

---

# Nuevas técnicas para la construcción de índices ambientales para grandes ciudades.

---

Gema Fernández-Avilés

Universidad de Castilla-La Mancha

María del Carmen García-Centeno

Universidad CEU San Pablo

---

## *Resumen*

La calidad del aire es un factor cada vez más relevante y considerado en la sociedad. Y esto, no es sólo por sus efectos en la salud humana, en las plantas, sobre elementos materiales. ..., sino que también está tomando notabilidad en las decisiones de las personas, como la elección del lugar de residencia o, simplemente, la ciudad donde pasar unos días de ocio. Existen en la actualidad diferentes índices de calidad del aire, pero éstos no incluyen los efectos combinados de la mayoría de los contaminantes entre ellos, por un lado, y con la atmósfera, por otro lado. Estas circunstancias han hecho que en este artículo se persigan los siguientes objetivos: (i) elaboración de un Indicador Global de Deterioro Ambiental, basado en análisis factorial, que tenga en cuenta la interrelación de los contaminantes, variables atmosféricas y el tráfico; y (ii) la construcción de un Índice de Calidad del Aire, de carácter cuantitativo, obtenido mediante técnicas probabilísticas. Además, se ha realizado una aplicación práctica para una gran ciudad tipo: Madrid.

**Palabras clave:** Indicador Global de Deterioro Ambiental (IGDA), Índice de Calidad del Aire (ICA), contaminante, Teoría de la Probabilidad.

**Clasificación JEL:** C10, Q51, Q52

---

\* Los autores agradecen los comentarios realizados por los dos evaluadores anónimos, por cuanto han permitido mejorar sustantivamente el contenido del artículo. Además, los autores desean manifestar su satisfacción con las conversaciones mantenidas con Santiago Ángulo y Raquel Ibar, y sobre todo con José-María Montero, pues los debates mantenidos han sido muy enriquecedores en el trabajo que se presenta.

### **New techniques for the elaboration of environmental indexes for big cities.**

#### **Abstract**

Air quality is a factor increasingly relevant and considered in the society. And, this is not only because of its effects in human health, vegetation, material elements..., but also because it is becoming a core factor in a variety of people decisions, including the choice of the place of residence or of the city where to enjoy some days of leisure. It is not difficult to find literature about air quality indexes, but the currently used indexes neither include the mixed effects on air quality of most of pollutants nor the combined effects of pollution and atmosphere characteristics. This is why this article prosecutes the following aims: (i) the elaboration of a Global Index of Air Deterioration for big cities, based on factorial analysis, that takes into account some atmospheric variables and traffic; (ii) the construction of a quantitative Air Quality Index obtained by using probabilistic methods. A practical application has been realized for a typical great city: Madrid.

**Key words:** Air Quality Index, Air Pollution Indicator, pollutants, Probability Theory.

**JEL Classification:** C10, Q51, Q52

## 1.- Introducción.

En los últimos años, y cada vez con mayor frecuencia, los medios de comunicación presentan informes de entidades de diferente índole (organizaciones protectoras del medio ambiente, representantes de organismos públicos en materia de urbanismo y medio ambiente, portavoces de entidades responsables de la salud, etc.) donde se pone de manifiesto la importancia de la calidad del aire que respiramos. Pero, ¿qué es exactamente el aire?<sup>1</sup> El aire es un conjunto de alrededor de veinte gases cuyas proporciones relativas se mantienen constantes hasta una altura aproximada de 25 km. Sus principales componentes son nitrógeno (N<sub>2</sub>), oxígeno (O<sub>2</sub>), argón (Ar) y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Éstas ocupan aproximadamente el 100% del porcentaje en volumen del aire, siendo sus proporciones, el 78,084%, el 20,940%, 0,934% y 0,032%, respectivamente.

Pero, lo cierto es que la alteración de la composición del aire es un hecho que viene ocasionándose desde antes de la aparición del hombre en la Tierra mediante erupciones volcánicas, terremotos, maremotos, incendios forestales, etc. Estos hechos han sido y siguen siendo fuentes naturales de emisión al aire de grandes sustancias ajenas a su composición normal. Desde mediados del siglo XIX hay que sumar a estas alteraciones naturales otras que han venido de la mano del hombre, como el fuerte desarrollo de la industria, la implantación de torres de extracción de petróleo, el desarrollo urbanístico, la mejora de las vías de comunicación, etc. Además, en la actualidad, el espectacular desarrollo de los medios de transporte de tracción mecánica y el incremento del confort son características que han propiciado aun más la alteración de la composición del aire, surgiendo de esta forma uno de los principales problemas con los que convive el planeta: la contaminación atmosférica.

1) Si se recurre al diccionario de la Real Academia de la lengua Española, se puede encontrar la siguiente definición: "Fluido que forma la atmósfera de la Tierra. Es una mezcla gaseosa, que, descontado el vapor de agua que contiene en diversas proporciones, se compone aproximadamente de 21 partes de oxígeno, 78 de nitrógeno y una de argón y otros gases semejantes a este, al que se añaden algunas centésimas de dióxido de carbono."

Y, ¿qué es la contaminación atmosférica? A esta pregunta se debe contestar que no hay una única respuesta. Hay un gran número de definiciones dependiendo del punto de vista que se adopte. En primer lugar, y haciendo hincapié en la composición del aire, se define como cualquier circunstancia que provoque un incremento o decremento de la proporción de los normales constituyentes del aire, llegando a alterar sus propiedades físicas o químicas lo suficiente para ser detectado por los componentes del medio. Lo habitual es considerar como contaminantes sólo las sustancias que se han sido añadidas en cantidades suficientes como para producir un efecto medible en las personas, animales, vegetales o los materiales. Otra definición, de contaminación atmosférica, es aquella en la que ciertas sustancias adquieren concentraciones lo suficientemente elevadas sobre su nivel ambiental normal como para producir un efecto mensurable en el hombre, los animales, la vegetación o los materiales. En definitiva, la contaminación atmosférica es la alteración de la composición normal del aire que tiene efectos perniciosos en los seres vivos y los elementos materiales; por consiguiente, otras alteraciones inocuas distintas de las anteriores no se incluyen en el concepto de contaminación.

En la actualidad, la contaminación atmosférica es uno de los mayores problemas ambientales de las grandes ciudades. De hecho, según<sup>2</sup> la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y con datos de la Organización Mundial de la Salud (OMS), más de dos millones de personas mueren cada año debido a sus consecuencias.

La contaminación atmosférica afecta a millones de personas de todo el mundo, especialmente a aquellas que viven en los grandes núcleos urbanos y en áreas fuertemente industrializadas, con denso tráfico de vehículos. Las emanaciones de polvos y gases corrosivos deterioran no sólo el medio ambiente, dando lugar a olores desagradables, pérdida de visibilidad y daños para la salud humana, sino también, los cultivos y otras formas de vegetación, así como sobre los materiales de construcción.

La contaminación atmosférica apareció primero como una molestia grave pero, posteriormente, se ha convertido en una

---

2) <http://www.elmundo.es/elmundo/2009/03/23/>

amenaza para la calidad de la vida, ya que una contaminación excesiva puede poner en peligro la salud y llegar a convertir algunas zonas en lugares no aptos para ser normalmente habitados. Los efectos producidos por la contaminación atmosférica dependen, principalmente, de la concentración de contaminantes, del tipo de contaminantes presentes, del tiempo de exposición y de las fluctuaciones temporales en las concentraciones de contaminantes, así como de la sensibilidad de los receptores y los sinergismos entre contaminantes.

