



Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO E INCIDENCIA DE LA CONTAMINACIÓN EN MADRID

Clave: 201502330

Coordinador: María Olga Bocigas Solar

PALABRAS CLAVE

Contaminación, Madrid, PM_{2,5}, regresión lineal, protocolo de actuación, calidad del aire.

KEY WORDS

Pollution, Madrid, PM_{2,5}, lineal regression, action protocol, air quality.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	4
CAPÍTULO I. LAS SUSTANCIAS CONTAMINANTES Y EL CAMBIO CLIMÁTICO.....	11
CAPÍTULO II. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	25
CAPITULO III. MÉTODOLÓGÍA PARA CONTROLAR LOS NIVELES DE PM_{2,5}.....	29
CAPITULO IV. APLICACIÓN DE LA METODOLOGIA EN LA COMUNIDAD DE MADRID.....	36
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	47
ANEXOS	51

INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

En Occidente, los avances tecnológicos e industriales que el ser humano ha logrado en los últimos siglos le han permitido prosperar y desarrollarse hacia unos estándares de vida inimaginables hace cientos de años.

Con la entrada del nuevo milenio, se está empezando a mostrar la otra cara del desarrollo industrial iniciado hace aproximadamente dos siglos, la contaminación del aire. La continua y creciente contaminación mediante gases de efecto invernadero ha hecho aflorar las primeras consecuencias sobre nuestro planeta. El calentamiento global aparece en cualquier discusión sobre el medio ambiente como causa de todos los desórdenes de la fauna y la flora; cada vez más países se muestran escépticos sobre políticas y tratados medioambientales internacionales, retirando sus apoyos de los mismos; el deshielo de los polos es cada vez más inminente; la salud de la población cada vez es más sensible y se ve más afectada por enfermedades respiratorias; estas son solo algunas de las numerosas consecuencias negativas y más ensombrecidas del progreso.

Con todo, el deshielo de los polos es uno de los fenómenos que ya lleva teniendo lugar en los últimos años, y que ha sido favorecido por el calentamiento de los océanos. Según Kendra Pierre-Louis, reportera del equipo de cambio climático del New York Times, tan solo desde 2007 el ritmo de deshielo de la Antártida se ha triplicado hasta día de hoy. Entre 1992 y 2017, en el continente antártico ya se han derretido 3 billones de toneladas de hielo, mientras que en Groenlandia se han derretido 1 billón de toneladas (Pierre – Louis, 2018)

Así mismo, unos océanos más calientes no solo favorecen el deshielo de las masas de hielo de los polos. Los huracanes son el mecanismo que tiene la Tierra para equilibrar los excesos de calor de los trópicos hacia zonas más frías. Si las temperaturas de los océanos son mayores, existe la posibilidad de que más huracanes azoten las costas.

Estas son unas consecuencias que parecen no afectar en exceso en Europa. Sin embargo, en los últimos años, los países mediterráneos se están volviendo cada vez más secos, llegando a registrar temperaturas características del norte de África. El norte de Europa, en contrapartida, se está volviendo una zona más húmeda de lo habitual, lo cual favorece que en invierno sufran crecidas de ríos.

Además de las consecuencias ya mencionadas, el cambio climático también ocasiona daños en el plano económico. Acorde a los datos elaborados por la Comisión Europea, las reparaciones e indemnizaciones suponen grandes inversiones para los

Estados y sus habitantes. En Europa, entre 1980 y 2011 el coste directo de las inundaciones llegó hasta los 90.000 millones de euros y afectaron a 5,5 millones de europeos (Comisión Europea, 2012).

Por consiguiente, todos estos sucesos facilitan la identificación del cambio climático como un fenómeno que pone en riesgo el estilo de vida del ser humano y de su entorno. Por ello, se llevan dando esfuerzos a nivel global para combatir este problema común, que, si se remonta a su origen, acaba por concluir en una reducción y control de la contaminación a la atmósfera.

El primer paso en la cooperación internacional se dio en 1992. La comunidad internacional decidió ponerse de acuerdo en sentarse sobre la mesa y discutir cuáles serían los pasos para combatir el cambio climático. De este modo, la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) se celebró. En ella, se logró dar a conocer la problemática de la contaminación sobre el cambio climático a una escala global, llegando a ser ratificado por 195 países.

Los objetivos planteados por la CMNUCC no resultaron ser efectivos en cuanto a lo que la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) se refiere. Ello se debe, principalmente, a dos razones; La primera fue que en aquel entonces no existía certeza científica de cuáles podían ser unas concentraciones de gases de efecto invernadero peligrosas. La segunda razón, es que se entendía al cambio climático como un fenómeno inevitable, y que los estados sólo podían mitigar y adaptarse a su impacto en la Tierra.

Cinco años después, los firmantes de la CMNUCC comprendieron que más recursos de los previstos iban a resultar necesarios para combatir el cambio climático, se requería de unas medidas más estrictas. De este modo, el espíritu de cooperación llevado a cabo cinco años atrás se materializó en 1997 en un nuevo tratado, el Protocolo de Kioto. Los 38 países desarrollados firmantes se comprometieron a reducir las emisiones de GEI en un 18% como mínimo respecto a los niveles registrados en 1990. Por su parte, la Europa de los 28 se comprometió a una reducción del 20%.

En cambio, los esfuerzos puestos sobre este nuevo tratado no resultaron ser suficientes para lograr un impacto significativo en las concentraciones de GEI.

Ante la aparente ineficacia del Protocolo de Kioto, el 12 de diciembre de 2015 la comunidad internacional volcó su disposición de frenar el cambio climático en un nuevo tratado, el de París. La meta del acuerdo es lograr que el calentamiento del planeta se establezca muy por debajo de los 2 grados centígrados con respecto a los niveles preindustriales.

Sin embargo, el 1 de junio de 2017, los esfuerzos internacionales sufrieron un duro golpe con la salida de Estados Unidos del tratado, sumándose a Nicaragua y Siria como los únicos países pertenecientes a la CMNUCC que no firmaron el Tratado de París.

De este modo, queda definida lo que va a ser la lucha contra el cambio climático y las emisiones de gases de efecto invernadero para las próximas décadas. Sin embargo, toda esta problemática se presenta muy general y parece no tener una incidencia local o focalizada. España no es una excepción al mundo y sufre los mismos problemas a nivel nacional asociados a la contaminación. El periódico El País publicó que sólo en la década de 2000 a 2009 la contaminación del aire fue la causante de 93.000 muertes, representando las defunciones por esta causa un 3% de los fallecimientos anuales durante ese período (Ansede, 2018). El parque de vehículos español ha estado incrementándose desde 1990 a 2016 a una tasa media de 2,75% cada año, lo que genera que cada vez más vehículos emitan gases de efecto invernadero a la atmósfera. La última década ha sido de las más calurosas en nuestro país, llegando a valores máximos y medios nunca antes registrados

La contaminación es un fenómeno que también tiene impacto en una dimensión local. Un ejemplo de ciudad influenciada por la contaminación es Madrid. La capital es uno de los núcleos con mayores niveles de contaminación de España si se observa el Índice de Calidad del Aire (ICA).

En efecto, cada cierto tiempo se establecen restricciones de velocidad en los accesos y alrededores a la capital durante episodios de alta contaminación, y se ha llevado a cabo una labor de clasificación de los vehículos mediante un etiquetado que distingue aquellos más contaminantes de los menos contaminantes para futuros escenarios de restricción. Recientemente, se ha introducido una de las medidas que más división ha generado entre los madrileños, la implantación de Madrid Central, por el cual solo un número muy reducido de vehículos que cumple con determinadas características puede acceder al centro.

Luego, la contaminación es una cuestión complicada de tratar, pues sus consecuencias afectan indistintamente a la población, aunque especialmente a los más vulnerables, como niños y ancianos. Como consecuencia, el Ayuntamiento de Madrid cuenta con mecanismos para contrarrestar los actuales niveles de contaminantes en el aire.

En este sentido, existen determinados un conjunto de protocolos de contaminación que restringen el uso de vehículos en función de los niveles de contaminación que registran las estaciones de medición.

Dichos protocolos se activan cuando algún agente contaminante se acumula en unos niveles que pueden resultar dañinos para la salud humana. Mediante el Real Decreto 102/2011 y la Directiva 2008/50/CE, el Ayuntamiento ha fijado umbrales de alerta para contaminantes como el dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno u ozono. Los umbrales de alerta para estos contaminantes son de $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para el dióxido de azufre durante 3 horas, $400 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de dióxido de nitrógeno durante 3 horas y $240 \mu\text{g}/\text{m}^3$ durante 1 hora en el caso del ozono, todos ellos si hay incidencia en un área representativa. El área representativa hace referencia al menos a un área de 100 kilómetros cuadrados, o en caso de aglomeraciones si la superficie no alcanza la magnitud de 100m^2 . Según la Dirección General de Sostenibilidad y Control Ambiental los niveles de dióxido de azufre (SO_2) no son elevados, y puesto que las fuentes de su emisión se han visto reducidas, no es conveniente elaborar un protocolo de contaminación para este agente.

De la misma manera, las partículas $\text{PM}_{2.5}$ y PM_{10} son partículas microscópicas que tienen origen en fenómenos naturales o bien derivan de otras partículas. La Dirección General no estima necesario un protocolo de actuación por su carácter extraordinario.

Por su parte, el ozono cuenta con un umbral de aviso o información que se establece en los $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en un período de una hora. Cabe mencionar, que no se trata del ozono troposférico, el que se encuentra en las capas de la atmósfera terrestre y que nos protege de los rayos del Sol, sino del ozono que se localiza respirable en cotas bajas. En el pasado, el umbral de información ha sido alcanzado, pero nunca se ha llegado a los niveles de alerta establecidos. El ozono es un gas que se origina por el efecto que tiene el Sol sobre otros agentes como pueden ser los compuestos orgánicos volátiles (VOC) o los óxidos de nitrógeno (NO_x). Es, por tanto, un gas que precede a otros de actividades como el tráfico o las emisiones industriales, y que no se genera directamente de ninguna

actividad. Por estos motivos, la Dirección General de Sostenibilidad y Control Ambiental, lo define como un gas prácticamente impredecible y de gran complejidad.

En lo que al dióxido de nitrógeno se refiere, la Dirección General sostiene que tampoco se ha superado el umbral establecido por la normativa, aunque debido a que es el contaminante que alcanza valores más altos por el transporte de vehículos es conveniente mantener un protocolo, aprobado el 10 de diciembre de 2018, cuando las condiciones atmosféricas se muestren desfavorables. Contempla cinco escenarios que establecen restricciones a la libre circulación, velocidad de conducción y a el estacionamiento tanto en zonas interiores y exteriores de la M-30, dependiendo del alcance que se haya establecido en cada escenario.

Con todo lo anteriormente analizado, surge el siguiente Problema de investigación.

En la ciudad de Madrid los niveles de contaminación de las partículas $PM_{2,5}$ en repetidos períodos estudiados superan lo establecido por la Organización Mundial de la Salud (OMS).

A partir del problema planteado, la hipótesis, como posible respuesta estaría dado por:

La implementación de un protocolo de actuación para las partículas contaminantes $PM_{2,5}$, mejora los actuales niveles de contaminación en la comunidad de Madrid.

Por consiguiente, el Objetivo General de la investigación es:

Realizar un estudio de las relaciones de las partículas $PM_{2,5}$ con variables ambientales y proponer un protocolo de actuación con el objetivo de reducir su impacto en la salud humana.

Para la elaboración del estudio, ha sido necesaria la consecución de unos objetivos específicos, entre los que se encuentran:

1. Realizar una búsqueda y obtención de datos de los portales facilitados por el Ayuntamiento de Madrid con los niveles de partículas contaminantes con una frecuencia diaria para el período comprendido entre 2001 y 2018.

2. Realizar otra búsqueda de datos, esta vez relativa a los eventos meteorológicos registrados en la ciudad de Madrid, con una frecuencia diaria, en el período comprendido entre 2001 y 2018.
3. Ordenar y clasificar exhaustivamente los datos obtenidos en un formato legible, que facilite su uso y estudio, además de eliminar aquellos que han sido considerados no válidos.
4. Elaborar una base de datos conjunta donde aparezcan incluidas las variables meteorológicas como lluvias, temperaturas y viento junto con las variables de partículas contaminantes en un formato con datos diarios para los años de 2011 a 2018.
5. Realizar un estudio de las partículas $PM_{2,5}$, sobre cómo se comportan estas partículas ante la acción meteorológica de las lluvias, temperaturas y vientos y qué relación tienen con otros contaminantes, también presentes en la ciudad, como el dióxido de nitrógeno, partículas PM_{10} u otros óxidos de nitrógeno.

Dado todo lo anterior, este trabajo se ha articulado en cinco capítulos, además de esta introducción en la que se expone la novedad del tema, el objeto de investigación, sus objetivos y la hipótesis de trabajo.

El primer capítulo se dedica a explicar la actualidad del tema, de la situación en que se encuentra el planeta en lo que a efectos de la contaminación se refiere, las consideraciones de la Organización Mundial de la Salud (OMS) respecto a los contaminantes del aire y, finalmente, algunas de las medidas que se están tomando en el ámbito de estos contaminantes.

El segundo capítulo consta de una exhaustiva revisión bibliográfica sobre la que se ha basado e inspirado el presente trabajo.

En el tercer capítulo se expone la metodología que se va a aplicar para el estudio de las partículas $PM_{2,5}$.

En el capítulo cuatro, finalmente se aplica la metodología expuesta en el capítulo tres.

Finalmente, en el capítulo cinco se exponen una serie de conclusiones y recomendaciones derivadas del estudio.

**CAPÍTULO I. LAS SUSTANCIAS CONTAMINANTES Y EL
CAMBIO CLIMÁTICO**

**CAPÍTULO I. LAS SUSTANCIAS
CONTAMINANTES Y EL CAMBIO
CLIMÁTICO**

La problemática que presenta la contaminación ha sido durante décadas un tema que tanto los estados como sus habitantes han dejado de lado.

No ha sido hasta recientemente que se puede notificar que esta corriente está cambiando a unos gobiernos y sociedad más concienciados con lo que supone convivir en un ambiente influenciado por la contaminación. Cada vez tiene más presencia en medios de comunicación, colectivos preocupados por el medio ambiente y por la sociedad en general. Por este motivo, es necesario definir inicialmente el significado y alcance de términos como efecto invernadero, calentamiento global y cambio climático.

El efecto invernadero, es un fenómeno por el cual la atmósfera que envuelve la Tierra se calienta (Caballero, M., *et al.*, 2007). La atmósfera, es una capa de gases muy fina si la comparamos con el tamaño y grosor de nuestro planeta, pero que, sin embargo, resulta esencial para que se desarrolle la vida tal y como la conocemos actualmente.

La atmósfera está compuesta por una serie de gases, distribuidos con distintas proporciones. Destaca el nitrógeno (N), que representa el 79% de esta capa de gases, seguido del oxígeno (O₂) con un 20%. El 1% restante pertenece a otros gases como el Argón (Ar) y el dióxido de carbono (CO₂). Este último, que solamente representa un 0,03% de la composición de gases atmosféricos, juega un papel predominante en el calentamiento de la atmósfera (Caballero, M., *et al.*, 2007).

Todos estos gases no se pierden en el espacio debido a la atracción gravitacional que ejerce la Tierra sobre ellos. Como consecuencia de esta dinámica, nos encontramos con dos capas de gases diferenciadas, la Tropósfera, de 10 kilómetros de espesor y con el 75% de la composición de la atmósfera; y la Estratósfera, la cual alcanza hasta los 50 kilómetros de altura y contiene el 24% de los gases de la atmósfera. En la Estratósfera se encuentra la capa de ozono que protege a los organismos de una alta exposición a los rayos ultravioleta.

Por otro lado, de las temperaturas que se registran en la atmósfera, los valores más elevados, es decir, los más calientes, son los que se localizan en el punto de contacto entre la atmósfera y la Tierra, alrededor de 20 grados centígrados, y según nos alejemos de la corteza terrestre, la temperatura desciende drásticamente hasta los -60°C a los 10 km de altura.

Este hecho genera un conflicto con la suposición de que la fuente de calor de la atmósfera proviene directamente del Sol, y por la cual habría que deducir que las capas más altas deberían estar más calientes por estar más cerca del Sol. Sin embargo, los gases atmosféricos no son capaces de absorber los rayos que llegan directamente del Sol debido a su alta energía y ondas de longitud corta dejándolos pasar hacia la corteza terrestre. Una vez que la luz solar entra en contacto con la superficie de la Tierra, esta o bien refleja los rayos al exterior, calientan el planeta o son retenidos por la atmósfera.

Al calentarse el globo terrestre, la luz solar se transforma en radiación de baja energía u onda amplia, la cual puede ser absorbida por los gases presentes en la atmósfera, especialmente por el CO₂, convirtiéndose este en el principal actor que calienta la atmósfera. Así, cuanto mayor sea la presencia de este gas, más calor absorberá y mantendrá más caliente al planeta.

En este sentido, el calentamiento global, está dado por el aumento de la temperatura del planeta en 0,5°C si se compara con el período de 1961 a 1990 y de alrededor de 1°C si tomamos el período de 1850 a 1990 (Caballero, M., *et al.*, 2007). El calentamiento global ha estado acompañado por el aumento de los niveles de CO₂ en la atmósfera, es decir, ha ido de la mano del efecto invernadero. Por esta razón, los términos calentamiento global y efecto invernadero son usados de manera indistinta. Sin embargo, es menester destacar que, el efecto invernadero es la causa y el calentamiento global la consecuencia.

El incremento registrado de CO₂ tiene un origen ligado a procesos naturales, aunque la actividad humana también juega un papel fundamental en el proceso, por ejemplo, con la tala masiva de bosques o la quema de combustibles fósiles. Es complejo cuantificar la proporción que pertenece a procesos naturales y a la actividad humana, sin embargo, modelos climáticos han podido realizar estimaciones comparando el balance de entradas y salidas de CO₂ por causas naturales y humanas.

Por un lado, se encuentra el CO₂ que acaba disolviéndose en los océanos y termina depositándose en las rocas y lecho marino. Con el paso de millones de años, estas rocas se funden una vez llegan al interior de la Tierra, junto con el CO₂ contenida en cada una de ellas, para luego liberar esta energía a la atmósfera mediante erupciones volcánicas.

