 2.5) on rats: Bioaccumulation, antioxidant alterations, lipid damage, and ABC transporter activity. *Chemosphere*. 2016, Vol. 163, p. 569-577.

DEUTSCHE WELLE. Emiten nueva alarma ambiental en Pekín, 2015, 2015. Disponible en: <http://p.dw.com/p/1HPTi>

DEUTSCHE WELLE. La contaminación del aire provocó 432.000 muertes en la UE en 2013. 2015. Disponible en: <http://p.dw.com/p/1HEe0>

DEUTSCHE WELLE. Nueva Delhi: medidas de emergencia ante la contaminación, 2016. Diponible en: <http://p.dw.com/p/2SEdM>

DEUTSCHE WELLE. París: segundo día de restricciones al tráfico por polución, 2016. Diponible en: <http://p.dw.com/p/2TshH>

DEUTSCHE WELLE. Pekín en alerta ambiental por contaminación del aire, 2015. Diponible en: <http://p.dw.com/p/1HF7p>

DEUTSCHE WELLE. Restricción vehicular por polución en ciudades italianas, 2015. Diponible en: <http://p.dw.com/p/1HUQf>

DEUTSCHE WELLE. Pekín levanta la alerta roja por contaminación tras 48 horas, 2015. Diponible en: <http://p.dw.com/p/1HL6q>

DOCKERY D. W. D and POPE, C. A. Acute respiratory effects of particulate air pollution. In: *Annual Review of Public Health*. 1994, Vol.15 No 1, p.107-132.

DUARTE, C. M, et al. Cambio global Impacto de la actividad humana sobre el sistema Tierra. CSIC. Madrid, 2006. ISBN 9788400084523.

EILSTEIN, D. Exposition prolongée à la pollution atmosphérique et mortalité par pathologies respiratoires. *Revue Française d'Allergologie*. March 2010, Vol. 50 No 2, p. 51-61.

FALCON RODRIGUEZ, Carlos Iván, et al. Aeroparticles, Composition, and Lung Diseases. *Frontiers in Immunology*. 2016, Vol. 7 p.1-9.

FARAJI, Maryam. et al. Effects of airborne particulate matter (PM 10) from dust storm and thermal inversion on global DNA methylation in human peripheral blood mononuclear cells (PBMCs) in vitro. *Atmospheric Environment*. 2018, Vol. 195, p.170-178.

FERNÁNDEZ, Walter. Cambios Climáticos: El Calentamiento Global. En: *Tecnología en Marcha*. 1991, Vol. 2 p. 11-22.

GLUECKAUF, E. The Composition of Atmospheric Air. In: Malone T.F. (eds) *Compendium of Meteorology*. American Meteorological Society, Boston, MA. [en línea]. 1951. P. 3-10. ISBN 978-1-940033-70-9.

GONZÁLEZ TORRES, María Cristina; BETANCOURT RULE, Miguel y ORTÍZ MUÑOZ Rocío. Daño Oxidativo y Antioxidantes. *Bioquímica*. Enero-marzo 2000, Vol. 25 No 1, p. 1-9.

GRAMSCH, E, et al. Influence of surface and subsidence thermal inversion on PM 2.5 and black carbon concentration. *Atmos. Environ. J.* 2014, Vol. 98, p.290-298.

GREEN, Joanne y SÁNCHEZ Sergio. *La Calidad del Aire en América Latina: Una Visión Panorámica*. Washington D.C. 2013.

GUTIÉRREZ SALINAS, José ¿Qué sabe usted acerca de... radicales libres? *Rev. Mex. Revista Mexicana de Ciencias Farmacéuticas*. [En línea]. 2006, Vol. 37 No 4, p. 69-73. ISSN 1870-0195.

HAYWOOD, James and BOUCHER, Olivier. Estimates of the direct and indirect radiative forcing due to tropospheric aerosols' a review. *Reviews of Geophysic*. 2000, Vol. 38 No 4, p. 513-543.

HO Kin Fai, et al. Chemical composition and bioreactivity of PM 2.5 during 2013 haze events in China. *Atmospheric Environment*. February 2016, Vol.126, p. 162-170.