Y es que, aunque son numerosos los recursos que se dedican a la vigilancia y control de la misma (inventarios de emisiones, redes de vigilancia atmosférica, investigación técnica, etc.), también es necesario realizar una cuantificación adecuada y un estudio detallado de cada uno de los procesos para hacer eficaces las medidas de control.

Es importante tratar de manera especial la contaminación de las grandes ciudades y, en esta línea, desde este trabajo se propone un Indicador Global de Deterioro Ambiental para las grandes ciudades, que además de la evolución de los contaminantes, recoge la interacción y las sinergias que surgen entre ellos y las relaciones con las principales variables meteorológicas y el tráfico, factor, este último, de vital importancia en las grandes urbes. Posteriormente, se presenta un Índice de Calidad del Aire, de carácter cuantitativo y basado en la Teoría de la probabilidad, que a diferencia de los ya existentes, al estar basado en el Indicador Global de Deterioro Ambiental, recogerá las interacciones y sinergias entre las variables que componen este último. La propuesta que aquí se plantea se aplica a la ciudad de Madrid, la capital de España y una de las principales ciudades del mundo, ya que continuamente está viviendo un incremento de su población, la cual se ve afectada por la contaminación del aire que le rodea. No obstante, dicha propuesta es extensible a cualquier otra gran ciudad. Lo cierto es que el trasvase de población de los pueblos a las grandes ciudades mantiene su tendencia a largo plazo, pues, en la actualidad, aproximadamente la mitad de la población mundial vive en aglomeraciones, y se espera que esta proporción aumente en dos tercios para el año 2030, según estimaciones de Naciones Unidas.

El resto del artículo se estructura como sigue. Tras esta introducción, en el segundo epígrafe se aborda la necesidad de estudiar la interacción de los contaminantes, la atmósfera y el tráfico en las grandes urbes. En el tercero se presenta la metodología utilizada para la construcción de Indicadores Globales de Deterioro Ambiental (IGDAs) y sus Índices de Calidad del Aire (ICAs) complementarios. En el cuarto se aplica la metodología expuesta al caso de una de las principales ciudades europeas, la ciudad de Madrid, y se analizan los resultados obtenidos. Y, finalmente se exponen las principales conclusiones que se derivan de este trabajo.

## ***2.- Antecedentes de la calidad del aire en las grandes ciudades.***

Actualmente, el medio ambiente urbano preocupa no sólo a los propios ciudadanos, que cada vez son más conscientes de las condiciones del entorno en el que viven, sino que las autoridades sanitarias y los responsables políticos han tomado conciencia de estos problemas.

La contaminación atmosférica es un problema que afecta directamente a la calidad del medio urbano y, por tanto, a la calidad de vida, y en el mundo occidental ya forma parte de los programas de vigilancia ambiental en las áreas urbanas y metropolitanas. No es extraño pues que se oigan a menudo en los medios de comunicación frases como "la contaminación atmosférica es uno de los mayores problemas ambientales de las grandes ciudades". Sin embargo, el problema no es sencillo de evaluar, de forma que es arriesgado realizar afirmaciones como la de que "Madrid [París, Londres, etc.] es la ciudad más contaminada de Europa", ya que el problema puede deberse a un solo contaminante, a varios o a la interacción entre ellos.

Entre los sectores de actividad que más contaminan podemos citar la industria y el transporte, de gran importancia en el ámbito urbano: la concentración del empleo en las zonas céntricas y la gran extensión de las ciudades generan una gran necesidad de movilidad y ésta debe satisfacerse con un transporte adecuado. Esto

hace que los impactos negativos sean mayores que en el ámbito rural, donde el efecto se diluye más en el espacio, ya que la demanda es menor en términos totales.

Siendo cuantitativamente más nociva la industria, es sin embargo, el transporte, el sector en el que toda la población está implicada como usuarios directos, ya que, la contaminación debida al tráfico es la suma de infinitas pequeñas contribuciones particulares y, por tanto, un uso racional del mismo podría reducir los niveles de emisiones de manera efectiva. Para ello es preciso conocer cómo se generan las emisiones y cuáles son sus repercusiones desde el punto de vista del aumento de la contaminación que sufre el ciudadano (inmisión); de esta forma podrían ponerse en marcha soluciones efectivas, sin caer en afirmaciones infundadas, como las que afirman que la reducción del número de vehículos es la única medida eficaz para reducir la contaminación.

Por otro lado, la atmósfera no es un sujeto pasivo de la contaminación. Los agentes contaminantes que se vierten a la atmósfera pueden reaccionar entre sí, al menos muchos de ellos, y dar lugar a compuestos de actividad más o menos intensa y de mayor o menor nocividad. Esta sinergia o aumento de la perturbación entre compuestos se agudiza sobre todo en las grandes urbes, donde las emisiones son diversas y los agentes se mezclan al difundirse en el aire. El viento, la humedad, la inversión y las precipitaciones tienen un papel importante en el aumento o disminución de la contaminación. Pero, ¿cómo influyen los componentes atmosféricos sobre la contaminación? La respuesta es: depende. Algunos favorecen la existencia de la contaminación mientras que otros la reducen. Por ejemplo, el viento generalmente favorece la difusión de los contaminantes ya que desplaza las masas de aire en función de la presión y la temperatura. El efecto que puede causar el viento depende de los accidentes del terreno o incluso de la configuración de los edificios en las zonas urbanizadas. Al contrario que el viento, la humedad juega un papel negativo en la evolución de los contaminantes ya que favorece la acumulación de humos y polvo. Por otra parte, el vapor de agua puede reaccionar con ciertos aniones aumentando la agresividad de los mismos, por ejemplo el

trióxido de azufre en presencia de vapor de agua se transforma en ácido sulfúrico, lo mismo ocurre con los cloruros y los fluoruros para dar ácido clorhídrico y fluorhídrico respectivamente. Por otro lado, las precipitaciones en forma de agua o nieve tienen un efecto de limpieza del aire, pero, evidentemente, los contaminantes pasan a los suelos o a las aguas.

Muchos son los esfuerzos realizados para tratar de conocer mejor el origen de las emisiones contaminantes. Pero, tanto en las ciudades de Estados Unidos como en las de los países europeos u otras áreas del mundo los niveles de contaminación son elevados; este es el caso de algunas mega-ciudades, como Méjico, que supera los límites legales de contaminación por ozono más de 250 días al año (en París esto ocurre 4 ó 5 días al año).

Ante estos planteamientos, no resulta extraño que el énfasis de este trabajo se ponga en tratar de destacar algunos aspectos que pueden resultar de gran interés para el medio ambiente urbano, como la interacción de contaminantes, la atmósfera y el tráfico.

Para ello se ha elegido, a efectos de evidencia empírica, la ciudad de Madrid ya que es una urbe en la que el sector del transporte es especialmente conflictivo: no sólo produce un alto nivel de congestión y ruido, sino sobre todo de contaminación atmosférica, y muchas veces no se conocen con exactitud las repercusiones reales de las medidas de gestión de tráfico en la reducción de la contaminación.