Por otro lado, los seres vivos que habitan el planeta también son capaces de retener CO₂ en sus tejidos. Las plantas mediante la fotosíntesis retienen el CO₂ en sus sistemas y

los animales mediante la respiración también filtran el gas. Sin embargo, la flora excede a la fauna en lo que a retención de CO₂ se refiere, por lo que bosques y selvas se convierten en grandes reservas. Al morir la flora, esta se queda almacenada en el suelo sobre el que crecía, y con el paso de los años acaba por convertirse en carbón y petróleo. El ser humano, con su acción de tala masiva de bosques y quema de combustibles fósiles, está liberando a la atmósfera todo el CO₂ que se estuvo almacenando durante miles de años en tan solo unas pocas décadas y eliminando la flora capaz de almacenarlo en su interior, favoreciendo así que más dióxido de carbono esté presente en la atmósfera mediante procesos no naturales y desbalanceados (Field, C., *et al.*, 2004)

En cuanto al cambio climático, no se trata de un fenómeno que no haya tenido lugar con anterioridad en el planeta. Al contrario, ha ocurrido anteriormente en varias ocasiones, y es posible saberlo gracias al estudio de las burbujas de aire que quedan atrapadas en el hielo del Ártico, ya que muestran la composición que tenía la atmósfera en el pasado; o la perforación de los suelos oceánicos para estudiar las conchas de antiguos organismos marinos y buscar pistas sobre épocas pasadas.

Gracias a estas técnicas, se ha podido saber que entre los siglos XV y XIX la temperatura del planeta era 1 o 2°C más fría que actualmente. También se ha podido concluir, que en los últimos 400.000 años ha habido diferentes etapas marcadas por temperaturas más bajas, conocidas como glaciaciones, y etapas de temperaturas más altas, llamadas interglaciares. La variación entre estos dos períodos ronda los 100.000 años, siendo el período glacial más predominante que el interglaciar. Las variaciones se atribuyen principalmente a los llamados Ciclos de Milankovitch, que hacen referencia a las suaves variaciones en que la Tierra se orienta hacia el Sol, cambiando la forma en que el planeta se calienta (Petit, J., *et al.*, 1999).

Además de los Ciclos, el CO₂ es un factor diferenciador en calentamiento del planeta como ya se ha explicado. En las épocas correspondientes a las glaciaciones, el CO₂ representaba aproximadamente un 0,018% de la atmósfera, mientras que alcanzaba registros de 0,028% – 0,030% en las etapas interglaciares (Petit, J., *et al.*, 1999). En la actualidad, la atmósfera tiene una composición de CO₂ del 0,038%, lo que indica que se está sobrepasando el nivel de este gas esperado para una época interglaciar. Es por ello que se hace necesario establecer medidas que controlen las emisiones de dióxido de carbono ya que las consecuencias para la vida en el planeta resultan imprevisibles.

Con el comportamiento continuo de estas prácticas pueden observarse algunas de las consecuencias sobre los ecosistemas más vulnerables.

La erosión del suelo y la consecuente disminución del rendimiento de las cosechas son uno de los principales desafíos a los que se enfrenta la agricultura. Se observará una recomposición de las especies animales y vegetales y en la distribución geográfica en los bosques.

Por otro lado, las zonas costeras serán más vulnerables a la pérdida de costa por el deshielo de los polos, las áreas protegidas se verán desequilibradas por la irrupción de especies invasoras en busca de nuevos hábitats más favorables

Luego, los recursos hídricos se volverán más volátiles, aumentando así la frecuencia de sequías e inundaciones, impactando directamente en los cultivos y perjudicando, mayormente, a los países más pobres, provocando hambrunas. La salud humana tendrá que hacer frente a nuevos ambientes de temperaturas cada vez más extremas y enfermedades originarias de otras zonas geográficas, como el paludismo o el dengue. Por último, las temperaturas extremas cambiarán la oferta y demanda de energía, creando nuevos modelos energéticos.

El dióxido de carbono es el gas más conocido en lo que a contaminación del medio y daños a la salud se refiere. Sin embargo, no es el único elemento en suspensión en el aire que dificulta y ocasiona daños directos al ser humano. De hecho, en espacios abiertos la incidencia del CO₂ sobre la salud humana no es de gran incidencia, aunque, por el contrario, la Organización Mundial de la Salud toma el material particulado PM_{2,5}, PM₁₀, ozono, dióxido de azufre y dióxido de nitrógeno como partículas en suspensión que tienen un impacto más negativo en la salud humana.

En esta dirección, las partículas en suspensión hacen referencia a elementos orgánicos e inorgánicos que se encuentran presentes en el aire por fuentes naturales y artificiales. Se distinguen las partículas más grandes, a pesar de ser menores de diez micras, y denominadas PM₁₀, que provienen de procesos mayormente mecánicos, como el polvo que se desprende de las obras de construcción, o bien de residuos de otro proceso, como las cenizas. Estas partículas también son conocidas como torácicas, debido a que son capaces de llegar hasta las vías respiratorias más profundas.

Por otro lado, se encuentran las partículas menores, el PM_{2,5}, menores de 2,5 micras, y que incluye partículas capaces de penetrar en las zonas de intercambio de gases del pulmón; y las partículas ultrafinas, de 100 nanómetros que son capaces de introducirse en el torrente sanguíneo. Estas en general, se originan de procesos químicos posteriores a una combustión o mediante la interacción con otros gases y partículas en la atmósfera.

Actualmente, existe poca evidencia de cuál es el valor límite recomendado de exposición a este material particulado debido a que sus efectos sobre la salud comprenden un amplio espectro, aunque se hace especial hincapié en dañar los sistemas respiratorio y cardiovascular dependiendo del estado de salud y edad del individuo. Sin embargo, en varios estudios realizados por la Sociedad Americana del Cáncer y la universidad de Harvard sobre seis ciudades, lograron distinguir estrechas relaciones entre una exposición prolongada al PM_{2,5} y la mortalidad (HEI, 2000). La exposición media histórica a la que se estaban sometiendo esas ciudades era de 18 micras por metro cúbico, cuando la Organización Mundial de la Salud (OMS) recomienda una exposición anual no superior a las 10 micras.

La OMS ofrece una serie de guías de cuatro niveles para PM₁₀ y PM_{2,5} en exposiciones prolongadas, es decir, concentraciones medias anuales, para reducir significativamente la mortalidad que acarrear dichas partículas.

Así, de mayor a menor nivel de exposición, establece: 70 µg/m³ de PM₁₀ y 35 µg/m³ de PM_{2,5} como objetivo intermedio uno; el objetivo intermedio dos establece 50 µg/m³ de PM₁₀ y 25 µg/m³ de PM_{2,5} para reducir los niveles de muerte prematura en aproximadamente un 6%, además de otros beneficios para la salud; en tercer lugar, dicta 30 µg/m³ de PM₁₀ y 15 µg/m³ para PM_{2,5} y lograr así una reducción del nivel de mortalidad del 6% comparado con el objetivo intermedio dos.

Finalmente, el umbral máximo que marca la OMS en su Guía de Calidad del Aire (GCA) es de 20 µg/m³ para el PM₁₀ y 10 µg/m³ para el PM_{2,5} (Organización Mundial de la Salud, 2005).

La OMS también establece un umbral diario de 24 horas en su Guía de Calidad del Aire, ya que considera que las exposiciones breves al material particulado también tienen una incidencia negativa en la salud humana, y que la media histórica anual puede no reflejar episodios de breves, pero altas exposiciones.

En efecto, en varios estudios realizados en Europa y Estados Unidos, se descubrieron efectos de mortalidad a corto plazo con PM₁₀ del 0,62% y 0,46% por 10 µg/m³ respectivamente (Katsouyanni, K. *et al.* 2001; Samet, JM., *et al.* 2000).

Paralelamente, se realizaron los mismos estudios en Asia y otras ciudades, arrojando datos muy similares, como 0,49% por 10 µg/m³, lo que parece evidenciar que los efectos del PM₁₀ son los mismos en países más y menos desarrollados (HEI International Oversight Committee, 2004).

Además, se confirmó que por cada aumento de 10 µg/m³ la mortalidad aumenta en un 0,50%, por lo que unos niveles de 150 µg/m³ aumentan, aproximadamente, en un 5% la mortalidad diaria. Es por tanto que las guías que establece la OMS para reducir las concentraciones partan de los 150 µg/m³.

El primer objetivo a corto plazo parte de los ya mencionados 150 µg/m³ para PM₁₀ y 75 µg/m³ para PM_{2,5}, que inducen a un incremento del 5% en la mortalidad diaria sobre el límite marcado por la GCA; el segundo objetivo intermedio establece 100 µg/m³ de PM₁₀ y 50 µg/m³ de PM_{2,5}, para reducir la mortalidad a corto plazo al 2,5% respecto a la GCA; en tercer lugar, 75 µg/m³ de PM₁₀ y 37,5 µg/m³ de PM_{2,5} como tercer objetivo intermedio y reducir la mortalidad a corto plazo respecto a la GCA en un 1,2%; finalmente el valor límite recomendable que establece la OMS en su Guía de Calidad del aire es de 50 µg/m³ para PM₁₀ y 25 µg/m³ para PM_{2,5}.

Las partículas ultrafinas (UF) son aquellas que tienen un tamaño de 100 nanómetros o 0,1 micras de diámetro, y recientemente están despertando en la comunidad médica y científica un especial interés. Sin embargo, todavía no se dispone de información ni estudios suficientes sobre su concentración y consecuente respuesta en la salud humana, por lo que la OMS no ha realizado ninguna recomendación al respecto.

Además del material particulado, el ozono (O₃) también se encuentra bajo la lupa de la OMS, quien hasta el año 2000 establecía el umbral máximo recomendado de exposición en 120 µg/m³ en una media de ocho horas.

El ozono se origina en la atmósfera mediante la combinación de reacciones fotoquímicas cuando hay luz solar en presencia de otros contaminantes, llamados precursores, como son los óxidos de nitrógeno (NO_x) y compuestos orgánicos volátiles,

característicos por su facilidad de convertirse en gases o vapores, y conocidos como VOC o COV. El ozono desaparece cuando entra en contacto con el NO_2 , gas en el que se profundizará más adelante, y acaba depositándose en el suelo.

En conclusión, se ha demostrado que existe una correlación entre el ozono y otros oxidantes fotoquímicos, por lo que las mediciones de las concentraciones de ozono se suelen basar en la presencia de los gases precursores (Organización Mundial de la Salud, 2005).

Desde el año 2000 hasta la actualidad, no se han registrado nuevos estudios que profundicen en su naturaleza y los efectos que causa en la salud. Sin embargo, se han realizado numerosos estudios epidemiológicos de series temporales que establecen una pequeña pero suficiente relación entre las concentraciones de ozono y la tasa de mortalidad diaria, independientemente del material particulado.

Así mismo, considerando que otros estudios han podido demostrar que los efectos perjudiciales de este gas tienen lugar cuando las concentraciones se encuentran por debajo del umbral definido de $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$, se decidió bajarlo hasta los $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de media máxima diaria de ocho horas.

Ciertamente, hay datos que parecen indicar que la exposición al ozono en períodos largos puede resultar en enfermedades crónicas, sin embargo, no se dispone de la evidencia suficiente para hacer alguna afirmación de este tipo, por lo que no se ha fijado ningún umbral máximo anual (Organización Mundial de la Salud, 2005).

Las concentraciones de fondo de ozono varían a lo largo del espacio y del tiempo, aunque suelen alcanzar los $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de media diaria de ocho horas por motivos antropogénicos o naturales, como VOC o el ozono troposférico que logra llegar a cotas más bajas, lo que indica que los valores guía se pueden superar por condiciones de la naturaleza. Cuando las concentraciones rondan valores en torno a $240 \mu\text{g}/\text{m}^3$ los efectos sobre la salud son significativos, como ya se ha demostrado en estudios de campo y de laboratorio. La función pulmonar disminuye tanto en adultos sanos como en asmáticos, además de inflamar las vías respiratorias. En niveles de $240 \mu\text{g}/\text{m}^3$ las muertes que se le pueden atribuir al ozono son de un 5% a un 9% más que con el nivel establecido en $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Para niveles de $160 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de exposición de media diaria de ocho horas también hay efectos importantes en la salud, las vías respiratorias presentan inflamaciones según un estudio realizado en jóvenes adultos que practicaban deporte con regularidad, la salud de los niños también se ve afectada, y la mortalidad diaria se estima de un 3% a un 5% mayor en comparación con el nivel guía (Organización Mundial de la Salud, 2005).

En consecuencia, la OMS fija en $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ la exposición al ozono en su Guía de Calidad del Aire, donde estima éste como un nivel seguro a pesar de que exposiciones de media de ocho horas menores también puedan derivar en algunos daños.

En este sentido, el dióxido de nitrógeno (NO_2) ejerce numerosas funciones en su ambiente. En primer lugar, estudios realizados en personas y animales encuentran que exposiciones cortas a $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ implican importantes consecuencias sobre la salud. Secundariamente, se utiliza como marcador de otros gases que se originan por combustión, especialmente del tráfico por carretera. Es un gas que está muy relacionado con el óxido nítrico NO , el benceno, el material particulado y las partículas ultrafinas, por lo que resulta complicado aislarlo y ver qué efectos concretos tiene sobre la salud. Por otro lado, la mayoría de NO_2 que se encuentra en el aire proviene del NO , pero debido a su facilidad de oxidarse y a la acción del ozono, rápidamente pasa a ser NO_2 . Así mismo, el dióxido de nitrógeno, al estar presente con hidrocarburos y luz ultravioleta, favorece la creación de ozono en la troposfera y de $\text{PM}_{2.5}$.

A partir de lo anterior, resta la incógnita de cuál es el nivel guía que se debe establecer para este contaminante, debido a la dificultad que atañe aislarlo de otros componentes. La OMS todavía no cuenta con una base de información sólida que permita establecer cuál debe ser el nivel anual más recomendable. Mediante estudios epidemiológicos se ha conseguido saber que la bronquitis en niños es más frecuente en aquellos lugares donde la concentración anual de NO_2 es creciente, además de que la función pulmonar disminuye en medida en que las concentraciones de NO_2 aumentan.

Queda expuesto que, el NO_2 es un gas que perjudica gravemente la salud, aunque no se puede establecer con exactitud hasta qué punto el daño es causado exclusivamente por el dióxido de nitrógeno o por los otros contaminantes que lo acompañan. Como resultado la OMS hasta el momento no ha decidido rebajar el umbral y lo deja en un valor prudente de $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de media anual, es decir, para exposiciones prolongadas.

En cuanto a las exposiciones breves, varios estudios han determinado graves impactos sobre la salud para niveles de $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ durante una hora. Aunque los registros más bajos en los que se ha visto un efecto directo en asmáticos han sido de una exposición a $560 \mu\text{g}/\text{m}^3$ durante una hora, y la respuesta bronquial en asmáticos comienza a partir de los $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ por hora. Como consecuencia, la OMS establece una exposición máxima recomendada de $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en el período comprendido de una hora (Organización Mundial de la Salud, 2005).

Finalmente, el dióxido de azufre (SO_2) tiene sus efectos en asmáticos en tan solo 10 minutos de contacto con el gas, mostrando alteraciones en la respiración y sistema pulmonar (Organización Mundial de la Salud, 2005). De este modo, la OMS fija en $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ su recomendación de exposición máxima en una duración media de 10 minutos. No se estiman recomendaciones de una hora por la dificultad de establecer una causa directa y aislada de la presencia del SO_2 en el aire.

Para exposiciones prolongadas, se establece un marco de 24 horas. En el pasado, las consecuencias derivadas de las concentraciones de este gas, como la mortalidad, morbilidad o la función pulmonar se basaban en estudios epidemiológicos en que la población también estaba expuesta a otros contaminantes, esencialmente con el material particulado. Este hecho llevó a establecer en $125 \mu\text{g}/\text{m}^3$ el umbral máximo recomendado para 24 horas.

Entre los últimos estudios, destacan los realizados en América del Norte. Por un lado, las concentraciones en 24 horas del SO_2 estaban significativamente relacionadas con las tasas de mortalidad de 12 ciudades canadienses, a pesar de que se alcanzaban concentraciones medias de $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Por otro lado, la Asociación Americana del Cáncer encontró en un estudio una relación entre el SO_2 y la mortalidad en zonas metropolitanas de Estados Unidos para niveles de concentración media de $18 \mu\text{g}/\text{m}^3$, siendo $85 \mu\text{g}/\text{m}^3$ la concentración media más alta registrada (Organización Mundial de la Salud, 2005).

Estos estudios evidencian la dificultad que reside en el estudio de esta sustancia, puesto que resulta complicado confirmar que se está estudiando únicamente los efectos del SO_2 y no del SO_2 junto con otras partículas. Por ejemplo, en Alemania y Países Bajos, a lo largo de una década se observó cómo disminuían las concentraciones de dióxido de azufre seguidas de la mortalidad. Sin embargo, no fue posible establecer una causalidad

entre ambas, y se atribuyó el descenso en la mortalidad a otros componentes como el material particulado (Buringh, E., *et al.* 2000). La OMS, como consecuencia, prefiere mantener una postura prudente y establecer el límite en $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de exposición de media en 24 horas

Por las dificultades que se han explicado en el control y medición de este gas, la OMS, en su Guía de Calidad del Aire, establece unos umbrales escalonados de recomendación para llegar al límite considerado. Para las exposiciones de media de 24 horas, sugiere un umbral de $125 \mu\text{g}/\text{m}^3$, seguido de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, para finalmente llegar al umbral de recomendación, $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En cuanto a las exposiciones de media de 10 minutos, la OMS no especifica una serie de recomendaciones escalonadas, y sigue fijando su umbral de recomendación en $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Recientemente, como consecuencia de la escalada de problemas derivados de la quema de combustibles fósiles, deforestación, el aumento de CO_2 en la atmósfera y de la pasividad de los gobiernos, miles de jóvenes de todo mundo están tomando las riendas, liderados por la activista de 16 años Greta Thunberg, y decidieron manifestarse y reivindicar medidas reales que respondan a los problemas y retos actuales en materia medioambiental el 15 de marzo de 2019. La huelga global tuvo lugar en más de mil ciudades de 89 países, mientras que en España se celebraron 45 concentraciones en 43 ciudades entre las que destacan como Madrid, Córdoba, Barcelona, Soria o Santander. Por último, la activista sueca quiso dar un golpe sobre la mesa y lanzó un mensaje a sus mayores: “Ustedes dicen que aman a sus hijos por encima de todo, pero les están robando su futuro ante sus propios ojos”.