HU, Rong, et al. PM 2.5 Exposure Elicits Oxidative Stress Responses and Mitochondrial Apoptosis Pathway Activation in HaCaT Keratinocytes. *Chinese Medical Journal*. 2017, Vol.130 No 18, p. 2205-2214.

HUMERA Bibi; ALAM, Khan and BIBI, Samina. Estimation of shortwave direct aerosol radiative forcing at four locations on the Indo-Gangetic plains: Model results and ground measurement. *Atmospheric Environment*. 2017, Vol.163, p.166-181.

JACOBSON Mark Z. URBAN AIR POLLUTION. In *Atmospheric Pollution: History, Science, and Regulation*; 2002; pp 81-114. Cambridge: Cambridge University Press. ISBN 9780511802287.

JELEŃSKA, Maria, et al. Evaluation of indoor / outdoor urban air pollution by magnetic, chemical and microscopic studies. *Atmospheric Pollution Research journal*. 2017, Vol. 8 p. 754-766.

KIRKHAM, M. B. Solar Radiation, Black Bodies, Heat Budget, and Radiation Balance. In *Principles of Soil and Plant Water Relations (Second Edition)*. Academic Press. 2014, p. 453-472. ISBN 9780124200227.

KIM, Ki Hyun; KABIR, Ehsanul and KABIR, Shamin. A review on the human health impact of airborne particulate matter. *Environment International*. January 2015, Vol.74, p. 136-143.

KIM, Nakyung; KIM, YONG Pyo and KANG, Changhee. Long-term trend of aerosol composition and direct radiative forcing due to aerosols over Gosan: TSP, PM10, and PM2.5 data between 1992 and 2008. *Atmospheric Environment*. 2011, Vol. 45 No 34, p. 6107-6115.

KURT Ozlem Kar; ZHANG, Jingjing and PINKERTON, Kent E. Pulmonary health effects of air pollution. *Current opinion in pulmonary medicine*. March 2016, Vol. 22 No 2, p.138-143.

LAKEY, P. S, et al. Chemical exposure-response relationship between air pollutants and reactive oxygen species in the human respiratory tract. *SCIENTIFIC REPORTS*. 2016, Vol.6, p. 1-6.

LALL Ramona, et al. Estimation of historical annual PM2.5 exposures for health effects assessment. *Atmospheric Environment*. 2004, Vol. 38, p. 5217-5226.

LEONELLI, Lara, et al . Characterization of aerosols emissions from the combustion of dead shrub twigs and leaves using a cone calorimeter. In *Fire Safety Journal*. July 2017, Vol.91 p. 800-810.

LI, Deping, et al. Identification of long-range transport pathways and potential sources of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> in Beijing from 2014 to 2015. *Journal of Environmental Sciences*. 2016, Vol.56 p.214-229.

LOHMANN, Ulrike. Aerosol – Cloud Interactions and Their Radiative Forcing. In *Encyclopedia of Atmospheric Sciences 2nd Edition*. Elsevier, 2015, Vol. 1 p. 17-22.

LONATI, Giovanni; GIUGLIANO, Michele and OZGEN, Senem. Primary and secondary components of PM<sub>2.5</sub> in Milan (Italy). *Environment International*. 2008, Vol.34 No 5, p. 665-670.

MAKRA, L. Anthropogenic Air Pollution in Ancient Times. In *Toxicology in Antiquity*. 2019, p 27-287.

MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL Resolución 610 (24, de marzo de 2010); P. la cual se modifica la R. 601 del 4 de abril de 2006 N. de C. del A. o N. de I. (610) 24; Colombia, 2010; p 8.

MISHCHENKO, M; TRAVIS, L. and LACIS, A. Scattering. In: *Encyclopedia of Atmospheric Sciences (Second Edition)*. Elsevier. Academic Press. 2015, Vol 5 p. 27-36. ISBN 9780123822253.

MISHRA, Amit Kumar; KOREN, Ilan and RUDICH, Yinon. Effect of aerosol vertical distribution on aerosol-radiation interaction: A theoretical prospect. *Heliyon* 2015, Vol.1 No 2 p. 1-25.

MONKS, P. S, et al. Atmospheric composition change – global and regional air quality. *Atmospheric Environment*. October, 2009, Vol 43. No 33. p. 5268-5350.