### **3.- Metodología.**

Los índices tradicionales de calidad del aire (ICA) son elaborados, únicamente, a partir de contaminantes para determinar el nivel de polución. Por ejemplo, en el Municipio de Madrid<sup>3</sup> (que es la ciudad seleccionada para poner en práctica los desarrollos cuantitativos que se derivan de este trabajo), para cada uno de los siguientes cinco contaminantes: dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), partículas (PM<sub>10</sub>), ozono (O<sub>3</sub>) y monóxido de

3) Información metodológica publicada en [www.mambiente.munimadrid.es](http://www.mambiente.munimadrid.es)



carbono (CO) se calcula un índice, conocido como índice parcial. La calidad del aire de la zona estudiada, vendrá definida por el peor de los índices parciales de cada uno de los contaminantes, el cual se conoce como Indicador Global de Calidad Ambiental.

Ahora bien, un indicador de calidad ambiental debería considerar variables adicionales a los contaminantes propiamente dichos. Ello, obviamente implica una mayor laboriosidad y dificultad en el cómputo del índice, si bien esta cuestión puede ser resuelta acudiendo a las técnicas de reducción de la dimensionalidad, lo cual, adicionalmente, permitirá establecer indicadores parciales de calidad, así como determinar las ponderaciones de los mismos en el indicador global. Ello permitirá determinar las grandes áreas de actuación en materia de contaminación (las etiquetas de los factores extraídos) y conocer el impacto -en términos porcentuales sobre el problema global- de dichas actuaciones (las ponderaciones de los factores o índices parciales en el índice global).

No obstante, proceder de esta manera conduce, de forma natural, a una relación directa, o positiva, entre el valor del indicador y el deterioro de la calidad del aire. En otras palabras, conduce a un índice de deterioro de la calidad del aire. Sin embargo, ello no es problema alguno, puesto que se puede establecer una relación, de carácter probabilístico, entre el indicador de deterioro ambiental y su homónimo de calidad del aire. Es más, esta relación probabilística permite ciertas ventajas adicionales en lo relativo al campo de variación del índice y a su interpretación.

Ésta es la razón por la cual, en primer lugar, se definirá un IGDA para grandes ciudades y, posteriormente, se propondrá un ICA. Evidentemente, estos dos estadísticos están inversamente relacionados.

### ***3.1 Indicador global de deterioro ambiental (IGDA) para grandes ciudades.***

Como se ha comentado en la sección precedente, son muchas las variables que tienen incidencia en la calidad del aire que se respira en las grandes ciudades y, además, interactúan entre ellas. En estas circunstancias la implementación de un IGDA exige, reducción de la dimensionalidad aparte, el conocimiento de la participación de cada uno de los actores en el deterioro global. Para lograr este

objetivo se ha llevado a cabo un análisis factorial (con extracción de los factores por componentes principales).

Como es sabido, el Análisis Factorial (AF) intenta identificar variables subyacentes, o factores latentes, que expliquen la configuración de las correlaciones dentro de un conjunto de variables observadas. Su utilización, por tanto, está enmarcada en el ámbito de la reducción de la dimensionalidad, de tal manera que se identifique un pequeño número de factores (no observables) que explique la mayor parte de la varianza observada en un número mayor de variables observables. Luego, en este caso, el objetivo es encontrar aquellos factores latentes o subyacentes en la variabilidad de las variables relacionadas con la contaminación del aire.

El modelo básico de AF puede escribirse de la forma:

$$x_j - \mu_j = a_{j1}F_1 + a_{j2}F_2 + \dots + a_{jr}F_r + u_jU_j$$

donde cada variable observada centrada se expresa linealmente en función de  $r$  factores comunes (generalmente mucho menor que el número de variables) a todas las variables observadas y un factor único específico de cada variable. Los supuestos básicos que se adoptan en el modelo de AF son los siguientes:

- 1) Tanto los factores comunes como los factores únicos se suponen (sin pérdida de generalidad, puesto que en la práctica son desconocidos) con media nula y varianza unidad.
- 2) Los factores únicos se suponen incorrelacionados entre sí y con los factores principales.
- 3) También se supone que los factores comunes están incorrelacionados entre sí. La extracción de los factores se ha llevado a cabo por el método de componentes principales<sup>4</sup> y el número de factores que se extraen obedece al criterio de autovalor mayor que la unidad. Como es sabido las soluciones factoriales no son únicas, por lo cual la rotación

4) En el Análisis de Componentes Principales (ACP) se puede proceder a la descripción lineal de las  $p$  variables originales en términos de las  $p$  componentes o factores donde cada una de estas componentes se extrae de tal manera que hacen máxima su contribución a la suma de las varianzas de las variables originales. No obstante, aunque dicha descripción lineal puede llevarse a cabo, el objeto principal del ACP es la "explicación de la varianza de las variables originales".

de los factores permite una mejor interpretabilidad de los mismos. Pues bien, los factores extraídos han sido rotados mediante una rotación varimax en su versión normalizada, que consiste en la obtención de una matriz de transformación **T** tal que se maximice la suma de las simplicidades de todos los factores.

Ello implicará la obtención de cargas factoriales próximas a la unidad a costa de otras próximas a cero, lo cual facilitará enormemente la interpretabilidad de los factores comunes. La rotación varimax puede entenderse gráficamente como una rotación ortogonal de ejes perpendiculares que tienden a pasar por la nube de puntos, es decir, que fuerza a que alguna de las cargas sea o cero o uno.

Pues bien, a través del AF de un numeroso elenco de variables observadas se determinan los factores “culpables” del deterioro de la calidad del aire, construyéndose un IGDA a partir de la combinación ponderada de dichos factores o indicadores parciales. Las ponderaciones obedecen a la cuota de participación de cada factor en la variabilidad de las variables observadas incluyendo la condición de que sumen la unidad.

### **3.2 Índice de Calidad Ambiental para grandes ciudades (ICA).**

El IGDA muestra, de manera directa, el detrimento del aire en las grandes ciudades a causa de la contaminación, e indirectamente el riesgo para la población por dicho motivo. Cuanto más alto sea su valor mayor será el nivel de contaminación. Ahora bien:

- a) No proporciona información objetiva sobre la calidad del aire, sino sobre lo contaminado que se encuentra.
- b) Su campo de variación no está perfectamente acotado, ya que, como las variables involucradas en los distintos componentes del mismo se incluyen en forma estandarizada, el IGDA sigue un modelo de distribución de probabilidad (habitualmente Gaussiano) con media nula, siendo la varianza la que se desprende de la agregación combinada de las variables originales. Ello implica que su rango de valores dependa del modelo probabilístico y que sea  $(-\infty, +\infty)$  en caso de normalidad.

- c) Su interpretación no atiende a los criterios de facilidad y coherencia. En otras palabras, los valores contenidos en su campo de variación resultan de difícil interpretación, no tanto en lo que a su signo se refiere, pero sí en lo relativo a su nivel.