La creciente preocupación por los problemas y consecuencias que acarrea el actual ritmo de contaminación a nivel global puede resultar comprensible si se observa desde la óptica del escepticismo que se viene dando en paralelo a la preocupación por el cambio climático. Por un lado, se encuentra la concienciación por un futuro más verde y sostenible que representa el Tratado de París, y por otro, se encuentra el escepticismo por el mismo, abanderado por el presidente de los Estados Unidos Donald Trump, quien abandonó este pacto (Redacción BBC Mundo, 2017).

La salida del gobierno de los Estados Unidos activó las alarmas internacionales, ya que el país es uno de los mayores contaminantes del mundo. Para

mostrar su magnitud en el mundo en aspectos medioambientales, cabe recalcar que desde 1850, el 27% de todas las emisiones globales de CO₂ tienen origen en el país americano.

En la actualidad, acorde a los datos emitidos por la Base de Datos de Emisiones para la Investigación Atmosférica Global (EDGAR), significa que cada habitante emite 16,39 toneladas de dióxido de carbono. Además del CO₂, Estados Unidos ocupa el cuarto lugar en emisiones de metano a la atmósfera terrestre, con 499 millones de toneladas, por detrás de China (1.752), India (636) y Rusia (545).

En lo que a consumo eléctrico se refiere, el cual se genera de la quema de combustibles fósiles y gas natural en mayor medida, y de fuentes de energía renovables y energía nuclear con menor frecuencia, cada estadounidense consumió 12,98 kilovatios por hora en 2013, mientras que la media mundial de ese año fue de 3,10 kilovatios por hora (Redacción BBC Mundo, 2017).

Finalmente, volviendo al objetivo del Tratado de París de no aumentar la temperatura del planeta en más de 2 grados centígrados, Estados Unidos es el país que más ha contribuido a calentar la Tierra según un estudio elaborado por la Universidad de Berkeley. El país de Donald Trump habría calentado el planeta en 0,151°C, posicionándose en cabeza de la lista y seguido de China (0,063°C), Rusia (0,059°C), Brasil (0,049°C) e India (0,047°C).

Sin embargo, en la actualidad, se cuenta ya con medidas de tipo preventivo e inmediatas que buscan frenar el ritmo actual de contaminación a pesar de las manifestaciones que se puedan celebrar. Entre estas medidas se pueden destacar las medidas económicas preventivas. Estas, cuentan con grandes apoyos debido a que tienen costes muy bajos y, en contrapartida, obtienen resultados significativos, ya que por un lado reducen la emisión de gases de efecto invernadero, y por otro, favorecen que una industria sea más competitiva. Son medidas que deben contar con el apoyo del público, es necesario una base pública, concienciada que practique un uso responsable de la energía y apoye la adopción de estas medidas, pues si fuesen únicamente de iniciativa de los gobiernos, acabarían en fracaso.

Actualmente, destacan dos frentes de medidas preventivas para luchar contra el calentamiento global, que son la disminución de emisión de gases de efecto invernadero como el CO₂ y favorecer la absorción del mismo por medios naturales. Así, se fomenta la eficiencia energética y la disminución en el consumo de combustibles fósiles en favor

de otros menos contaminantes, el avance tecnológico y la repoblación de los bosques con objetivo de que actúen de sumideros. Para lograr estos objetivos y facilitar el cambio, se acude a los impuestos sobre el carbono, la creación de mercados donde se intercambien derechos de emisiones, se eliminan los subsidios por quema de combustibles fósiles y se elaboran programas de reforestación. Son medidas de tipo económico, o incentivos, que tienen como objetivo generar un impacto o cambio en una tendencia mediante la alteración de los precios.

No obstante, las medidas que más están frenando el calentamiento del planeta son de tipo administrativas, que establecen límites a las actividades sin la alteración en los precios. Son medidas que por lo general son más costosas y menos eficientes que los incentivos económicos. Por ello es necesario una generalización en el uso de medidas preventivas, ya que impulsan el crecimiento y la eficiencia y además frenan los daños ambientales. Su implantación debe ser gradual y no instantánea, para evitar sobrecostes de transición o ajuste. Por ejemplo, imponer un impuesto al carbono demasiado alto y que las industrias que se apoyan en este elemento tengan que hacer grandes reestructuraciones para volver a ser competitivas. Lo ideal sería comenzar con tasas bajas e ir la incrementando con el paso de los años para facilitar la readaptación del sector en el largo plazo.

Por la parte tecnológica, se estima necesario que se desarrollen tecnologías que logren funcionar sin la necesidad de carbono. Para llegar al punto de procesos que no emitan carbono, se debe facilitar la transmisión de conocimientos y eliminar las barreras que lo restringen.

Resumiendo, se necesitan políticas económicas que se apliquen gradualmente en función de las necesidades de cada nación para dar cumplimiento a los acuerdos internacionales.

Por su parte, el Gobierno de España, a través de su Ministerio de Agricultura y Pesca y Alimentación y Medio Ambiente, elabora periódicamente un informe de calidad del aire donde hace un balance de cómo los gases de efecto invernadero y otras partículas han ido evolucionando. Además, tras el análisis de cada uno de los componentes, se impone unos objetivos a cumplir seguidos de las medidas que va a adoptar para su cumplimiento.

Entre los objetivos que se enuncian, se encuentran: ofrecer garantías para el cumplimiento de la legislación relativa a la calidad del aire, tanto en el ámbito nacional, europeo e internacional; poner especial foco en aquellos contaminantes identificados como más dañinos para la salud y los ecosistemas y paliar sus efectos mediante una batería de medidas de carácter general; impulsar la concienciación de la ciudadanía mediante el fomento de una información sencilla de comprender y de fácil acceso.

Y, finalmente, continuar con la implantación de medidas en el marco de cumplimiento con las directrices que marca la comunidad europea, contenidas en la Directiva (UE) 2016/2284; y profundizar en el alcance y efectividad de las acciones que se toman para frenar los niveles de ozono, que con frecuencia han superado los niveles límite considerados saludables.

Una vez fijados los objetivos que se quieren perseguir, es necesaria la definición de medidas de acción y contención. El Ministerio de Agricultura y Pesca y Alimentación y Medio Ambiente, en su informe considera una batería de 52 medidas para lograr la consecución de los objetivos expuestos. Las medidas se pueden clasificar en función del ámbito al que hacen referencia.

Consideran siete medidas para mejorar la información sobre la calidad del aire, una de fiscalidad ambiental, seis de mejora de la movilidad, tres relativas a la investigación, dos para reducir el amoníaco emitido de actividades como la agricultura y la ganadería, una medida para el sector residencial, cinco medidas orientadas a reducir las emisiones del sector industrial, dieciséis medidas a aplicar al transporte rodado, cuatro para el transporte aéreo, tres de transporte ferroviario y cuatro para los puertos marítimos (Ministerio de Agricultura y Pesca y Alimentación y Medio Ambiente, 2017).

Por otra parte, se observa que, con el uso generalizado de los *smartphones*, el ministerio tiene planeado la elaboración de una aplicación móvil que informe de la calidad del aire en tiempo real de la zona que desee el usuario. También tiene planeado la implementación de puntos de carga eléctricos para vehículos, y así reducir la quema de combustibles fósiles; fomentar el uso de la bicicleta como ya se hace en otras ciudades europeas, en el caso de Ámsterdam; facilitar el acceso al transporte público en las zonas colindantes a la periferia urbana mediante, por ejemplo, ampliando el alcance de las redes de corta y media distancia; o la actualización e implantación, tras los estudios más recientes, de nuevos los valores límite de emisión en las industrias.

CAPÍTULO II. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

CAPÍTULO II. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Para la elaboración del presente estudio, se han considerados trabajos de investigación realizados por otros autores. A continuación, se realizará un breve análisis y explicación del contenido de sus obras y en qué va a diferir el presente trabajo.

Destaca Contaminación Atmosférica, Cambio climático y Salud (Ballester, 2005), que introduce los contaminantes atmosféricos del aire y las fuentes de las que provienen, para posteriormente ver el impacto que tienen en la salud humana. Continúa con las tendencias y comportamientos de estos contaminantes atmosféricos e introduce algunas medidas adaptativas que se pueden adoptar, y explica posteriormente las repercusiones de estas medidas en el cambio climático y bienestar de la población. Finalmente, se elabora una serie de puntos donde se manifiesta la necesidad de seguir trabajando sobre determinados aspectos.

Sigue Efecto Invernadero, Calentamiento Global y Cambio Climático: Una perspectiva desde las Ciencias de la Tierra (Caballero, *et al.* 2007). Las autoras del artículo explican y dan su perspectiva sobre los fenómenos del efecto invernadero, calentamiento global y cambio climático desde la perspectiva de su disciplina, las Ciencias de la Tierra.

De igual modo, Consecuencias del cambio climático (Comisión Europea, 2012), enuncia los resultados del cambio climático que se vienen dando en los últimos años. Destaca el deshielo de los polos y el aumento del nivel del mar en que derivan o la intensificación de condiciones meteorológicas más extremas. Además, introduce los efectos que ya ha tenido el cambio climático sobre Europa y sobre países en desarrollo. Finalmente, concluye con los peligros para la salud humana y naturaleza, junto con sus costes económicos.

Por otro lado, en Análisis Multivariante (Cuadras, C., 2017) se explican los diferentes métodos que existen para describir e interpretar conjuntamente los datos que provienen de distintas variables estadísticas.

Seguidamente, Análisis de Series Temporales (Mauricio, JA., 2017), introduce en qué consiste una serie temporal para continuar profundizando en los diferentes modelos y sus aplicaciones. Se introducen y explican, además, los modelos univariantes, multivariantes estacionarios y multivariantes no estacionarios, con las consideraciones que el autor estima necesarias.

Por parte de un organismo nacional, se encuentra el Plan Nacional del AIRE 2017 – 2019 (Plan Aire II), (Ministerio de Agricultura y Pesca y Alimentación y Medio Ambiente, 2017). En este plan, se analiza inicialmente el marco legislativo de la calidad del aire y los resultados del anterior plan del aire. Posteriormente, se pasa a una evaluación de la calidad del aire poniendo foco en el dióxido de nitrógeno, el dióxido de azufre, las partículas PM_{2,5} y PM₁₀ y el ozono, junto con sus proyecciones futuras a la atmósfera. Finalmente, se establecen una serie de medidas y objetivos para mitigar el impacto de los contaminantes y acaba con el establecimiento de un seguimiento de este nuevo plan.

Siguiente, 10 datos sobre el cambio climático y la salud (Organización Mundial de la Salud, s.f) enumera, en una serie de 10 puntos, cómo afecta negativamente el cambio climático a las personas; por ejemplo, refleja las sequías o inundaciones que dejan a los campos de cultivo en condiciones no aptas para su explotación, con las consecuentes hambrunas. El documento prioriza el impacto sobre los países en vías de desarrollo, los cuales son más vulnerables a condiciones meteorológicas adversas y situaciones de crisis.

Continúan las Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, dióxido de nitrógeno y dióxido de azufre, (Organización Mundial de la Salud, 2005). En ella, se realiza una revisión de la literatura que se ha publicado desde la anterior guía de en el año 2000 en lo relativo a los contaminantes contenidos en el título. Tras la nueva información recogida y estudiada, se establecen y justifican nuevos niveles máximos de recomendación de exposición a los contaminantes.

Paralelamente, El deshielo en la Antártida es tres veces mayor que hace una década (Pierre – Louis, 2018) denuncia la gravedad del deshielo vertiginoso que se viene dando en la Antártida en los últimos años con el fin de concienciar sobre este fenómeno.

Para concluir, se encuentra el impacto del cambio climático en la infancia en España (Unicef, 2017). En él se expone una panorámica de en qué momento se encuentra la humanidad respecto al cambio climático y las principales vías de acción para frenarlo mediante acuerdos internacionales. Posteriormente, profundiza en cómo afecta el cambio climático Posteriormente, profundiza en cómo afecta el cambio climático a los grupos más vulnerables, especialmente en la infancia, poniendo foco en España, para finalizar con los beneficios que se podrían derivar de la lucha contra el cambio climático en los niños y niñas del territorio español.

De la revisión bibliográfica que se ha realizado, se considera que puede resultar interesante realizar un estudio de la naturaleza de las partículas $PM_{2,5}$ cuando están en presencia de otros contaminantes y en función de la climatología, puesto que este contaminante resulta ser de los que más daños provoca en la salud y no existen medidas generalizadas a adoptar para reducir su peligrosidad.

**CAPITULO III. MÉTODOLOGÍA PARA CONTROLAR LOS
NIVELES DE PM_{2.5}**

**MÉTODOLOGÍA PARA
CONTROLAR LOS NIVELES DE
PM_{2.5}**

3.1 FUNDAMENTOS TEÓRICO-MATEMÁTICOS

Debido a la interrelación existente entre de diferentes sustancias contaminantes, además de determinadas variables meteorológicas, en este capítulo se realizará una formulación del problema matemático considerando estos elementos.

En el marco de desarrollo de las partículas $PM_{2,5}$ se cuenta con los siguientes datos, que conforman el entorno que envuelve la problemática contaminante a la ciudad de Madrid.

Madrid alberga 3,1 millones de habitantes en 2016, con una superficie de 604,3 km^2 y a una altitud sobre el nivel del mar de 667 metros. Su clima se puede considerar una transición entre semiárido frío y mediterráneo, con precipitaciones escasas en verano y moderadas el resto del año.

Cuenta con estaciones de medición de calidad del aire repartidas por su geografía para controlar los niveles de partículas contaminantes. Estas estaciones no realizan mediciones de todas las partículas por igual y su tiempo en funcionamiento ha variado a lo largo del tiempo. Varias estaciones han sido dadas de alta o de baja como se muestra en la Ilustración 31. Además de estaciones de medición de contaminantes, también hay presentes estaciones meteorológicas.

Las estaciones de medición de partículas, gracias a los sensores y analizadores que tienen instalados, controlan y vigilan los niveles de contaminación de la ciudad. Las estaciones se dividen en tres tipos en función de su localización dentro de la ciudad. Con las estaciones urbanas de fondo se busca mostrar representatividad de la exposición de la población, en la actualidad, hay nueve de ellas. Siguen las estaciones de tráfico, de las cuales hay doce, y están situadas de tal manera que miden únicamente la incidencia contaminante del tráfico de vehículos. Finalmente, se han instalado tres estaciones suburbanas, localizadas en la periferia, y donde los niveles de ozono son mayores.

Por otro lado, las estaciones meteorológicas son de dominio de la Agencia Estatal de Meteorología. Tienen como finalidad la estimación y determinación de variables meteorológicas para realizar análisis, predicciones y avisos meteorológicos. Para la ciudad de Madrid, cuenta con cuatro estaciones de medición, localizadas en Cuatro Vientos, Retiro, Ciudad Universitaria y la zona del aeropuerto Madrid-Barajas Adolfo

Suárez. Todas ellas recogen datos como temperatura, presión, horas de luz solar, humedad, viento y precipitaciones.

Sin más, para el correcto estudio de la naturaleza de las partículas $PM_{2,5}$ es necesario el cumplimiento de unos requisitos:

- La clasificación de Madrid en zonas de medición de calidad del aire.
- Cada estación de medición recoge datos en las mismas condiciones que las otras estaciones.
- Se realizan mediciones a lo largo del día en un intervalo de 60 minutos para cada tipo de sustancia y llegar a un dato medio de concentración.
- Los datos recogidos en distintas estaciones para una misma partícula se expresan en las mismas unidades de medida según el medio tecnológico que se utilice.
- Los datos deben ser de fácil acceso y entendimiento para todo el público.

Considerando todos los elementos anteriores, el problema matemático busca construir un modelo econométrico que permita conocer los efectos de las variables meteorológicas y otras provenientes de la industria y el transporte sobre la sustancia contaminante $PM_{2,5}$, con el objetivo de poder establecer políticas coherentes para minimizar sus efectos.

Conocido el problema matemático a resolver se definirán conjuntos, índices y variables que intervienen en el proceso de modelación.

Definición de conjunto

S : Conjunto que define todas las estaciones de mediciones con elemento s . $S \subset \mathbb{N}$

K : Conjunto de estaciones de medición dadas de alta a partir del año 2011 con elemento genérico k . $K \subset S$.

D : Conjunto de todos los distritos de la ciudad de Madrid con elemento genérico d . $D \subset \mathbb{N}$.

K_d : Conjunto de todas las estaciones de medición dadas de alta para un distrito dado por d .

Índice

i : Este índice describe la i -ésima observación de una variable determinada. $i = 1 \dots, n$ donde n es el tamaño de la muestra.

j : Este índice describe la j -ésima variable. $j = 1, \dots, J$ donde J es el total de variables independientes.

Definición de variables

Y : Variable dependiente que describe a la sustancia contaminante $PM_{2,5}$ dada en microgramos por metro cúbico ($\mu g/m^3$).

X_1 : Variable independiente que define a la sustancia contaminante NO dada en $\mu g/m^3$.

X_2 : Variable independiente que define a la sustancia contaminante NO_2 dada en $\mu g/m^3$.

X_3 : Variable independiente que define la sustancia contaminante PM_{10} dada en $\mu g/m^3$.

X_4 : Variable independiente que define la sustancia contaminante tolueno dada en $\mu g/m^3$.

X_5 : Variable independiente que define la sustancia contaminante etilbenceno dada en $\mu g/m^3$.

X_6 : Variable independiente que define el fenómeno atmosférico viento dado en kilómetros por hora (km/h).

X_7 : Variable independiente que define el fenómeno atmosférico lluvia dado en litros por metro cuadrado (l/m²).

X_8 : Variable independiente que define el fenómeno meteorológico temperatura dado en grados centígrados ($^{\circ}C$).

u : Término de perturbación.

De este modo, la estimación de la variable dependiente $PM_{2,5}$ (Y) se realiza en base a la información ofrecida por múltiples variables. Además, el modelo estimado permite conocer el impacto de cada variable independiente sobre la concentración de partículas $PM_{2,5}$ en el aire.