MURRAY, Robert K,et al. Harper Bioquímica, 29 a . e.; McGRAW-HILL INTERAMERICANA EDITORES, S. A. de C. V., Ed.; 2013. ISBN: 978-607-15-0914-7

ORGANIZATION, W. H. Ambient Air Pollution: A global assessment of exposure and burden of disease. World Health Organization: Switzerland, 2016. p.1-131. ISBN 9789241511353.

OTERO, Lidia, et al. Espesor óptico de aerosoles durante el año 2002 para diez estaciones pertenecientes a la red AERONET – NASA. *ÓPTICA PURA Y APLICADA*. 2006, Vol. 39 No 4, p.355-364.

PÉRÉ, Jean Cristophe, et al. Impacts of future air pollution mitigation strategies on the aerosol direct radiative forcing over Europe. *Atmospheric Environment*. December 2012, Vol. 62, p.451-460.

POPE III, C. Arden, et al. Lung Cancer, Cardiopulmonary Mortality, and Long-term Exposure to Fine Particulate Air Pollution. *JAMA*. March 2002, Vol. 287, No 9, p. 1132-1141.

POZZI, Roberta, et al. Inflammatory mediators induced by coarse (PM<sub>2.5-10</sub>) and fine (PM<sub>2.5</sub>) urban air particles in RAW 264.7 cells. *Toxicology*. 2003, Vol. 183, p. 243-254.

PRIJITH, S. S, et al. Elevated aerosols and role of circulation parameters in aerosol vertical distribution. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2016, Vol.137 p.36-43.

QUEROL, Xavier. Calidad del aire, partículas en suspensión y metales. *Rev Esp Salud Pública*. 2008, Vol 82. No 5. 447-453.

QUEROL, Xavier, et al. Speciation and origin of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> in selected European cities. *Atmospheric Environment*. 2004, Vol. 38 p. 6547-6555.

RAJÉ, Fiona; TIGHT Miles and POPE Francis D. Traffic pollution: A search for solutions for a city like Nairobi. *Cities journal*. 2018, Vol. 82, p.100-107.

RODRÍGUEZ COTTO, Rosa. I. Contaminación por material particulado, estrés oxidativo e inflamación. *Perspectivas en Asuntos Ambientales*. 2015, Vol. 4, p. 58-65.

RODRÍGUEZ FALCÓN, Carlos Iván; Rosas Pérez, Irma y Segura Medina, Patricia. Relación de los mecanismos inmunológicos del asma y la contaminación ambiental. *Rev. Fac. Med* 2017, Vol. 65 No 2, p.333-342.

RODRÍGUEZ, Julio Flores. Contaminación atmosférica. En *Introducción a la toxicología ambiental*; Metepec, México, Centro Panamericano de Ecología Humana y Salud, División de Salud y Ambiente, Organización Panamericana de la Salud–Organización Mundial de la Salud, 1997. p. 123-147.

SACKS, Jason D, et al. Review Particulate Matter – Induced Health Effects: Who Is Susceptible? *Environmental Health Perspectives*. April 2011, Vol. 119 No 4, p. 446-455.

SAIKAWA, Eri, et al. Present and potential future contributions of sulfate, black and organic carbon aerosols from China to global air quality, premature mortality and radiative forcing. *Atmospheric Environment*. 2009, Vol. 43 No 17, p. 2814-2822.

SAMEK, Lucina. Overall human mortality and morbidity due to exposure to air pollution. *International Journal of Occupational Medicine and Environmental Health*. 2016, Vol. 29 No 3, p. 417-426.

SANTURTÚN, et al. Ana Análisis de la relación entre la enfermedad pulmonar obstructiva crónica y los contaminantes atmosféricos atendiendo al origen y trayectoria de las masas de aire en el Norte de España. *Archivos de Bronconeumología*. 2019, Vol. 53 No 11, p. 616-621.

SCHWARTZ, Joel; LADEN, Francine and ZANOBETTI, Antonella. The Concentration – Response Relation between PM 2.5 and Daily Deaths. *Environmental Health Perspectives*. 2002, Vol. 110 No 10, p. 1025-1029.

SHARMA, Sudhir Kumar and MANDAL, Tuhin Kumar. Chemical composition of fine mode particulate matter (PM 2.5) in an urban area of Delhi, India and its source apportionment. *Urban Climate*. 2017, Vol.21 p.106-122.