Pues bien, la construcción de un ICA que cumpla con el requisito de medir la calidad del aire, y no su nivel de deterioro, y supere las limitaciones del IGDA se puede llevar a cabo utilizando la Teoría de la Probabilidad. En concreto, definiendo el ICA como:

$$ICA=1-F_{IGDA}(\omega)$$

siendo  $F_{IGDA}(\omega)$  el valor de la función de distribución del IGDA cuando  $IGDA=\omega$ , se tiene que:

- a) El campo de variación del ICA es  $[0,1]$  sea cual sea el modelo probabilístico que se considere, lo cual facilita las comparaciones temporales y espaciales.
- b) Un valor nulo del índice indica el peor nivel de calidad ambiental posible y un valor unitario el mejor. A medida que aumenta el valor del índice aumenta el nivel de la calidad ambiental. Por consiguiente, su interpretabilidad es muy sencilla.
- c) En caso de normalidad, así como en otros casos en los que la distribución de probabilidad resultante verifique ciertos criterios de regularidad, los valores comprendidos entre 0,2 y 0,8 implicarán variaciones de la calidad ambiental fácilmente percibidas por los ciudadanos, mientras que, dada la saturación de la función de distribución en las colas de la misma, valores cercanos a la unidad significarán una calidad ambiental tan buena que una pequeña variación de la misma no será percibida por la población. Lo contrario ocurre cuando el valor está cercano a cero. Esta última circunstancia lleva a que el ICA atienda escrupulosamente al criterio de coherencia.

## **4.- El caso de una gran urbe: la ciudad de Madrid.**

Debido a los efectos nocivos que la contaminación atmosférica provoca sobre la salud (en últimos años la contaminación se ha convertido en una gran amenaza a nivel mundial), para el estudio de

la contaminación atmosférica en una “urbe tipo” se ha seleccionado la ciudad de Madrid (capital de España), tercer municipio más poblado en la Unión europea, y que está sufriendo un proceso de sub-urbanización rápido donde la población y el empleo emigran a la ciudad. Este proceso produce un modelo de movilidad continuo y muy dependiente del transporte. En la pasada década el número de vehículos en Madrid aumentó en un 5,6%. Un millón de conductores entra y sale diariamente a la ciudad, por lo que la contaminación vía automóvil está aumentando, así como sus impactos ambientales negativos. Sin embargo, la contaminación atmosférica en Madrid también puede ser atribuida a otros factores, como los locales comerciales y sistemas de calefacción durante el invierno, entre otros. Actualmente, en Madrid funcionan más de 1.200 calderas de carbón.

#### **4.1 Base de datos y variables incluidas en la base.**

La base de datos utilizada en la aplicación llevada a cabo contiene tanto contaminantes como otras variables, de carácter atmosférico, si bien también incluyen el tráfico, con incidencia en la calidad del aire, que son emisiones de polución. Y es que los contaminantes no actúan de manera individual en el medio, sino que, interactúan, por un lado, entre ellos y por otro, en el medio que les rodea, es decir, en la atmósfera. La atmósfera no es un sujeto pasivo de la contaminación, sino más bien al contrario, todos los fenómenos meteorológicos pueden jugar un papel importante en la evolución de los contaminantes en la atmósfera y, por lo tanto, algunos aspectos relacionados con estos fenómenos deben tenerse en cuenta.

En cuanto a los contaminantes, la información utilizada proviene la Red de Vigilancia de la Calidad del Aire<sup>5</sup> que cuenta actualmente con 25 estaciones de monitoreo operando en el municipio de Madrid. Siguiendo las directivas de Unión Europea, en este artículo se han considerado, para el período muestral 2000-2008, datos diarios para los seis agentes contaminadores siguientes: dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO), óxido de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) – término genérico para óxidos de nitrógeno (el óxido nítrico (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>)), partículas en

5) [www.mambiente.munimadrid.es/](http://www.mambiente.munimadrid.es/)

suspensión, en este caso de 10 micras de diámetro (PM<sub>10</sub>) y ozono a nivel terrestre (O<sub>3</sub>). En total, 600.000 observaciones.

En lo que se refiere a la información atmosférica<sup>6</sup> (más tráfico), las variables consideradas son las siguientes: presión a nivel del mar (P.Mar), media de la temperatura máxima (T<sub>x</sub>), media de la temperatura mínima (T<sub>n</sub>), número de horas de insolación (H.Sol), humedad (T.Vap), precipitaciones (Precipitaciones), precipitaciones máximas (Pre.Max), número de días con lluvia (nr), viento (Viento) y tráfico rodado (Total.Vehículos). A diferencia del conjunto de variables contaminantes, la frecuencia de estas series es mensual, lo cual obliga a la mensualización de las variables del primer grupo (de frecuencia diaria).

La referencia temporal considerada en este trabajo es el período 2000-2008, ambos años inclusive.

Enumeradas las variables que componen la base de datos, a continuación se procede a su definición.

El SO<sub>2</sub> es un gas incoloro y no inflamable, perteneciente al grupo de los contaminantes primarios gaseosos, producido principalmente de la combustión de las sustancias fósiles que contienen el azufre, como el carbón y el aceite, calefacciones y quemadores que empleen carbón y gasóleo y vehículos Diesel. En ciudades grandes dos terceras partes de este contaminante es originado en los sectores residenciales, comerciales e institucionales. Pero, en la actualidad, su nivel es considerado debajo de los límites corrientes legales. Sus principales efectos sobre la salud son: irritación a la vista y aumento de enfermedades respiratorias.

El CO es un gas inodoro, incoloro, insípido e inflamable, perteneciente al grupo de los contaminantes primarios gaseosos, producido mayoritariamente en los procesos de combustión en lo que ésta es incompleta, es el contaminante que más abunda. Sus principales fuentes de emisión en las grandes urbes son los vehículos a motor. Tiene efectos muy tóxicos sobre las personas (puede causar la muerte por asfixia), directos sobre los sistemas circulatorio y respiratorio, dolores de cabeza, perturbaciones psíquicas y de memoria, disminución de reflejos, etc.

6) La información relativa a las variables atmosféricas ha sido tomada de [www.agimec.com](http://www.agimec.com). La referente al tráfico rodado procede de [www.dgt.es](http://www.dgt.es)

Los NO<sub>x</sub> provienen de procesos de combustión a altas temperaturas y también pertenecen al grupo de los contaminantes primarios gaseosos. El NO es un gas incoloro, inodoro, tóxico y no inflamable y el NO<sub>x</sub> es de color rojizo, no inflamable y tóxico. Su principal fuente de emisión en las grandes ciudades son los vehículos a motor. Los efectos que producen en la salud son desde irritación de ojos, nariz y bronquios. En grandes cantidades pueden causar edema y muerte. Además, se les atribuye efectos cancerígenos.

Las PM<sub>10</sub> tienen distintas procedencias y composiciones. Es un contaminante primario sólido. Las principales fuentes de emisión son los procesos de combustión de fuel, gas-oil, alquitranes, polvo del suelo, incendios, etc. Sus efectos sobre la salud están directamente relacionados con el aparato respiratorio: irritación del sistema respiratorio, fijación en los alvéolos pulmonares, asma y tumores bronquiales. Además interfieren en la fotosíntesis de la plantas, causan el ennegrecimiento de edificios y bienes de uso y potencian el efecto de otros contaminantes gaseosos.

El O<sub>3</sub> es un contaminante secundario. El más característico de origen fotoquímico. Es un gas incoloro de olor picante y de gran poder oxidante, producido por la acción de la radiación solar al incidir sobre las capas bajas de la atmósfera en presencia de óxidos de nitrógeno. En dosis altas y continuas puede lesionar el sistema nervioso central, afectar a la vista, sistemas respiratorio y circulatorio y acelerar la calcificación de los huesos.