De este modo, el modelo general de regresión lineal que explican el comportamiento de la variable dependiente se define como:

Modelo econométrico

$$d \in D \quad k \in K_d$$

$$Y = B_0 + B_1 X_1 + B_2 X_2 + \dots + B_9 X_9 + u \quad (3.1)$$

donde

B_j : Coeficientes del modelo a estimar.

La estimación del coeficiente del modelo se soporta en la búsqueda de la diferencia mínima entre la suma de los cuadrados de los valores que se observan y los que se estiman, es decir, que la varianza residual sea mínima.

Como consecuencia, las variables explicativas que se eligen deben tener una valoración numérica, deben ser cuantificables. Además, deben ser coherentes, es decir, debe existir una justificación de su utilización, y seguir una relación lineal con la variable dependiente.

En definitiva, en línea con lo planteado, el modelo que se ha empleado se muestra de la siguiente manera:

Como se puede observar, los coeficientes (b) se encuentran multiplicando a las variables explicativas. Son estos coeficientes los que indican en qué dirección y con cuánta intensidad se va a ver modificada la variable dependiente (PM_{2,5}) por cada cambio unitario de las variables explicativas.

Hipótesis de un modelo de regresión lineal múltiple

Hasta ahora, todo lo planteado no puede ser de aplicación si no se cumplen un conjunto de hipótesis para un modelo de regresión.

Linealidad: La variable dependiente depende de forma lineal de las variables independientes, como se muestra a continuación:

$$Y = B * X + U \quad (3.3)$$

Homocedasticidad: Todas las perturbaciones deben tener la misma varianza:

$$V(u_i) = \sigma^2 \quad (3.4)$$

Independencia entre las perturbaciones: Dichas perturbaciones tienen que ser independientes entre sí,

$$E(u_i \cdot u_j) = 0, \forall i \neq j \quad (3.5)$$

Normalidad de las perturbaciones: Las perturbaciones deben seguir una distribución normal

$$U \approx N(0, \sigma^2) \quad (3.6)$$

No colinealidad: Se considera que la relación lineal entre el conjunto de variables independientes no sea alta o perfecta. En este sentido la multicolinealidad incrementa la varianza de los estimadores, afectando negativamente a la precisión del modelo, haciéndolo no lineal. Existe multicolinealidad si las variables explicativas se pueden expresar como una combinación lineal, es decir:

$$\alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2 + \dots + \alpha_k x_k + \alpha_0 = 0 \quad (3.7)$$

La existencia de multicolinealidad es fácilmente detectable. Existe un problema de multicolinealidad si el determinante de la matriz de varianzas-covarianzas es cercano a cero; o bien calculando el R^2 de cada variable con el resto de las variables, siendo la variable con mayor R^2 la problemática. De este modo, se permite localizar las variables que están generando un problema de multicolinealidad y se pueden excluir del modelo.

El supuesto que las perturbaciones sigue una distribución normal puede ser analizado utilizando un histograma de residuos y observar su distribución, o bien emplear un test de Kolmogorov Smirnov y comprobar el valor que toma el p-value, para aceptar o rechazar la hipótesis de normalidad.

Finalmente, por el supuesto de homocedasticidad la variabilidad de los residuos no tiene relación con las variables explicativas. Es cierto que la variabilidad de los residuos depende de las variables explicativas, pero como estas últimas están altamente relacionadas con la variable dependiente, se puede emplear un gráfico que muestre la distribución de los valores pronosticados frente los residuos al cuadrado. Si los puntos tienen tendencia a estar localizados en un área, se trata de un caso de falta de homocedasticidad.

Una alternativa a la falta de homocedasticidad es transformar la variable dependiente a logaritmo como se explica en (Rojo, 2007).

Paralelamente, se van a emplear distintas metodologías de validación del modelo matemático elaborado.

En primer lugar, cabe mencionar la prueba t-student, según la cual es posible determinar aquellas variables explicativas que resultan estadísticamente significativas en la variabilidad de la variable dependiente. Con el sistema informático Gretl las conclusiones de los resultados la basaremos en el p-valor, según el cual una variable se considera significativa si el p-value es menor de 0,05.

En segundo lugar, dada la naturaleza del estudio, se puede disponer de infinitas mediciones continuas de concentraciones de contaminantes y agentes meteorológicos para el período 2011 a 2018, lo que facilita que dependiendo de la muestra que se escoja, el modelo arroje valores distintos para cada parámetro. Cabe así la posibilidad de que la variabilidad de los parámetros no explique la variabilidad de la variable dependiente. En base a este hecho se realiza la prueba conjunta de los coeficientes del modelo.

$$H_0: b_1 = b_2 = \dots = b_k = 0$$

H₁: El conjunto de las variables independientes ayuda a explicar la variabilidad de la variable dependiente.

Para analizar esta prueba de hipótesis se utiliza el estadístico *F – Fisher* presente en el sistema informático Gretl.

Finalmente, otro aspecto que tener en consideración, es la bondad del ajuste del modelo, qué porcentaje de la variable dependiente está siendo explicado por el conjunto de las variables independientes. Su cálculo se obtiene de la división entre la varianza explicada (VE) y la varianza total (VT). Debido a que se trata de un cociente de suma de cuadrados, el resultado siempre va a ser positivo.

A continuación, se muestra la representación de la bondad del ajuste, o también denominado R^2 , siendo VNE la varianza no explicada:

$$R^2 = \frac{VE}{VT} \tag{3.12}$$

Para determinar si un R^2 es considerado bueno o malo para un modelo, existe una clasificación que puede servir de guía para la toma de decisiones. La bondad del ajuste se considera muy mala si se encuentra entre 0 y 0,3; mala si toma valores entre 0,3 y 0,4; de 0,5 a 0,85 se estima buena y, finalmente, por encima de 0,85 la bondad del ajuste resulta sospechosa (Rojo, 2007).

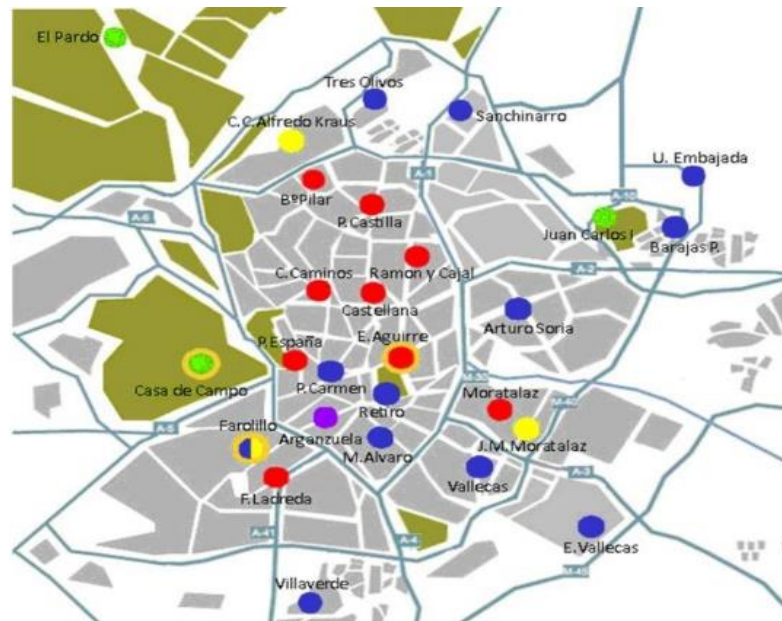
**CAPITULO IV. APLICACIÓN DE LA METODOLOGIA EN LA
COMUNIDAD DE MADRID.**

**CAPÍTULO IV. APLICACIÓN DE LA
METODOLOGIA EN LA CIUDAD DE
MADRID**

En este capítulo se aplicará a una estación de medición situada en la comunidad la metodología expuesta en el capítulo anterior. Cuatro Caminos, estación de medición utilizada para el análisis, pertenece al distrito madrileño de Tetuán, localizado en el noroeste. Cuenta con una superficie de 1,18 km² y más de 150.000 habitantes.

A fecha del año 2019 Madrid cuenta con un total de 24 estaciones de mediciones de calidad del aire distribuida como se muestra en la figura

Figura: 1. Distribución de estaciones de calidad del aire



Fuente: (Ayuntamiento de Madrid, s.f)

Del total de las estaciones, 10 de ellas localizadas en el centro de la ciudad, 3 en el sureste, 6 en el este, 2 en el noroeste y 3 en el suroeste. De entre todas ellas, tan solo un 25% (6 estaciones) recogen datos de las partículas PM_{2,5}, dejando las zonas este, sureste y suroeste sin estaciones capaces de medir dicho contaminante.

Las estaciones del centro corresponden a Plaza de España, Escuelas Aguirre, Ramón y Cajal, Cuatro Caminos, Barrio del Pilar, Castellana, Plaza Castilla, Plaza del Carmen, Méndez Álvaro y Retiro; en el sureste se encuentran Moratalaz, Vallecas y Ensanche de Vallecas; por el este se recogen datos en Arturo Soria, Barajas Pueblo, Urbanización Embajada, Sanchinarro, Tres Olivos y Juan Carlos I; Casa de Campo y El Pardo forman la red noroeste y, finalmente, Fernández Ladreda, Villaverde y Farolillo componen la zona suroeste.

Vista la distribución de ambos tipos de estaciones, resulta indispensable que exista una zona que comparta estación meteorológica y estación de medición de calidad del aire. De entre las 24 de calidad del aire, y 4 meteorológicas solamente se cumple esta condición en un área, Retiro. Sin embargo, como ya se ha mencionado, tan solo 6 estaciones de calidad del aire recogen los niveles de partículas de $PM_{2,5}$, y la estación localizada en Retiro no cumple este requisito.

Por tanto, se manifiesta una dificultad difícil de tratar, la elaboración de una base de datos conjunta con datos meteorológicos y partículas contaminantes del aire está muy limitada a unas áreas concretas y a unas pocas partículas. Así, la labor de investigación en este campo para la ciudad de Madrid queda muy acotada.

Para el caso de este estudio, dado el objetivo de investigación de las partículas $PM_{2,5}$, se ha seleccionado una estación de calidad del aire con capacidad de medición de dichas partículas localizada en Cuatro Caminos, debido a su cercanía con la estación meteorológica de Ciudad Universitaria. De este modo, se busca rebajar las dificultades establecidas por la disposición geográfica de las estaciones de calidad del aire y las partículas que miden o no tienen capacidad de registrar.

En todo caso, la elaboración de la base de datos conjunta se pudo construir partiendo del inconveniente mencionado. De este modo, se ha tenido acceso a los datos diarios desde 2001 hasta 2018 tanto de variables contaminantes como NO_2 , partículas PM_{10} , $PM_{2,5}$, NO , NO_2 , tolueno, benceno y etilbenceno como variables meteorológicas de precipitaciones, temperaturas y viento para el mismo período.

No obstante, la red de estaciones de medición de calidad del aire se ha visto modificada desde 2001. Ha habido estaciones que se han dado de alta, de baja y otras que han permanecido intactas. Sumando más complicaciones al objeto de estudio, la estación de medición de partículas contaminantes de Cuatro Caminos se dio de alta en enero de 2011, lo cual obliga a tomar en consideración los datos comprendidos entre 2011 y 2018.

Antes de aplicar la metodología expuesta en el capítulo anterior, ha resultado mandatorio transformar la variable $PM_{2,5}$ a logaritmo con el objetivo de analizar en término porcentual efecto sobre la variable dependiente. Tras haber aplicado la regresión lineal múltiple, los datos obtenidos por el modelo son los siguientes.

Dependent variable: l_PM25
Heteroskedasticity-robust standard errors, variant HC1

	<i>Coefficient</i>	<i>Std. Error</i>	<i>z</i>	<i>p-value</i>	
const	1.35551	0.0541275	25.04	<0.0001	***
Etilbenceno	-0.106431	0.0434057	-2.452	0.0142	**
Tolueno	-0.0177905	0.00994535	-1.789	0.0736	*
PM10	0.0256272	0.00211265	12.13	<0.0001	***
Precipitaciones	-0.00664539	0.00392408	-1.693	0.0904	*
Viento	-0.0136333	0.00264719	-5.150	<0.0001	***
NO	0.00307423	0.000677134	4.540	<0.0001	***
NO2	0.0100256	0.000994132	10.08	<0.0001	***
Temperatura	0.00397999	0.00225790	1.763	0.0780	*
Mean dependent var	2.291949	S.D. dependent var		0.560021	
Sum squared resid	57.91553	S.E. of regression		0.275148	
R-squared	0.761105	Adjusted R-squared		0.758607	
F(8, 765)	179.3261	P-value(F)		9.4e-170	
Log-likelihood	-94.92753	Akaike criterion		207.8551	
Schwarz criterion	249.7192	Hannan-Quinn		223.9624	

Breusch-Pagan test for heteroskedasticity -
Null hypothesis: heteroskedasticity not present
Test statistic: LM = 177.178
with p-value = P(Chi-square(8) > 177.178) = 4.02863e-034

Prueba de multicolinealidad con Gretl

Además de haber aplicado el modelo de regresión, ha resultado necesario aplicar una serie de comprobaciones, como la presencia o ausencia de multicolinealidad. Para ello, se han observado los llamados *Variance Inflation Factors*, por los cuales se establece un valor mínimo posible, considerado 1, y un umbral fijado en 10 a partir del cual se considera a una variable como origen del problema de multicolinealidad.

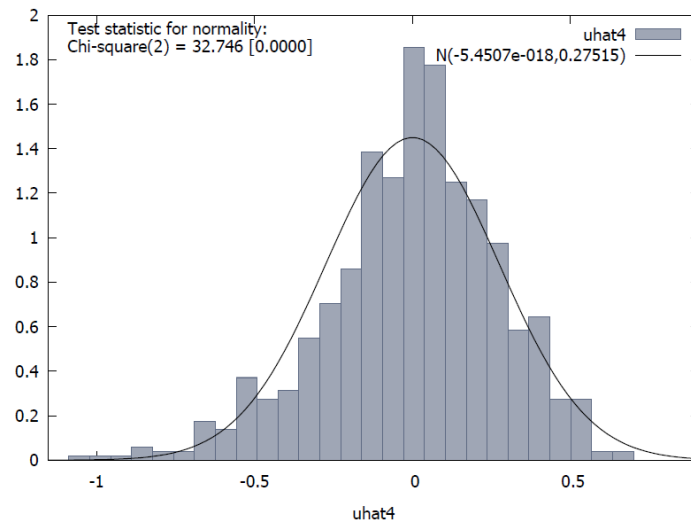
Los *Variance Inflation Factors* de las variables explicativas son los siguientes:

Etilbenceno	5.497
Tolueno	9.163
PM10	2.127
Precipitaciones	1.047
Viento	1.271
NO	5.843

NO2 4.828
Temperatura 2.247

A pesar del alto valor arrojado por el tolueno, se puede observar que ninguna variable supera el umbral marcado en 10, así que se confirma la ausencia de multicolinealidad del modelo.

Gráfico 1. Prueba de Normalidad de los errores



Fuente: Elaboración propia del autor

Cumplimiento de los supuestos y validación del modelo

Para asegurar la correcta validez del modelo empleado, son necesarias una serie de validaciones, que mostrarán la idoneidad de la regresión empleada.

En primer lugar, mediante la prueba del t-student es posible determinar que las variables más significativas son el NO, NO₂, PM₁₀, y viento, con unos p-value menores que 0,0001. Seguidamente, etilbenceno, precipitaciones, temperatura y tolueno son las siguientes más significativas.

Adicionalmente, el estadístico F evidencia, con un p-value de 9.4e-170, que el conjunto de variables independientes explica la variabilidad de la variable dependiente.

Para concluir, tomando el valor del R², de 0,7586, se puede concluir que la variabilidad de la variable dependiente es explicada en un 75,86% por la variabilidad de las variables independientes, dejando un 24,14% sin explicar.

Después de haber observado los datos devueltos por el modelo y haber comprobado su validez, cabe entender que, el monóxido de nitrógeno, dióxido de nitrógeno y las partículas PM_{10} juegan un papel importante al determinar la concentración de partículas $PM_{2,5}$ en el aire. La relación que poseen con la variable dependiente es directamente proporcional. Para el caso del monóxido de nitrógeno, un aumento de $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ supone un aumento del 0,3% de partículas $PM_{2,5}$, y aumentos del 1% y 2,56% si se trata de dióxido de nitrógeno y partículas PM_{10} respectivamente.

Por otro lado, el tolueno y el etilbenceno guardan una relación con las partículas $PM_{2,5}$ inversamente proporcional. Por un incremento de $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de tolueno, el decremento se sitúa en -1,77% y, finalmente, un incremento unitario por $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de etilbenceno se traduce en -10,64% de partículas $PM_{2,5}$.

Finalizando la influencia de las variables explicativas sobre la variable dependiente, restan las variables meteorológicas.

Comenzando por el viento, es la variable meteorológica más significativa, con un p-valor de menor de 0,0001, respecto a los 0,0904 y 0,0780 de precipitaciones y temperatura respectivamente. El coeficiente del viento significa que por cada incremento de 1 km/h la concentración de la variable dependiente será un -1,36% menor, es decir guarda una relación inversamente proporcional. Este dato significa que en días ventosos es más probable que las concentraciones de $PM_{2,5}$ sean menores.

Las precipitaciones también son inversamente proporcionales a las partículas $PM_{2,5}$. Acorde al modelo, cada incremento de $1 \text{ l}/\text{m}^2$, las partículas se ven reducidas en -0,66%. Se podría sugerir que las gotas de las lluvias atrapan las partículas $PM_{2,5}$ y las desplazan del aire al suelo.

Por último, la temperatura, al contrario que el viento y las precipitaciones, es directamente proporcional a las partículas $PM_{2,5}$. En los días calurosos es más probable que exista una concentración mayor de este contaminante, ya que un aumento de 1°C significa un incremento de 0,39% de $PM_{2,5}$.

Finalmente, en los resultados brindados por Gretl puede apreciarse que el modelo no tiene problema de heterocedasticidad, multicolinealidad y los residuos siguen una distribución normal como puede apreciarse en el gráfico 1.