SHAUGHNESSY, William J; VENIGALLA, Mohan. M and TRUMP, David. Health effects of ambient levels of respirable particulate matter (PM) on healthy, young-adult population. *Atmospheric Environment*. 2015, Vol. 123, p. 102-111.

SHEPHERD, Marjorie. Perspective for Managing PM. In *Particulate Matter Science for Policy Makers: A NARSTO Assessment*; Press, C. U., Ed. NARSTO Assessment, 2004. p. 53-68.

SONG, Congbo, et al. Health burden attributable to ambient PM 2.5 in China. *Environmental Pollution*. 2017, Vol. 223, p.1-12.

SOSA, Beatriz S, et al. Human health risk due to variations in PM10-PM2.5 and associated PAHs levels. *Atmospheric Environment*. July 2017, Vol. 160, p. 27-35.

TCHERNITCHIN, Andrei N. Análisis crítico de la nueva Norma Primaria de Calidad Ambiental para Material Particulado Fino Respirable MP 2,5. Cuad Méd Soc(Chile) 2011, Vol.51 No 1, p. 24-28.

TERZI, Eleni, et al. Chemical composition and mass closure of ambient PM10 at urban sites. Atmospheric Environment. 2010, Vol. 44 No 18, p. 2231-2239.

TESFAYE, Melaku, et al. Simulation of bulk aerosol direct radiative effects and its climatic feedbacks in South Africa using RegCM4. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2016, Vol.142, p.1-19.

TINGTING, Xu, et al. Temperature inversions in severe polluted days derived from radiosonde data in North China from 2011 to 2016. Science of the Total Environment. 2019, Vol. 647, p.1011-1020.

VALLIUS, Marko, et al. Concentration and estimated soot content of PM1, PM2.5 and PM10 in a subarctic urban atmosphere. Environmental Science and Technology. 2000, Vol.34 No 10, p.1919-1925.

VECCHI, Roberta; MARCAZZAN, Graziella Maria and VALLI Gianluigi. A study on nighttime – daytime PM10 concentration and elemental composition in relation to atmospheric dispersion in the urban area of Milan (Italy) Atmospheric Environment 2007, Vol.41 No 10, p. 2136-2144.

VISENTIN, Marco, et al. Urban PM 2.5 oxidative potential: Importance of chemical species and comparison of two spectrophotometric cell-free assays. Environmental Pollution. 2016, Vol. 219, p. 72-79.

WANG, Chenchen, et al. PM 2.5 and Cardiovascular Diseases in the Elderly: An Overview. International Journal of Environmental Research and Public Health 2015, Vol.12 p. 8187-8197.

WANG J, et al. The effects of organics properties on aerosol. In Goldschmidt Conference Abstracts 2009. Geochimica et Cosmochimica Acta. June, 2009, Vol.73 No 13 p. 1411. ISSN 0016-7037.

WIDZIEWICZ, Kamila, et al. Original Article Health Risk Impacts of Exposure to Airborne Metals and Benzo(a)Pyrene during Episodes of High PM 10 Concentrations in Poland. Biomedical Environmental Sciences. 2018, Vol. 31 No 1, p. 23-36.

WILD, Martin, et al. The global energy balance from a surface perspective. *Climate Dynamics*. 2013, Vol. 40 No 11-12 p. 3107-3134.

XING, Yu-Fei, et al. The impact of PM<sub>2.5</sub> on the human respiratory system. *Journal of Thoracic Disease*. 2016, Vol. 8 No 1, p. 69-74.

ZHANG, Hua, et al. PM<sub>2.5</sub> and tropospheric O<sub>3</sub> in China and an analysis of the impact of pollutant emission control. *Advances in Climate Change Research. Res.* 2014, Vol.5, No 3, p.136-141.

ZHANG, Yuting, et al. Investigation on the influences of exposure to winter haze (PM<sub>2.5</sub>) on 301 subjects' respiratory tract. *Traditional Medicine and Modern.* 2018, Vol. 1 No 3, p.219-222.

ZHAO Danting, et al. Air pollution and its influential factors in China's hot spots. *Journal of Cleaner Production*. 2018, Vol. 185, p.619-627.