La presión atmosférica (en este caso medida a nivel del mar) es causada por moléculas de aire que chocan tanto entre sí como con otros objetos y rebotan. Es función del número de moléculas atmosféricas en un determinado volumen y la velocidad a la que se desplazan. Cuando el aire está confinado dentro de ciertos límites, el calentamiento aumenta su presión y el enfriamiento la disminuye.

La temperatura atmosférica es el indicador de la cantidad de energía calorífica acumulada en el aire. Aunque existen otras escalas para otros usos, la temperatura del aire se suele medir en grados centígrados.

El viento es el elemento básico en la circulación general de la atmósfera. Todos los movimientos del viento, desde ráfagas

pequeñas hasta grandes masas de aire, contribuyen al transporte del calor y de otras condiciones de la atmósfera alrededor de la Tierra.

Se denomina humedad ambiental a la cantidad de vapor de agua presente en el aire. La presión de vapor o tensión de vapor es uno de los modos de estimar la cantidad de vapor de agua contenida en el aire. Se expresa como una presión, en pascales.

Se denomina precipitación al agua procedente de la atmósfera, y que en forma sólida o líquida se deposita sobre la superficie de la tierra. Viene expresado en mm.

Por tráfico se entiende la circulación de vehículos en una determinada área. Resulta de interés, ya que el tráfico rodado provoca el 80% de la contaminación de las grandes ciudades. Ello se debe especialmente a una pequeña porción (20%) de vehículos que son "altamente contaminantes".

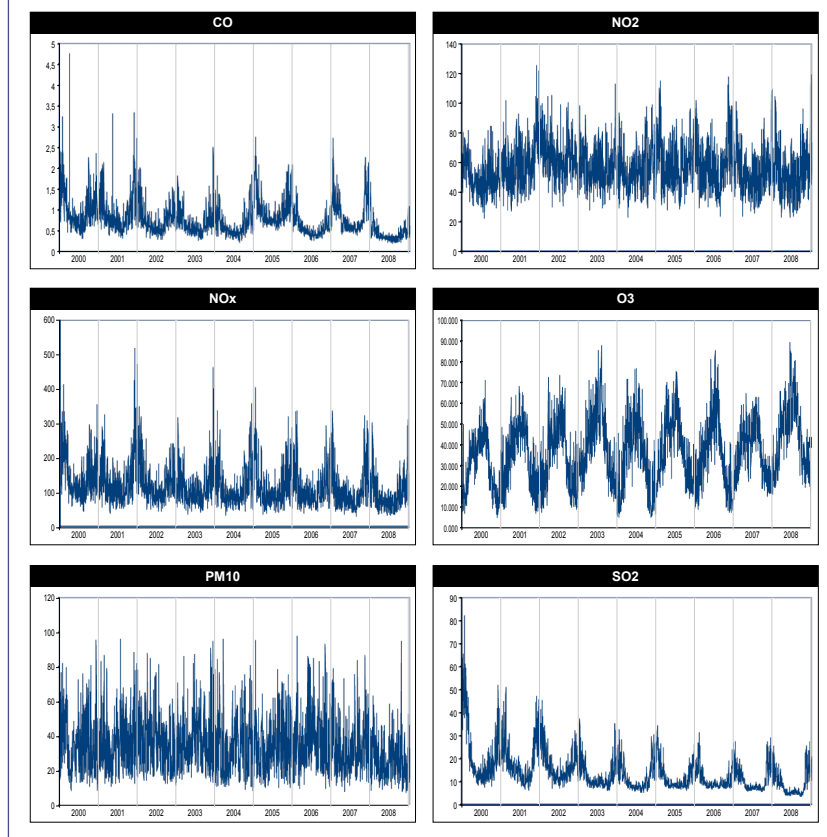
#### ***4.2 Análisis exploratorio de la información.***

Definidas las variables que componen la base de datos creada para analizar el caso de Madrid, a continuación se procede, en primer lugar, al análisis exploratorio de las series temporales diarias de las variables "contaminantes" en el período comprendido entre enero de 2000 y diciembre de 2008. Puede observarse (véase Figura 1) en cada uno de los contaminantes un fuerte componente estacional, ya que, en todos los años, durante los meses de otoño e invierno el nivel de estos contaminantes es más alto que en el resto de los meses. Además también se aprecia una ligera tendencia decreciente en todos los contaminantes excepto el O<sub>3</sub>, el cual muestra una leve inercia ascendente.

Al hacer referencia a la evolución diaria de los contaminantes cabría preguntarse si el comportamiento diario que éstos tienen sigue el mismo patrón los siete días de la semana, porque es lógico pensar en la existencia de un comportamiento diferente en sus niveles durante los días laborales y durante los fines de semana. Para poder estimar si este efecto de los días de la semana es significativo o no, se crea una variable ficticia binaria que toma el valor uno en días laborales y el valor cero en fines de semana. Los resultados muestran que el parámetro estimado de esta variable artificial, la



**Figura 1.**  
**Evolución diaria de los diferentes contaminantes**  
**(2000-2008).**



Fuente: Elaboración propia.

cual mide el efecto de los días laborales de la semana, es estadísticamente significativo en todos los casos excepto en el ozono ( $O_3$ ), y además es positivo. Esto implica que, para cinco de seis contaminantes, el nivel medio estimado durante los días laborales es mayor que durante los fines de semana. Las cantidades estimadas que señalan esa mayor contaminación (los denominados efectos de los factores) son las siguientes: un 11,4% para el  $CO$ , un 11,6% para el  $NO_2$ , un 0,09% para el  $NO_x$ , un 0,06% para el  $PM_{10}$  y un 0,028% para el  $SO_2$ . Los mayores valores estimados (en términos porcentuales) se corresponden a los contaminantes  $CO$  y  $NO_2$ , ya que estas variables se asocian normalmente al tráfico rodado y este disminuye durante los fines de semana.

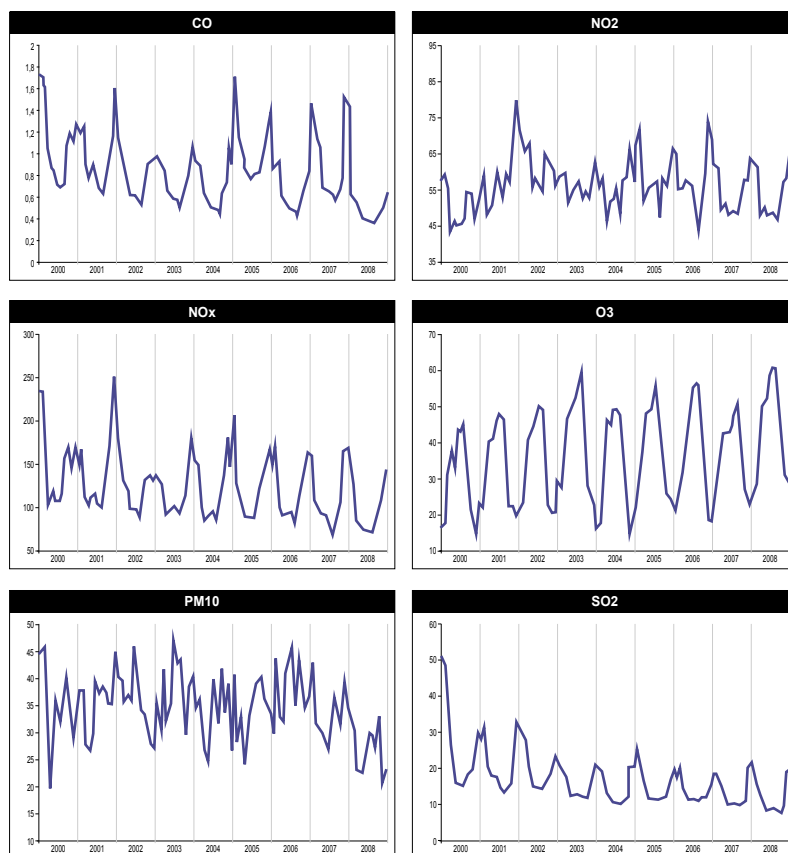
Dicho lo anterior, y debido a que el resto de las variables que se utilizan para la elaboración del IGDA y el ICA se presentan con periodicidad mensual, se agregarán los contaminantes mensualmente. De esta forma se consigue homogeneizar la base de datos.