En resumen, el ser humano ha entrado en una dinámica contaminante que empieza a reflejar en el planeta las consecuencias de la producción y quema masiva de combustibles fósiles y la tala indiscriminada de árboles. No sólo el CO₂, sino también otras partículas contaminantes amenazan el actual modelo de vida del ser humano, tanto de países desarrollados como en vías de desarrollo, aunque con diferente repercusión.

Así, se convive con partículas contaminantes peligrosas para la salud presentes en el aire y capaces de entrar en las vías respiratorias y torrente sanguíneo, ocasionando enfermedades respiratorias y, en algunos casos, la muerte.

Para el caso de las partículas PM_{2,5}, y reducir su incidencia, se debe comenzar por comprenderlas y establecer qué relaciones tienen con otros elementos presentes en el aire, y así tener la posibilidad de anticiparse a escenarios de alta concentración y reducir su incidencia en la salud.

De este modo, conociendo la naturaleza de las partículas contaminantes, los gobiernos pueden aunar fuerzas para reducir su impacto, como vienen haciendo con el protocolo de Kyoto o de París. Los esfuerzos por disminuir los niveles de contaminación, para ser más efectivos, también deben tener una aplicación local. Es el caso de la ciudad de Madrid con el protocolo de contaminación que ha instaurado.

Sin embargo, no se dispone un protocolo para las partículas PM_{2,5} a pesar de que suponen un riesgo para la salud (HEI, 2000), y se han sobrepasado los límites establecidos por la OMS como se muestra en los anexos.

Tomando como base el protocolo de contaminación en vigor y elaborado por el Principado de Asturias, se recomienda:

- Definir una serie de umbrales máximos que permita clasificar la cantidad de partículas PM_{2,5} según su peligrosidad para la salud.
- Ampliar el alcance de las estaciones de medición capaces de registrar las partículas PM_{2,5} y así lograr, al menos, que el 50% de las estaciones cumplan esta característica.
- Servirse de la ayuda de las predicciones meteorológicas y establecer qué condiciones del tiempo van a ser favorables a una disminución de la concentración de PM_{2,5}.

- Elaborar una batería de medidas informativas, como la notificación de la activación del protocolo a las administraciones públicas competentes y a la población a través de medios de comunicación y anuncios en la calle y elaborar campañas de concienciación sobre cómo actuar en estos escenarios, especialmente las personas más vulnerables.
- Llevar a cabo medidas relacionadas con el tráfico rodado, como restricciones a la velocidad límite de conducción, el acceso de los vehículos más contaminantes a la ciudad, actividades de carga y descarga y, paralelamente, fomentar el uso del transporte público mediante descuentos temporales. Los vehículos de emisiones cero o híbridos no sufrirían las restricciones a la circulación.
- Garantizar el cumplimiento de otras medidas, como moderar el uso de calefacciones y aires acondicionados de las administraciones públicas e invitar a comunidades de vecinos y edificios empresariales a hacer lo mismo; prohibir la quema de restos vegetales y reducir la actividad de las obras que puedan emitir partículas a la atmósfera.
- Iniciar conversaciones con la Comunidad de Madrid para facilitar la cooperación y lograr un mayor rango de acción en caso de resultar necesario.

En definitiva, el protocolo de actuación del Principado de Asturias es muy similar al empleado en la ciudad de Madrid. No resultaría muy elaborado incorporar las partículas $PM_{2,5}$ al protocolo madrileño, ya que las medidas de actuación pueden ser las mismas que para otros contaminantes (Gobierno del Principado de Asturias, 2018).

Por tanto, a pesar de que el Ayuntamiento de Madrid no considere las partículas $PM_{2,5}$ (y PM_{10}) en su protocolo por su carácter extraordinario, es cierto que en ocasiones se han sobrepasado los límites establecidos por la OMS.

CONCLUSIONES

CONCLUSIONES

Con la revisión de la panorámica que envuelve la salud humana y las partículas contaminantes, y los hallazgos logrados con este estudio, se puede concluir que:

1. Las partículas $PM_{2,5}$ en concentraciones altas representan un peligro para la salud, especialmente para los grupos más vulnerables como niños y mayores de 65 años.
2. En la ciudad de Madrid se han sobrepasado en varias ocasiones los límites de $PM_{2,5}$ establecidos por la OMS como se observa en las figuras facilitadas en los anexos.
3. Actualmente no existe un protocolo anticontaminación para las partículas $PM_{2,5}$ en la ciudad de Madrid.
4. En los meses y días más calurosos es más probable una mayor concentración de $PM_{2,5}$.
5. Los meses y días más lluviosos y ventosos es más probable encontrar una concentración de $PM_{2,5}$ menor.
6. Las estaciones de medición de calidad del aire ofrecen una vaga representación de los niveles reales de $PM_{2,5}$.
7. La actual distribución de estaciones de calidad del aire y estaciones meteorológicas dificulta los estudios de este tipo.

Por ende, se recomienda la incorporación de las partículas $PM_{2,5}$ al protocolo de actuación por las negativas consecuencias que tiene sobre la salud y porque se vienen sobrepasando los límites establecidos por organismos internacionales desde los últimos años.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ansede, M. (2018). La contaminación ha matado a 93.000 personas en España en una década. El País, [en línea]. Recuperado el 3 de febrero de 2019, de https://elpais.com/elpais/2018/06/21/ciencia/1529592814_225910.html

Ayuntamiento de Madrid. (s.f). Estaciones remotas de medición de calidad del aire, [en línea]. Recuperado el 16 de mayo de 2019, de <https://www.madrid.es/portales/munimadrid/es/Inicio/El-Ayuntamiento/Direcciones-y-telefonos/Estaciones-remotas-de-medicion-de-la-calidad-del-aire?vgnextfmt=default&vgnextoid=8c7c2a64e309a110VgnVCM2000000c205a0aRCRD&vgnnextchannel=9e4c43db40317010VgnVCM100000dc0ca8c0RCRD>

Ballester, F. (2005). Contaminación atmosférica, cambio climático y salud. *Revista Española de salud Pública*, 79 (2).

Buringh, E., Fischer, P., & Hoek, G. (2000). Is SO₂ a causative factor for the PM-associated mortality risks in the Netherlands? *Inhalation Toxicology*, 12(Suppl.) 55:60.

Caballero, M., Lozano, S., & Ortega, B. (2007). Efecto invernadero, calentamiento global y cambio climático: Una perspectiva desde las ciencias de la tierra. *Revista digital universitaria*, 8(10).

Comisión Europea, (2012). Consecuencias del cambio climático, [en línea]. Recuperado el 5 de febrero de 2019, de https://ec.europa.eu/clima/change/consequences_es

Cuadras, C. M. (2017). Nuevos métodos de análisis multivariante. Manacor. CMC Editions.

Ecologistas en acción, (2018). La calidad del aire en la ciudad de Madrid en 2017, [en línea]. Recuperado el 17 de diciembre de 2018, de <https://spip.ecologistasenaccion.org/IMG/pdf/info-calidad-aire-madrid-2017.pdf>

Field, C., Raupach, M., & Hill MacKenzie, S., (2004). *The Global Carbon Cycle: Integrating Humans, Climate, and the Natural World*. Bibliovault OAI Repository, the University of Chicago Press.

Gobierno del Principado de Asturias, (2018). Protocolo de actuación en episodios de contaminación del aire en el Principado de Asturias, [en línea]. Recuperado el 30 de mayo de 2019, de

https://www.asturias.es/medioambiente/articulos/ficheros/2018_05_25%20PROTOCOL%20Episodios%20contaminaci%C3%B3n%20del%20aire%20Asturias.pdf

HEI (2000). Reanalysis of the Harvard Six-Cities study and the American Cancer Society study of particulate air pollution and mortality. A special report of the Institute's Particle Epidemiology reanalysis Project. Cambridge, MA, Health Effects Institute.

HEI International Oversight Committee (2004). Health effects of outdoor air pollution in developing countries of Asia: a literature review. Boston, MA, Health Effects Institute (Special Report No. 15).

Katsouyanni, K., *et al.* (2001). Confounding and effect modification in the short-term effects of ambient particles on total mortality: results from 29 European cities within the APHEA2 project. *Epidemiology*, 12:521–531.

Mauricio, JA., (2017). Introducción al Análisis de Series Temporales, [en línea]. Universidad Complutense de Madrid. Recuperado el 23 de marzo de 2019, de <https://www.ucm.es/data/cont/docs/518-2013-11-11-JAM-IAST-Libro.pdf>

Ministerio de Agricultura y Pesca y Alimentación y Medio Ambiente, (2017). Plan Nacional de Calidad del Aire 2017-2019 (Plan AIRE II), [en línea]. Recuperado el 10 de marzo de 2019, de <http://reca.es/wp-content/uploads/2018/01/Texto-Plan-AIRE-2017-2020-aprobado.pdf>

Organización Mundial de la Salud, (s.f). 10 datos sobre el cambio climático y la salud, [en línea]. Recuperado el 1 de febrero de 2019, de https://www.who.int/features/factfiles/climate_change/facts/es/

Organización Mundial de la Salud, (2005). Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre, [en línea]. Recuperado el 30 de marzo de 2019, de https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/69478/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_spa.pdf;jsessionid=0671705A25E1B637E94F055A020FF1F3?sequence=1

Petit, J., *et al.*, (1999) Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature* 399:429-436.

Pierre – Louis, K. (2018). El deshielo de la Antártida es tres veces mayor que hace una década, [en línea]. The New York Times. Recuperado el 2 de marzo de 2019, de <https://www.nytimes.com/es/2018/06/14/antartida-deshielo/>

Redacción BBC Mundo. (2017). Donald Trump anuncia que Estados Unidos Abandonará el Acuerdo de París sobre cambio climático, [en línea]. BBC Mundo. Recuperado el 28 de febrero de 2019, de <https://www.bbc.com/mundo/noticias-internacional-40124921>

Redacción BBC Mundo. (2017). 5 cifras que muestran la magnitud de la contaminación que genera Estados Unidos en el planeta, [en línea]. BBC Mundo. Recuperado el 2 de marzo de 2019, de <https://www.bbc.com/mundo/noticias-internacional-40126746>

Rojo, J.M. (2007). Regresión lineal múltiple. Instituto de economía y geografía.

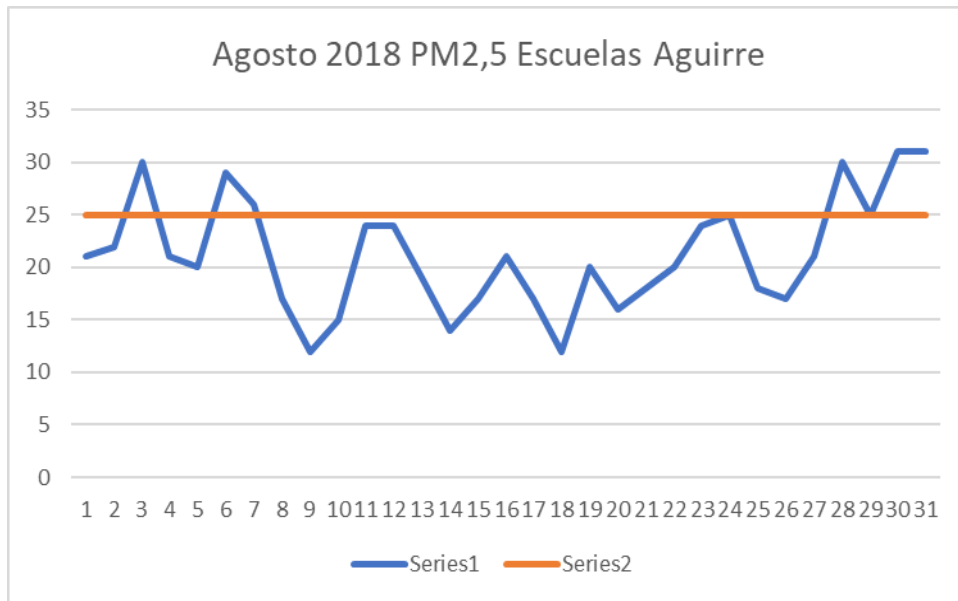
Samet, JM., *et al.* (2000). The National Morbidity, Mortality, and Air Pollution Study. Part II: Morbidity and mortality from air pollution in the United States. Research Reports of the Health Effects Institute, 94:5–70.

Unicef, (2017). Impacto del cambio climático en la infancia en España, [en línea]. Recuperado el 1 de noviembre de 2018, de <https://www.unicef.es/publicacion/el-impacto-del-cambio-climatico-en-la-infancia-en-espana>