Es importante señalar que la información de las variables de carácter atmosférico tan solo está disponible de manera gratuita en frecuencia mensual. Es por ello que los resultados que se obtengan del IGDA y el ICA resultantes tendrán también dicha periodicidad. Evidentemente, dicha periodicidad hace que se pierda gran parte de la utilidad del índice, pero, recuérdese, lo importante en este trabajo es la metodología de construcción de ambos indicadores. En caso de que se deseara obtener datos de alta frecuencia lo único que habría que hacer es aplicar los métodos aquí expuestos con las variables atmosféricas en frecuencia diaria u horaria, por ejemplo.

Hecho el anterior inciso, si se agregan mensualmente los datos, Figura 2, se sigue apreciando, al igual que en la Figura 1, un claro componente estacional y una tendencia decreciente más pronunciada en el CO, NO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, y SO<sub>2</sub> y menos acentuada en el PM<sub>10</sub>, mientras que en el O<sub>3</sub> muestra una leve tendencia creciente.

Si cuando se utilizaban datos diarios era lógico estimar el efecto de los días de la semana en los diferentes contaminantes, con datos mensuales es natural intuir la influencia de las épocas lluviosas y/o frías (debido a la fuerte componente estacional) y estimar el aumento del CO, NO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub> y O<sub>3</sub> en los meses de otoño e invierno respecto del nivel medio de la serie. Para ello, se crea una nueva variable artificial que tome valor uno en dichos meses y cero en el resto. Los resultados de la estimación muestran que el parámetro estimado para esta variable artificial no es significativo para el PM<sub>10</sub>. Sin embargo, en el resto de los contaminantes sí que es significativo, siendo en los meses de otoño e invierno el nivel medio estimado del CO, NO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, y SO<sub>2</sub> mayor en un 49,5%, 13,7%, 44,3% y 58,5% respectivamente respecto del resto de los meses y un 65,7% menor para el O<sub>3</sub>.

**Figura 2.**  
**Evolución mensual de los diferentes contaminantes**  
**en Madrid (2000-2008).**



Fuente: Elaboración propia.

Este componente estacional, que muestran las series, junto con su correspondiente tendencia implican que aunque se hayan agrupado los datos mensualmente, la serie sigue sin ser estacionaria y, por lo tanto, para evitar los problemas estadísticos derivados de esta no estacionariedad es necesario transformar estas variables no estacionarias. La razón por la cual es necesaria la transformación de series no estacionarias en estacionarias se centra en el hecho de que la regresión, que se estime para determinar la relación que puede existir entre distintas variables explicativas (atmosféricas y tráfico) y las variables dependientes (los contaminantes), puede ser espuria y, consecuentemente, las

distribuciones estadísticas de los estimadores, si las variables no son estacionarias, pueden no ser aplicables. En este caso, debido a que la serie no es estacionaria en media (tiene tendencia y un claro patrón estacional mensual) ni en varianza (las dispersiones no se mantienen constantes), se calculará una diferencia estacional de la serie en logaritmos para transformar las diferentes series en estacionarias, es decir, se trabajará con la tasa interanual de cada una de las variables y, por tanto, los coeficientes estimados serán interpretados como elasticidades.

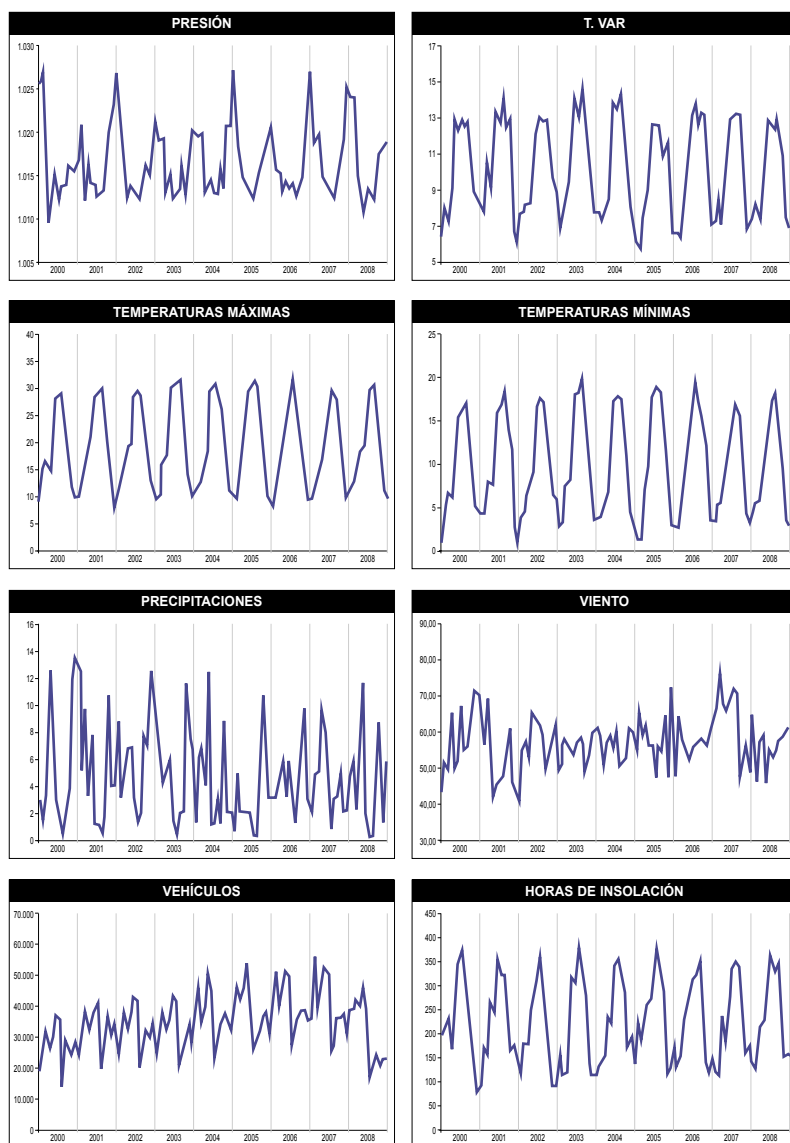
Si además, como se ha resaltado anteriormente, durante los meses de otoño e invierno el comportamiento de los contaminantes es diferente al resto de los meses, entonces, ya que el incremento de estos contaminantes no es una situación deseable, será necesario buscar que variables influyen en él, con el objetivo de "controlar" el nivel de estos contaminantes a través de variables que contribuyan a su aumento o a su disminución. Por esta razón, en la siguiente sección se procederá al análisis de estas variables.

Por lo que se refiere al comportamiento mensual de las variables de carácter atmosférico (además del tráfico rodado), éste puede observarse en la Figura 3. De su análisis se desprende su carácter no estacionario ya que muestran tendencia y un componente estacional.

El análisis gráfico de la relación existente entre los contaminantes y las distintas variables explicativas, se lleva a cabo mediante un diagrama de puntos. En este caso, ya que el CO es una de las variables más representativas, pues haciendo un análisis factorial por componentes principales de los seis contaminantes estudiados, el CO es capaz de recoger el 60,4% de la variabilidad conjunta, y con el fin de evitar la representación de la relación de cada uno de los contaminantes con cada una de las variables explicativas, se va a utilizar sólo como ejemplo el CO. No obstante, los resultados obtenidos para el CO son extensibles al resto de contaminantes.

Observando la Figura 4, se puede apreciar que existe una relación lineal positiva del CO con la presión a nivel del mar y con el número de vehículos, una relación lineal negativa con las temperaturas medias (máxima y mínima), la humedad y las

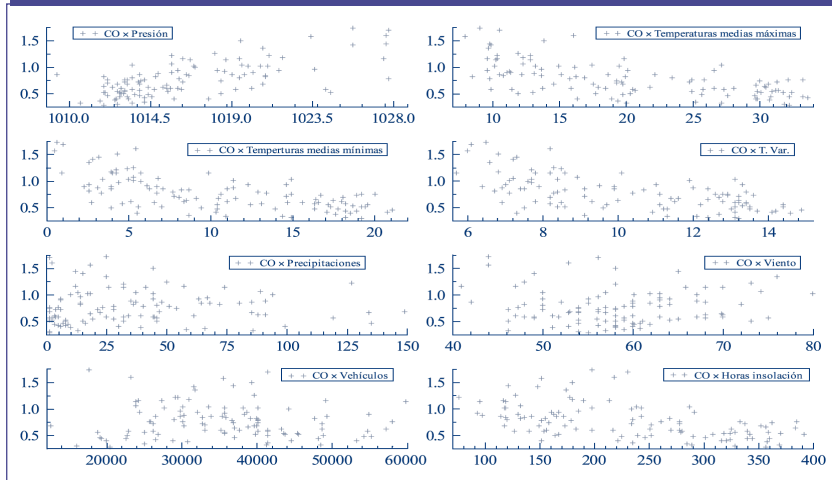
**Figura 3.**  
**Evolución mensual media de los diferentes variables que influyen en los contaminantes.**  
**Período muestral: 2000-2008. Municipio de Madrid.**



Fuente: Elaboración propia.

horas de insolación. La relación lineal del CO con las precipitaciones y el viento no parece muy clara, según estos diagramas de puntos.

**Figura 4.**  
**Relación de las variables atmosféricas y del tráfico rodado con el CO.**



Fuente: Elaboración propia.

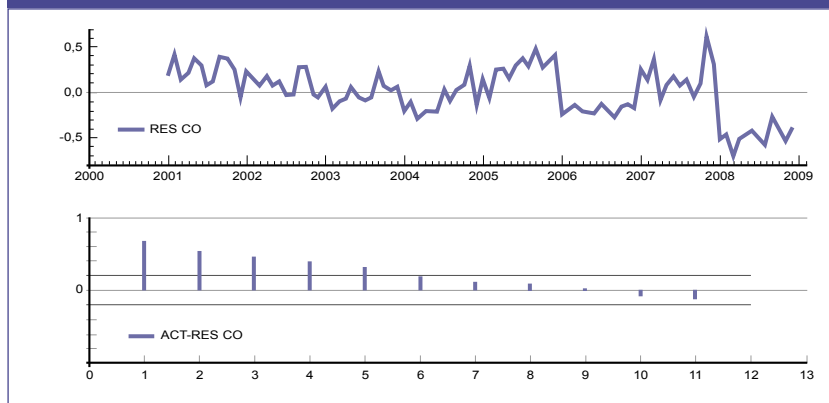
Además, a partir de los gráficos de la Figura 4, se puede estimar por mínimos cuadrados ordinarios la relación que existe entre el CO y las variables atmosféricas y el tráfico rodado. Los resultados obtenidos son los siguientes:

<b>Modelización del CO por Mínimos Cuadrados Ordinarios</b>				
<b>Período muestral: 2000 (1) a 2008 (12).</b>				
	<b>Coficiente</b>	<b>Error estándar</b>	<b>t-valor</b>	<b>p-valor</b>
Presión	0,148474	0,2320	0,640	0,524
Temp. máximas	0,174975	0,4425	0,395	0,693
Temp. mínimas	-0,302377	0,1588	-1,90	0,060
T. Var.	0,038728	0,3652	0,106	0,916
Precipitaciones	-0,088927	0,04896	-1,82	0,073
Días lluvia	0,019389	0,07685	0,252	0,801
Viento	-0,074715	0,2246	-0,333	0,740
Vehículos	0,187908	0,1093	1,72	0,089
Horas insolación	-0,520857	0,2155	-2,42	0,018
sigma	0,283509	RSS		6,99283967
log-verosimilitud	-10,4839	DW		0,62
Nº observaciones	96	Nº de parámetros		9
Test AR 1-6: F(6,81) = 16,791 [0,0000]**				

Fuente: Elaboración propia.

Al analizar los resultados de esta regresión, se puede observar que existe un problema de autocorrelación, ya que así lo muestran los estadísticos Durbin-Watson (DW) y AR, por lo tanto las estimaciones no serían eficientes. La Figura 5, residuos escalados, también muestra la existencia de autocorrelación.

**Figura 5.**  
**Residuos escalados.**



Fuente: Elaboración propia.

Este hecho que ocurre con el CO, también sucede con el resto de los contaminantes, razón por la cual en todos los casos el procedimiento de estimación ha sido el de mínimos cuadrados generalizados, con el fin de obtener estaciones eficientes de los parámetros. Los resultados de la estimación para los diferentes contaminantes se ofrecen de forma resumida en la siguiente tabla:

**Tabla 1.**  
**Resultados de la estimación de cada uno de los contaminantes sobre cada una de las variables explicativas.**

Variables explicativas	CONTAMINANTES					
	CO	NO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	O <sub>3</sub>	PM <sub>10</sub>	SO <sub>2</sub>
CO t-1	0,696 (0,06)					
NO <sub>2</sub> t-1		0,433 (0,08)				
NO <sub>x</sub> t-1			0,468 (0,08)			
O <sub>3</sub> t-1				0,457 (0,09)		
PM <sub>10</sub> t-1					0,367 (0,085)	
SO <sub>2</sub> t-1						0,666 (0,05)
Presión a nivel del mar	0,202 (0,15)	0,453 (0,09)	0,723 (0,15)	-0,017 (0,13)	0,445 (0,14)	0,634 (0,15)
Temperaturas medias Máximas	0,301 (0,32)	0,071 (0,14)	0,055 (0,25)	0,598 (0,28)	0,671 (0,25)	-0,207 (0,29)
Temperaturas medias mínimas	-0,311 (0,11)	-0,144 (0,053)	-0,258 (0,09)	0,075 (0,10)	-0,239 (0,09)	-0,105 (0,10)
Humedad	0,427 (0,254)	0,236 (0,11)	0,487 (0,19)	-0,955 (0,22)	0,054 (0,19)	0,268 (0,23)
Precipitaciones	0,002 (0,03)	-0,001 (0,015)	0,007 (0,02)	-0,029 (0,03)	-0,032 (0,02)	0,001 (0,03)
Número de días de lluvia en el mes	-0,068 (0,05)	-0,012 (0,02)	-0,063 (0,04)	0,111 (0,047)	-0,025 (0,04)	-0,109 (0,05)
Viento	-0,083 (0,153)	-0,268 (0,07)	-0,277 (0,11)	0,026 (0,132)	-0,208 (0,12)	-0,055 (0,13)
Vehículos	0,056 (0,074)	0,029 (0,034)	0,065 (0,05)	0,053 (0,06)	0,039 (0,05)	0,177 (0,067)
Horas de insolación	-0,319 (0,155)	-0,092 (0,07)	-0,255 (0,12)	0,300 (0,13)	-0,348 (0,12)	-0,213 (0,14)
R <sup>2</sup> (Coeficiente de determinación)	<b>0,76</b>	<b>0,60</b>	<b>0,76</b>	<b>0,82</b>	<b>0,64</b>	<b>0,83</b>