ANEXOS

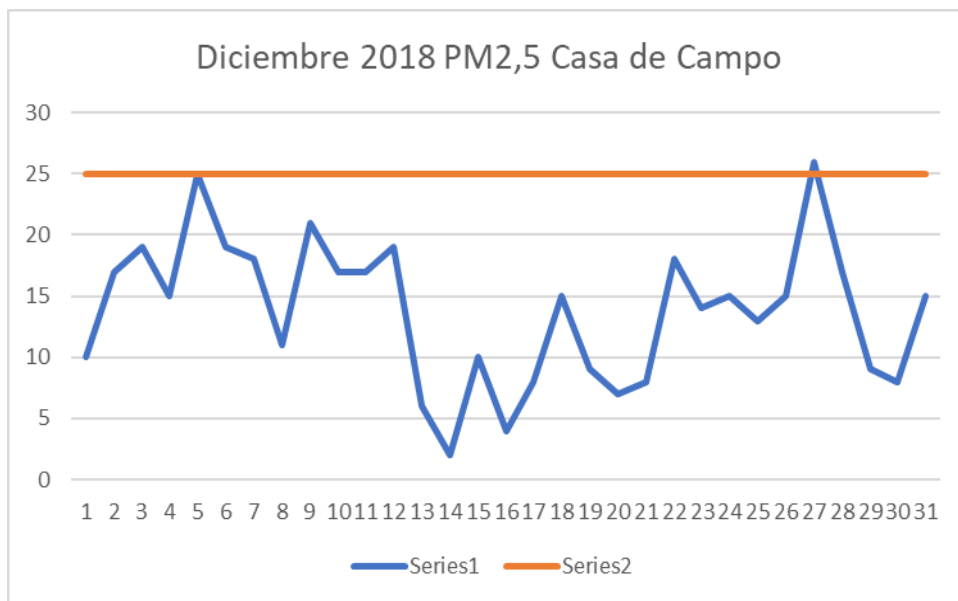
ANEXOS

Ilustración 1: Escuelas Aguirre – agosto 2018



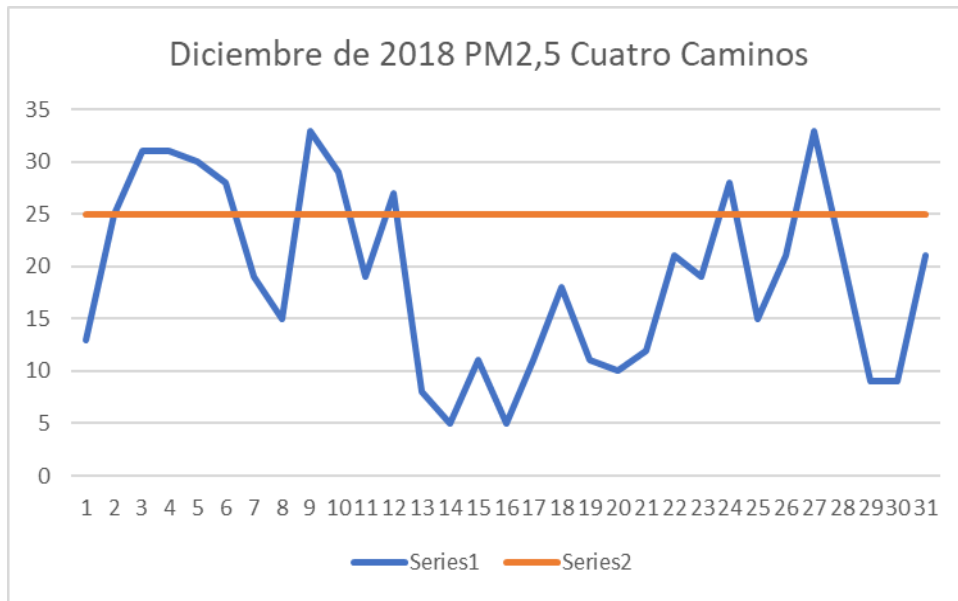
Fuente: Elaboración propia del autor

Ilustración 2: Casa de Campo - diciembre 2018



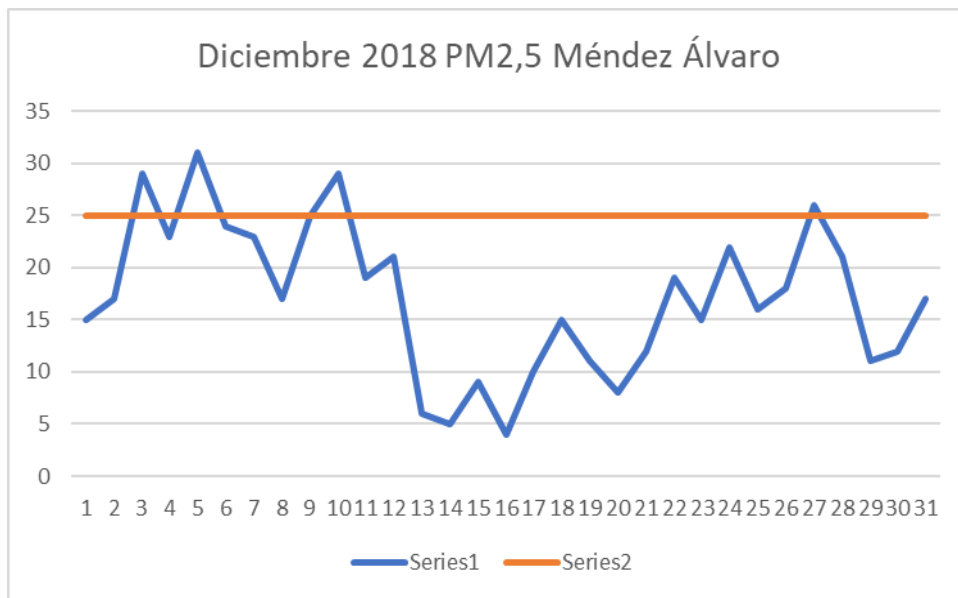
Fuente: Elaboración propia del autor

Ilustración 3: Cuatro Caminos - diciembre 2018



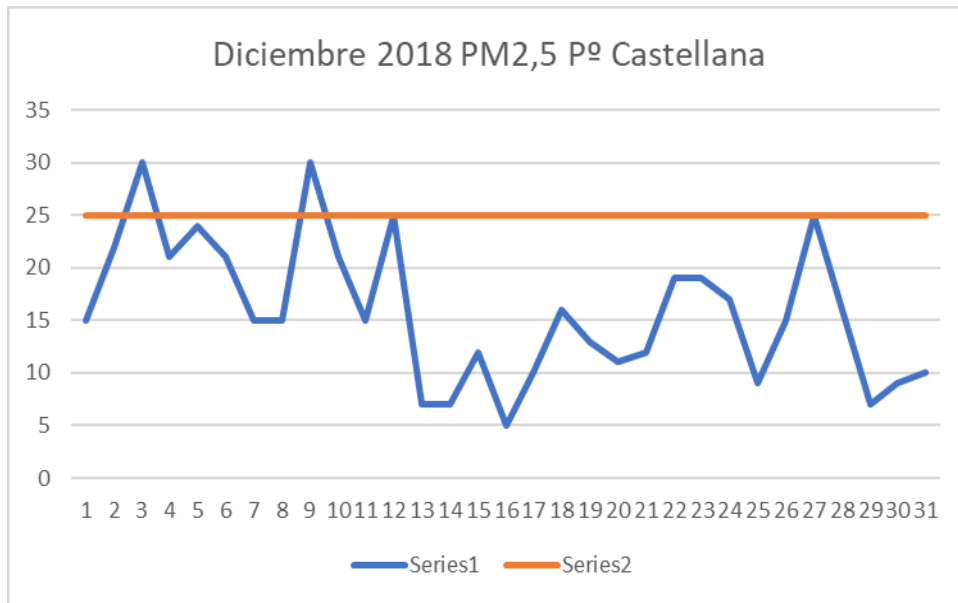
Fuente: Elaboración propia del autor

Ilustración 4: Méndez Álvaro – diciembre 2018



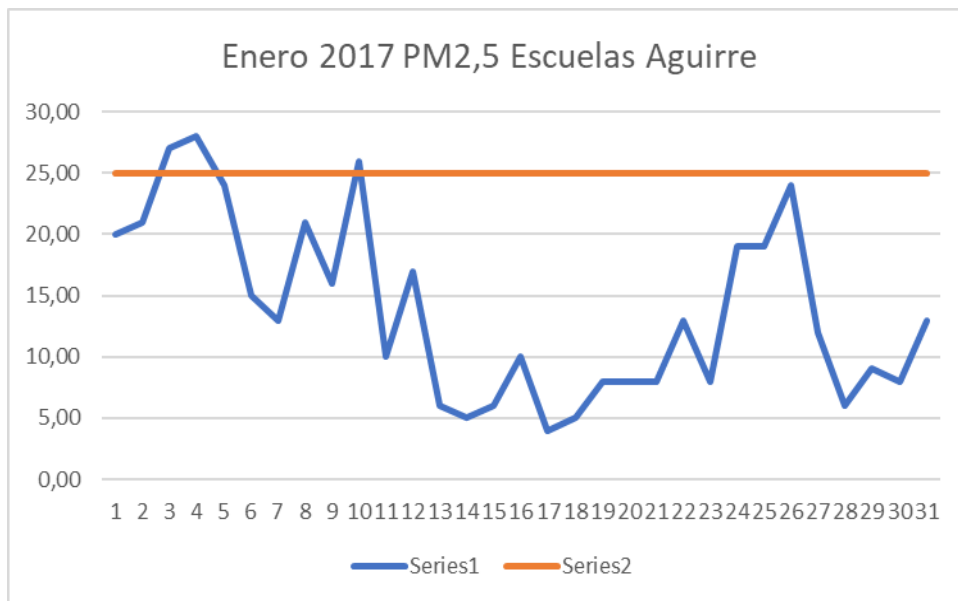
Fuente: Elaboración propia del autor

Ilustración 5: Paseo de la Castellana – diciembre 2018



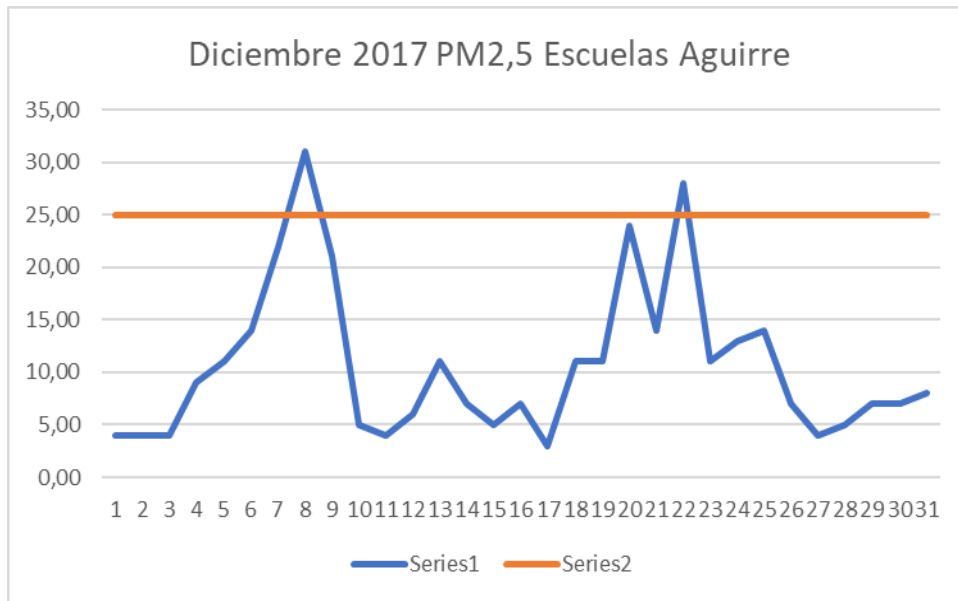
Fuente: Elaboración propia del autor

Ilustración 6: Escuelas Aguirre - enero 2017



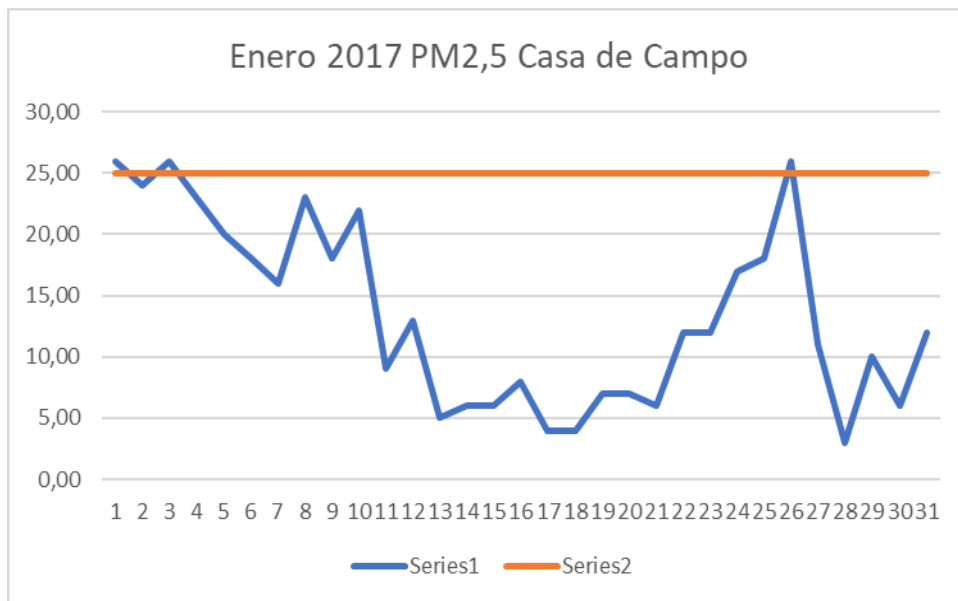
Fuente: Elaboración propia del autor

Ilustración 7: Escuelas Aguirre - diciembre 2017



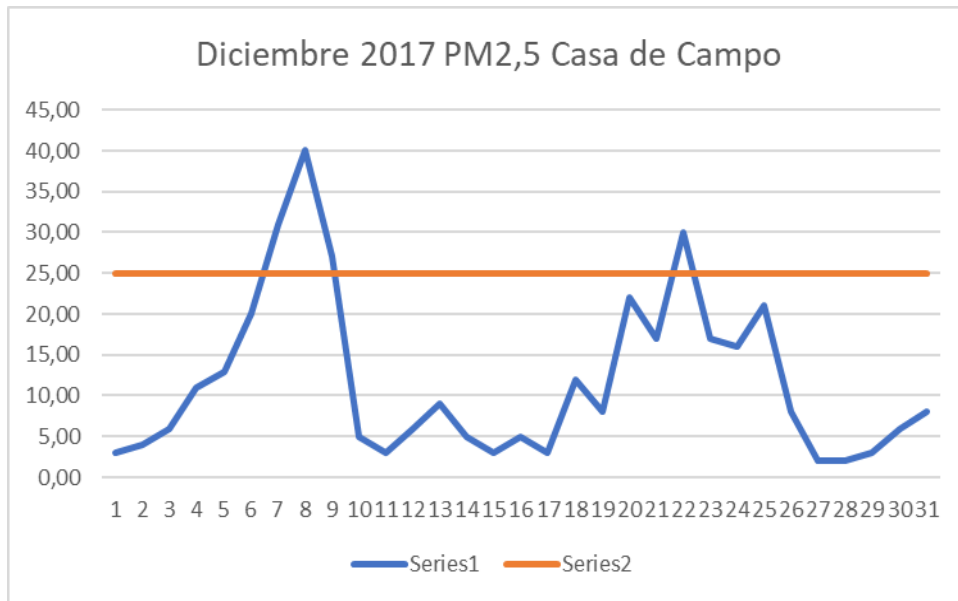
Fuente: Elaboración propia del autor

Ilustración 8: Casa de Campo - enero 2017



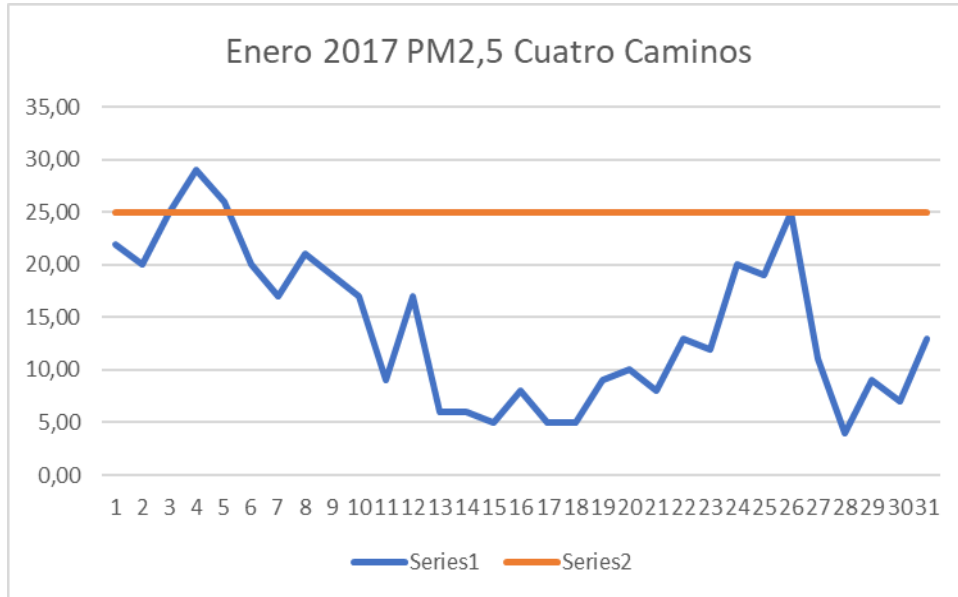
Fuente: Elaboración propia del autor

Ilustración 9: Casa de Campo - diciembre 2017



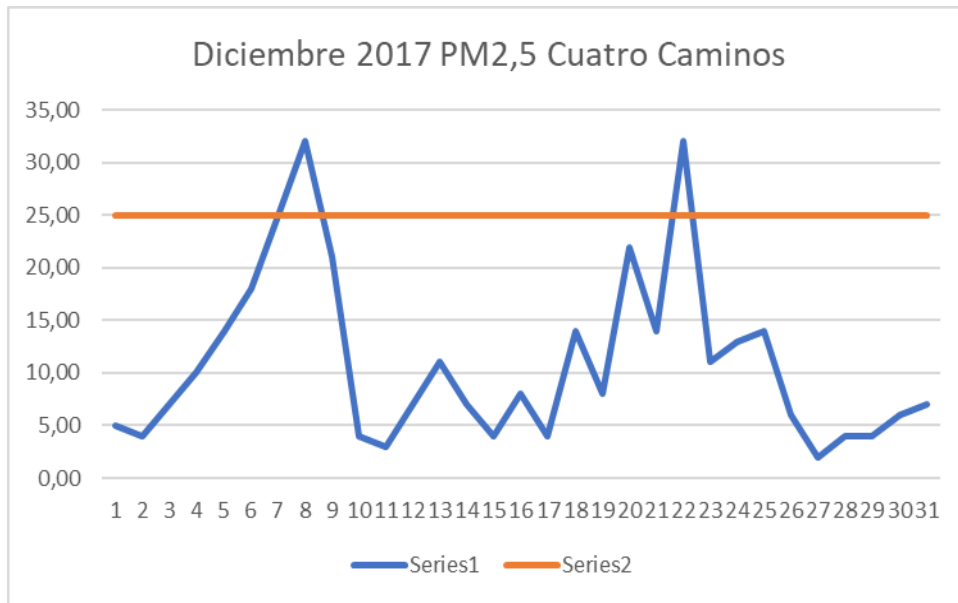
Fuente: Elaboración propia del autor

Ilustración 10: Cuatro Caminos - enero 2017



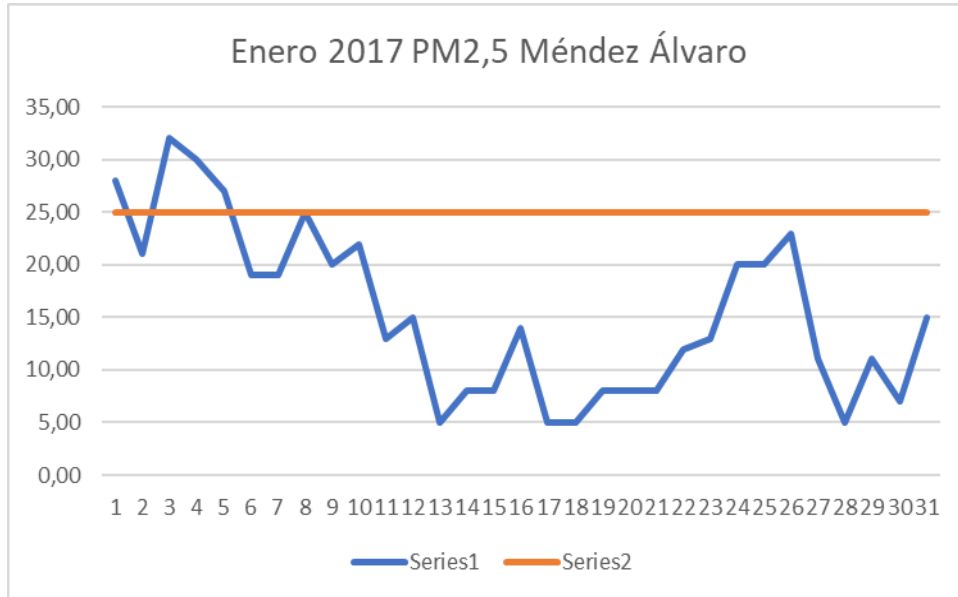
Fuente: Elaboración propia del autor

Ilustración 11: Cuatro Caminos - diciembre 2017



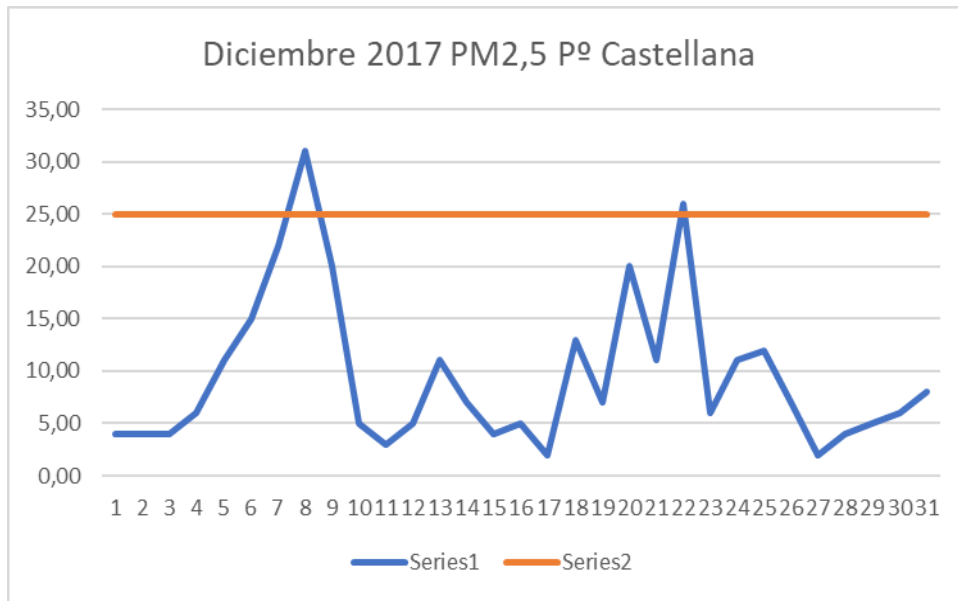
Fuente: Elaboración propia del autor

Ilustración 12: Méndez Álvaro - enero 2017



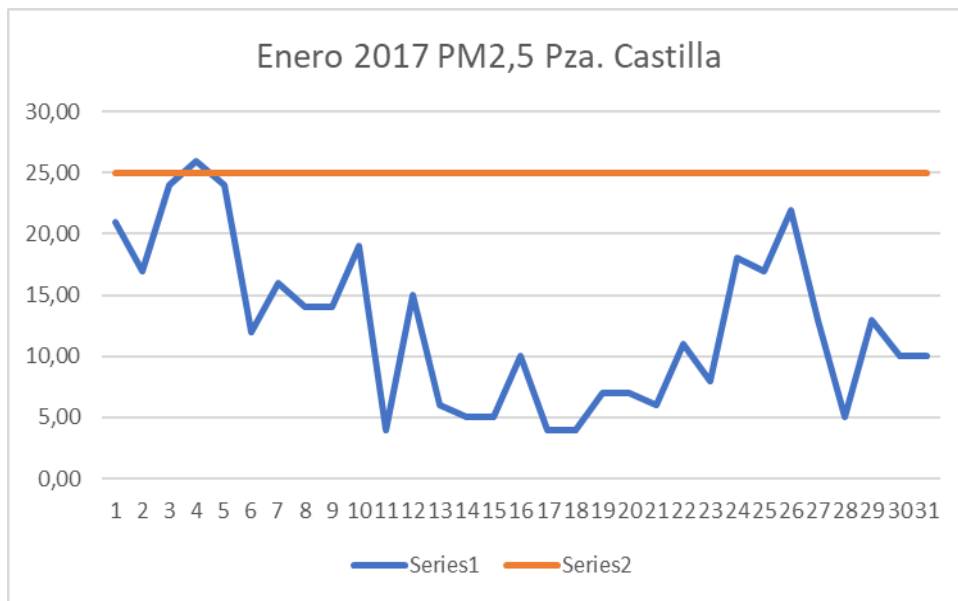
Fuente: Elaboración propia del autor

Ilustración 13: Paseo de la Castellana - diciembre 2017



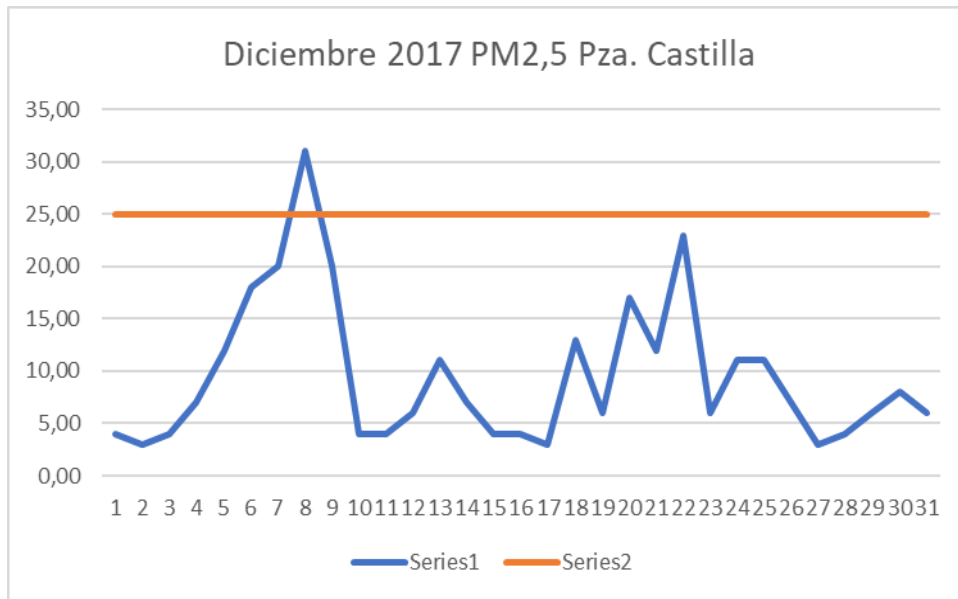
Fuente: Elaboración propia del autor

Ilustración 14: Plaza Castilla - enero 2017



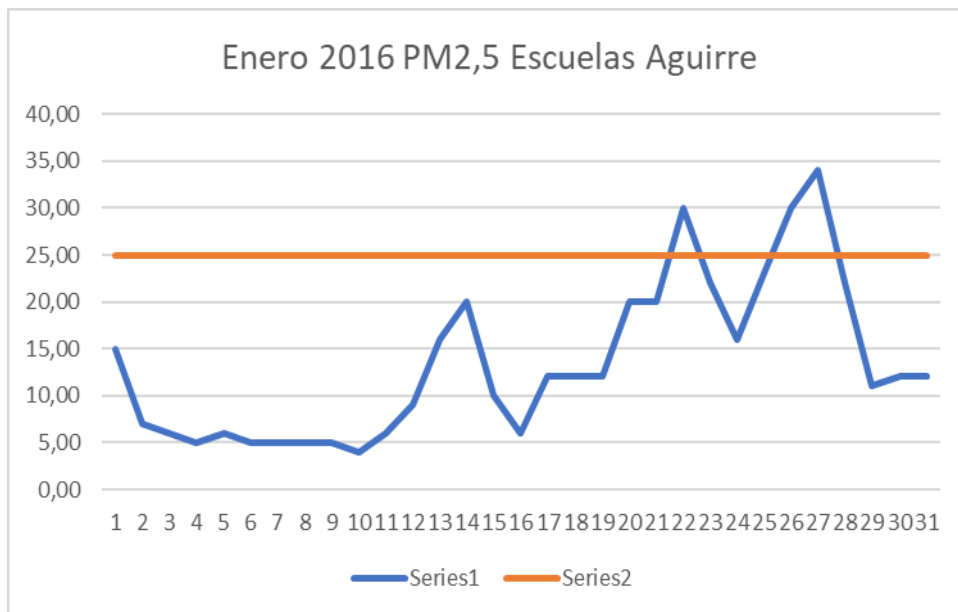
Fuente: Elaboración propia del autor

Ilustración 15: Plaza Castilla - diciembre 2017



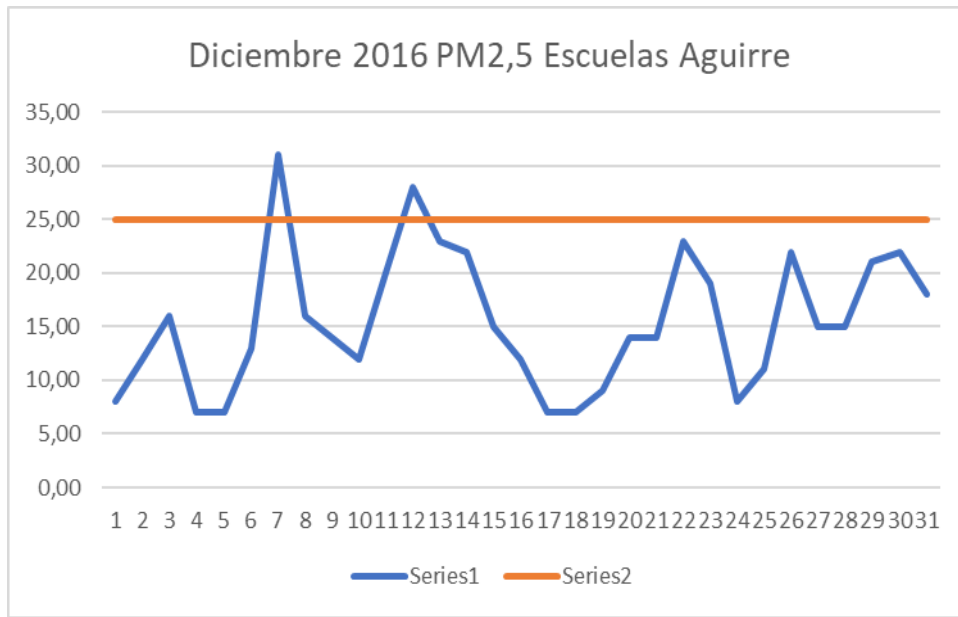
Fuente: Elaboración propia del autor

Ilustración 16: Escuelas Aguirre - enero 2016



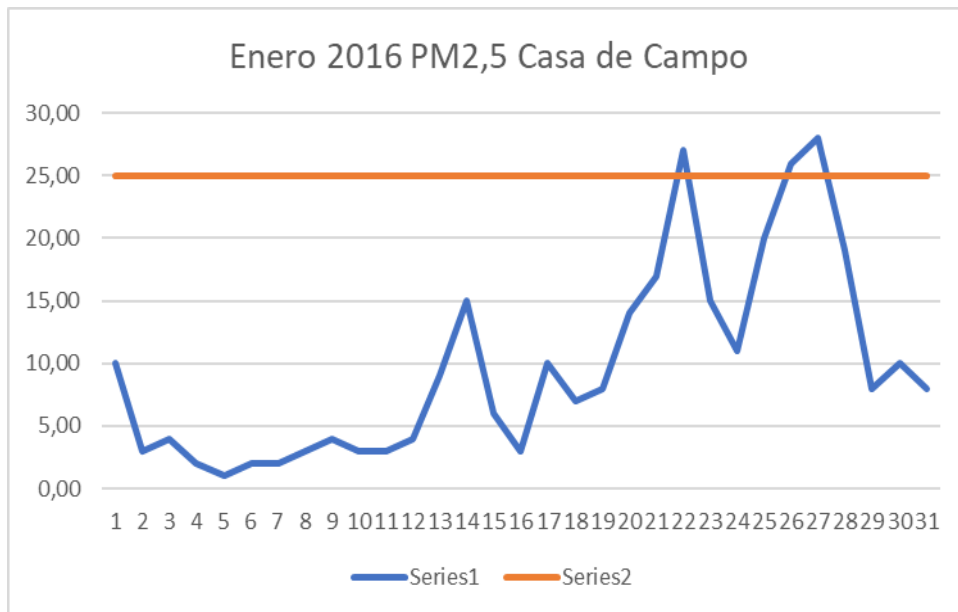
Fuente: Elaboración propia del autor

Ilustración 17: Escuelas Aguirre - diciembre 2016



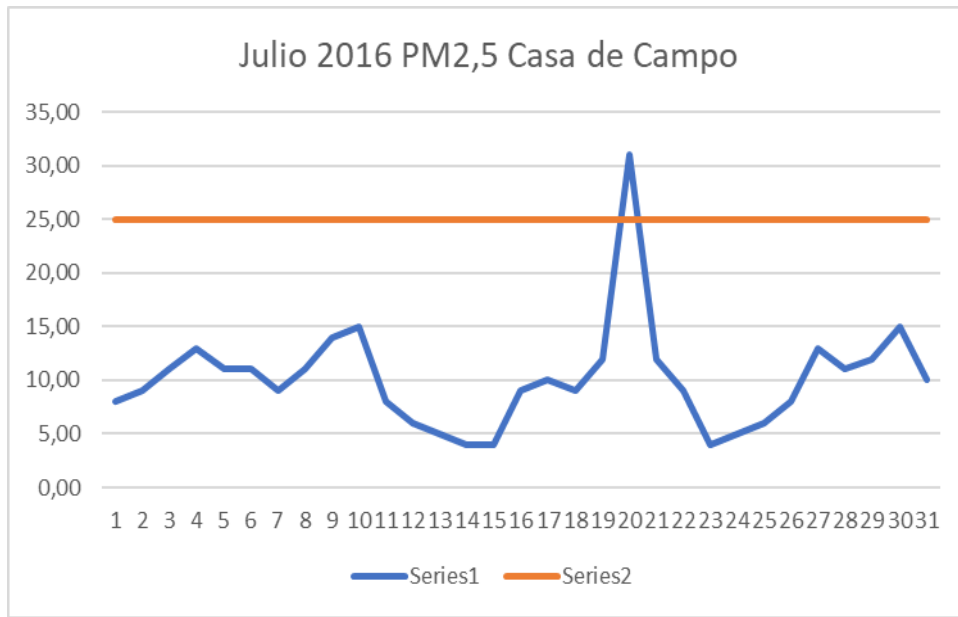
Fuente: Elaboración propia del autor

Ilustración 18: Casa de Campo - enero 2016



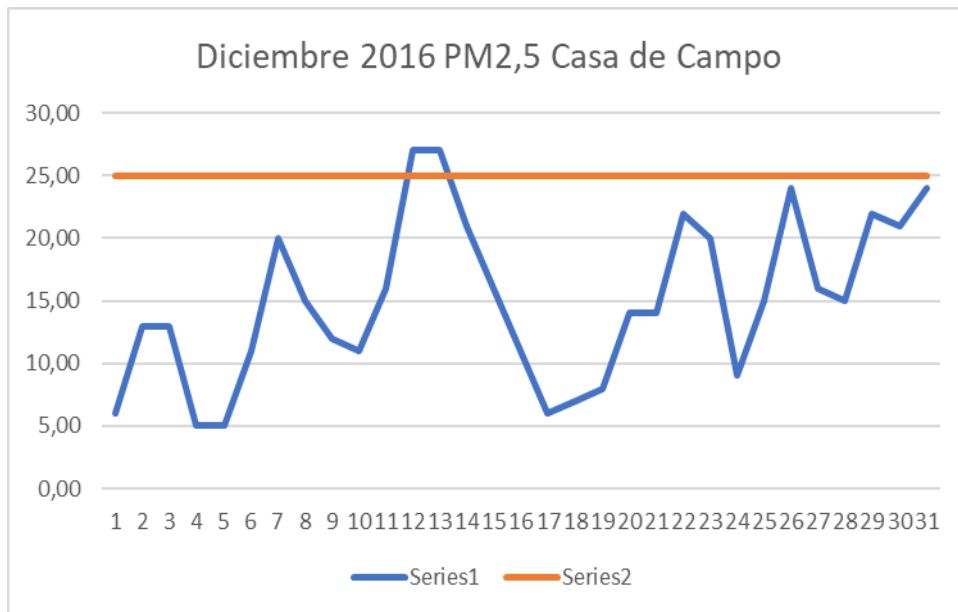
Fuente: Elaboración propia del autor

Ilustración 19: Casa de Campo - julio 2016



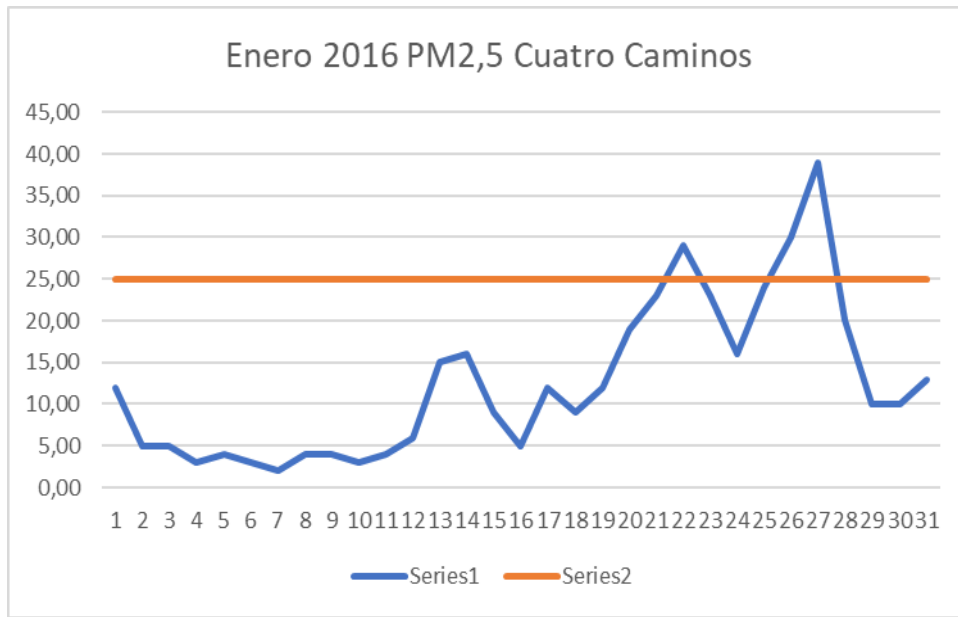
Fuente: Elaboración propia del autor

Ilustración 20: Casa de Campo - diciembre 2016



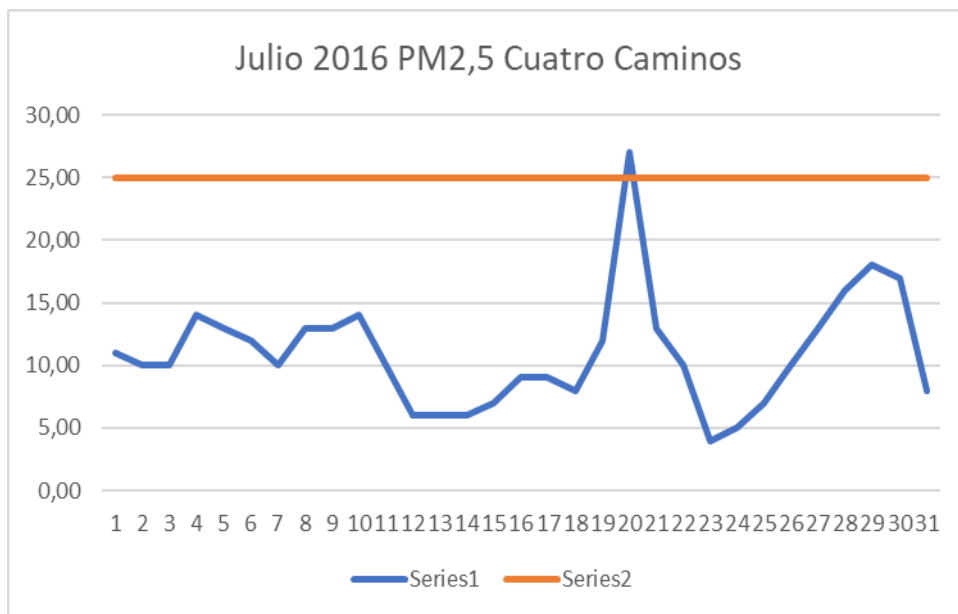
Fuente: Elaboración propia del autor

Ilustración 21: Cuatro Caminos - enero 2016



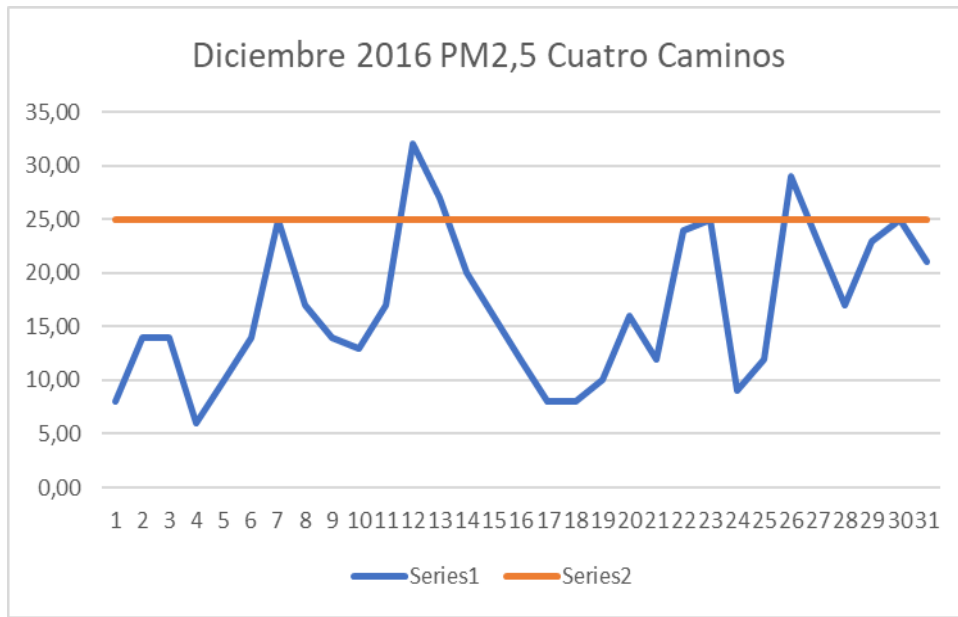
Fuente: Elaboración propia del autor

Ilustración 22: Cuatro Caminos - julio 2016



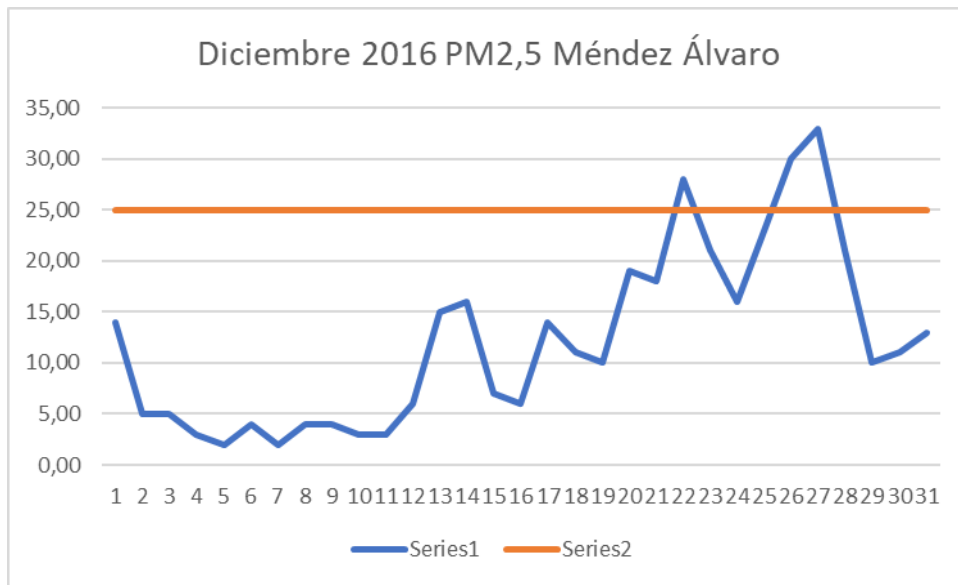
Fuente: Elaboración propia del autor

Ilustración 23: Cuatro Caminos - diciembre 2016



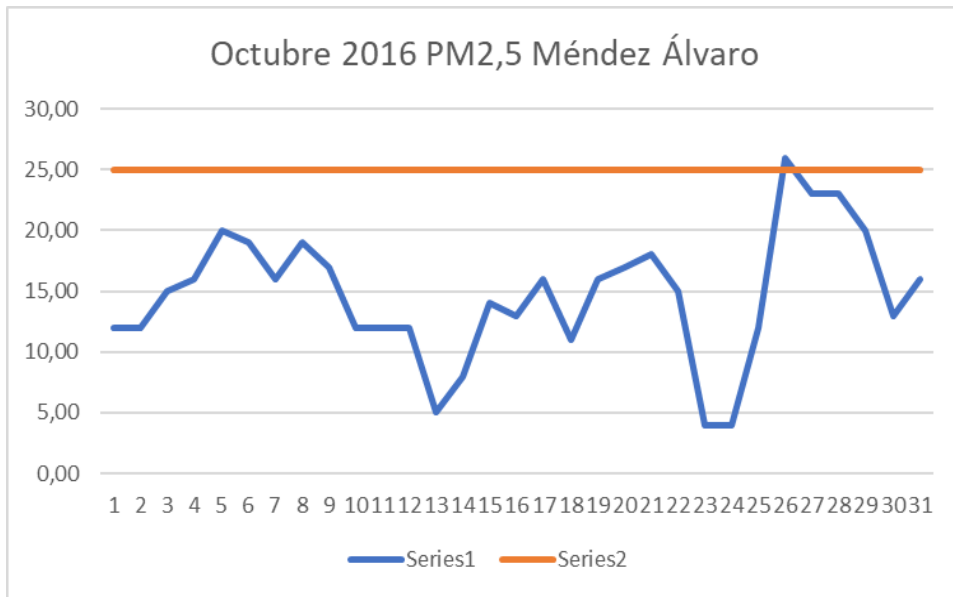
Fuente: Elaboración propia del autor

Ilustración 24: Méndez Álvaro - diciembre 2016



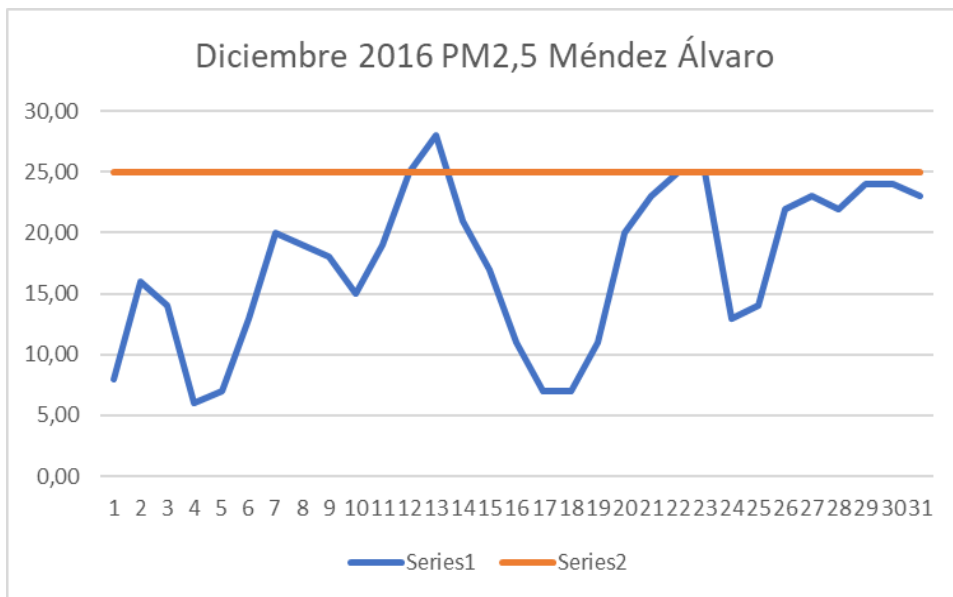
Fuente: Elaboración propia del autor

Ilustración 25: Méndez Álvaro - octubre 2016



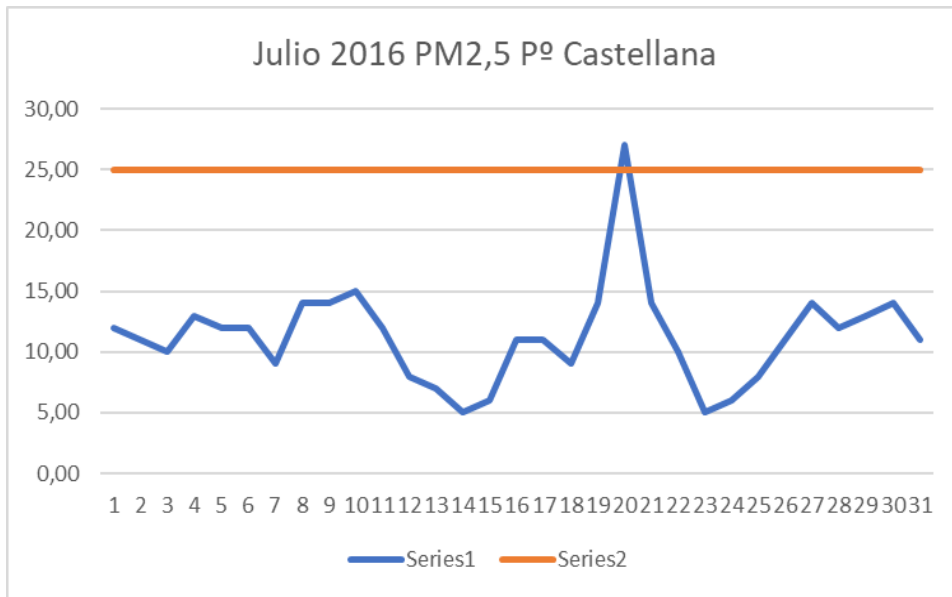
Fuente: Elaboración propia del autor

Ilustración 26: Méndez Álvaro - diciembre 2016



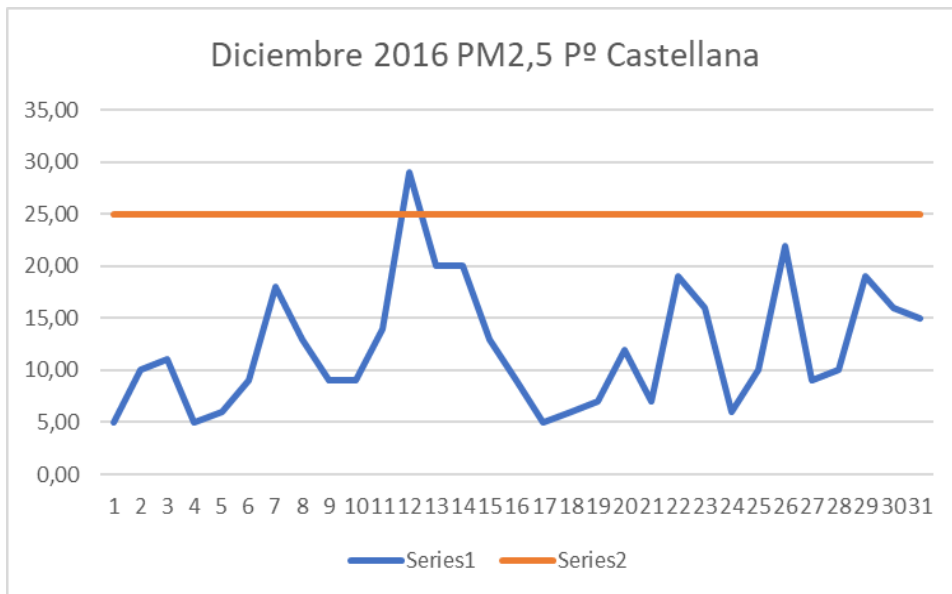
Fuente: Elaboración propia del autor

Ilustración 27: Paseo de la Castellana - julio 2016



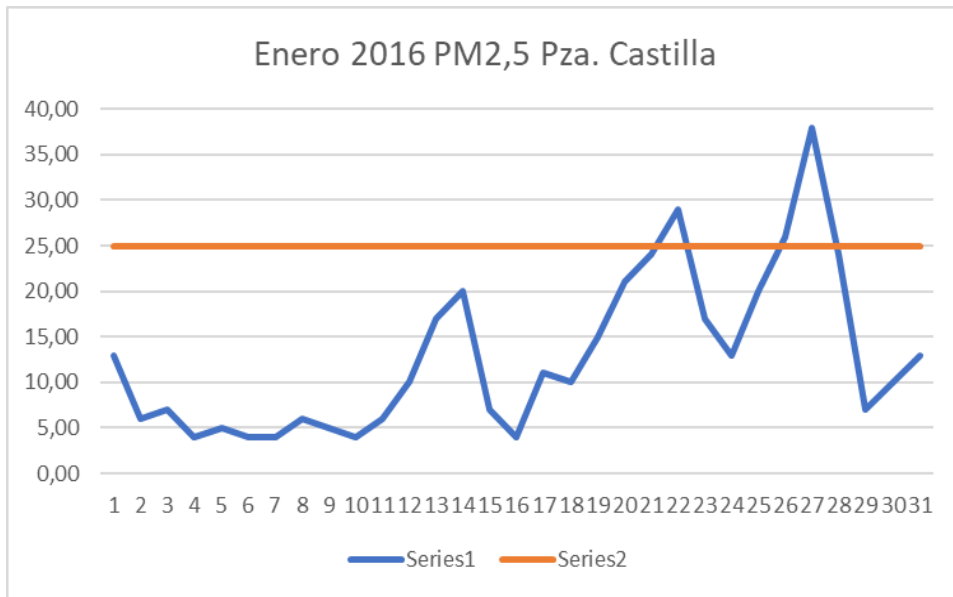
Fuente: Elaboración propia del autor

Ilustración 28: Paseo de la Castellana - diciembre 2016



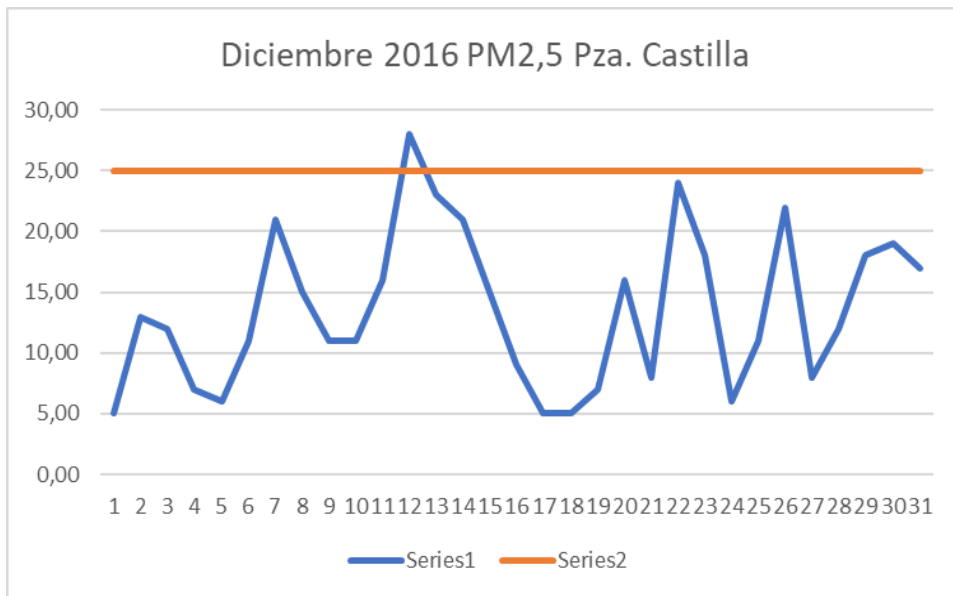
Fuente: Elaboración propia del autor

Ilustración 29: Plaza Castilla - enero 2016



Fuente: Elaboración propia del autor

Ilustración 30: Plaza castilla - diciembre 2016



Fuente: Elaboración propia del autor

Ilustración 31: Estaciones de medición de calidad del aire

Zona	Identificador	Estación	Tipo	Distrito	NO2	PM10	PM2,5	O3	Disponibilidad
1	28079004	Pza. España	Tráfico	Moncloa	X				
	28079008	Esc. Aguirre	Tráfico	Salamanca	X	X	X	X	
	28079011	Ramón y Cajal	Tráfico	Chamartín	X				
	28079010								
	28079038(*)	Cuatro Caminos	Tráfico	Chamberí	X	X	X		* Código desde enero 2011
	28079005								
	28079039(*)	Barrio del Pilar	Tráfico	Fuencarral	X			X	* Código desde enero 2011
	28079048	Castellana	Tráfico	Chamartín	X	X	X		Alta.- 01/06/2010 (00:00 h.)
	28079015	Pza. Castilla	Tráfico	Tetuán	X	X	X		Baja.- 17/10/2008 (11:00 h.)
	28079003								
	28079035(*)	Pza. del Carmen	FU	Centro	X			X	* Código desde enero 2011
28079047	Mendez Álvaro	FU	Arganzuela	X	X	X		Alta.- 21/12/2009 (00:00 h.)	
28079049	Retiro	FU	Retiro	X			X	Alta.- 01/01/2010 (00:00 h.)	
2	28079020								
	28079036(*)	Moratalaz	Tráfico	Moratalaz	X	X			* Código desde enero 2011
	28079013								
	28079040(*)	Vallecas	FU	Pte. Vallecas	X	X			* Código desde enero 2011
28079054	Ens. Vallecas	FU	Villa Vallecas	X			X	Alta.- 11/12/2009 (00:00 h.)	
3	28079016	Arturo Soria	FU	Ciudad Lineal	X			X	
	28079027	Barajas Pueblo	FU	Barajas	X			X	
	28079026	Urb. Embajada	FU	Barajas	X	X			Baja.- 11/01/2010 (09:00 h.)
	28079057	Sanchinarro	FU	Hortaleza	X	X			Alta.- 24/11/2009 (00:00 h.)
	28079086								Alta.- 14/01/2010 (13:00 h.)
	28079060(*)	Tres Olivos	FU	Fuencarral	X	X		X	* Código desde enero 2011
28079059	Juan Carlos I	Sub	Barajas	X			X	Alta.- 14/12/2009 (00:00 h.)	
4	28079024	Casa Campo	Sub	Moncloa	X	X	X	X	
	28079058	El Pardo	Sub	Fuencarral	X			X	Alta.- 30/11/2009 (13:00 h.)
5	28079014	Fdez. Ladreda	Tráfico	Usera	X			X	Baja.- 02/12/2009 (09:00 h.)
	28079017	Villaverde	FU	Villaverde	X			X	
	28079018	Farolillo	FU	Carabanchel	X	X		X	

Fuente: Elaboración propia del autor