Fuente: Elaboración propia.

(1) Los valores de esta tabla son los coeficientes estimados.

(2) Entre paréntesis la desviación típica estimada para cada uno de los parámetros.

(3) La variable aparece con el subíndice t-1 se introduce para indicar la influencia de cada variable por su pasado inmediato.

En cada uno de los modelos de regresión estimados para los diferentes contaminantes se ha introducido como variable explicativa el contaminante en el período anterior. De los resultados de las estimaciones se pueden obtener algunas conclusiones con carácter general para los seis contaminantes. Entre ellas se destaca las siguientes:

- (i) El valor parámetro estimado para cada una de las variables es estadísticamente significativo y positivo, lo que implica que existe una importante dependencia de cada uno de los contaminantes respecto del comportamiento que ha tenido en el período anterior (es decir, si en un mes, o en un día, o en una hora, aumenta/disminuye, tiende a aumentar/disminuir en el mes o día siguiente).
- (ii) En cada una de las regresiones estimadas no todas las variables incluidas en la regresión ejercen una influencia estadísticamente significativa en los diferentes contaminantes. Una de las razones por la que puede producirse este hecho es que algunas de las variables explicativas están correlacionadas entre sí. Así, si se analiza la matriz de correlaciones de las variables explicativas, existe una elevada correlación entre las temperaturas medias máximas, mínimas, la humedad y las horas de insolación, por un lado, y, por otro, correlación significativa y positiva entre las precipitaciones y el número de días de lluvia, lógicamente, y correlación significativa y negativa entre las precipitaciones y el número de horas de insolación. Respecto del tráfico rodado se puede decir que ejerce una influencia positiva pero de diferente cuantía para cada uno de los contaminantes.

### ***4.3 Construcción de un Indicador global de deterioro ambiental (IGDA).***

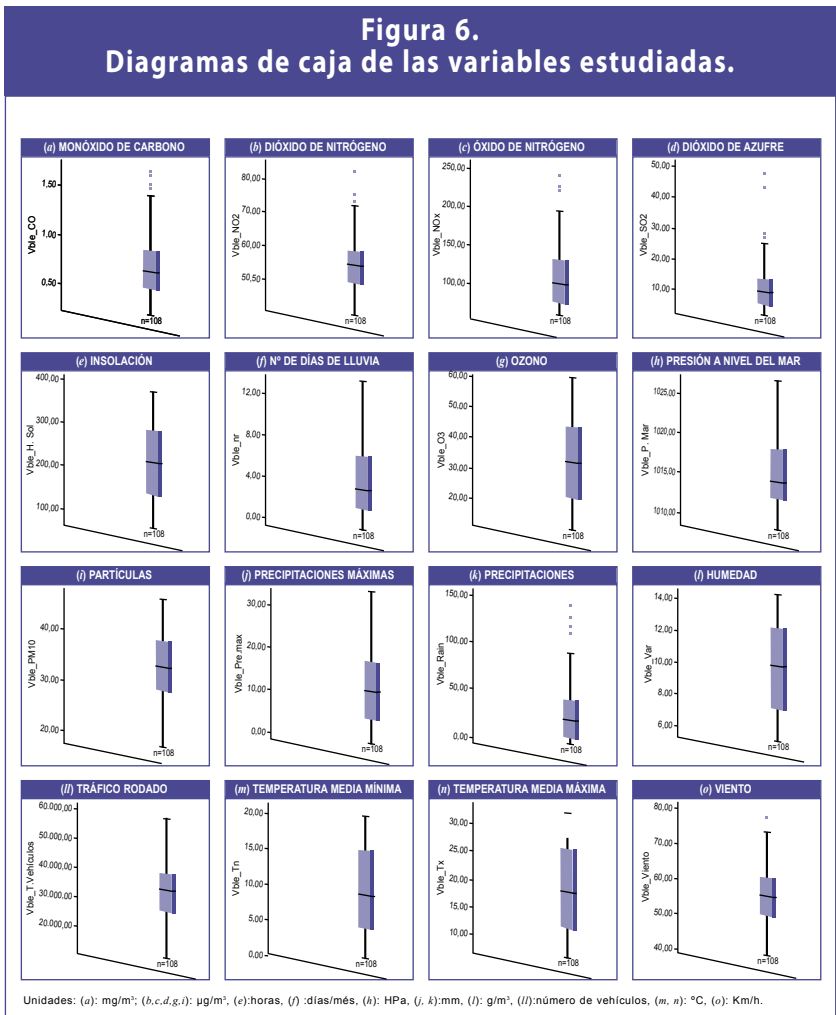
Una vez que se han estudiado las relaciones de los contaminantes entre los agentes atmosféricos y el tráfico, confirmándose que la atmósfera no es un sujeto pasivo de la contaminación, sino más bien, todo lo contrario, a veces para favorecerla y otras para reducirla, el objetivo de esta sub-sección es construir un indicador que sea capaz de resumir, de manera fiable y adecuada, la información relativa a la contaminación de Madrid.



Esta síntesis, es una forma de determinar la situación actual y las tendencias en la capacidad del ambiente para sustentar la salud ecológica y humana.

Para obtener este indicador, que será una síntesis de las variables anteriormente definidas, se han representado los diagramas de caja de cada una de ellas en la Figura 6, donde se pueden observar, de manera sucinta y clara, sus principales estadísticos.

Tipificadas las anteriores variables, se lleva a cabo un AF extrayendo los factores por el procedimiento de componentes



Fuente: Elaboración propia.

principales. Obviamente, como uno de los requisitos para que tenga sentido llevar a cabo un AF es que las variables originales presenten niveles de correlación, previo al AF se ha calculado el índice de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO), que, para la información disponible, toma un valor de 0,828, por lo que, según Kaiser (1974), puede interpretarse como “meritorio”.

Los resultados obtenidos han sido ciertamente satisfactorios ya que el número de factores latentes resultantes es menos de la tercera parte del número de variables observadas. Concretamente, con cinco componentes (criterio de autovalor mayor que la unidad) se puede explicar el 91,71% de la variabilidad observada en las variables iniciales (Tabla 2 y Figura 7). La solución factorial inicial ha sido rotada posteriormente en aras de una mejor interpretación de los factores.

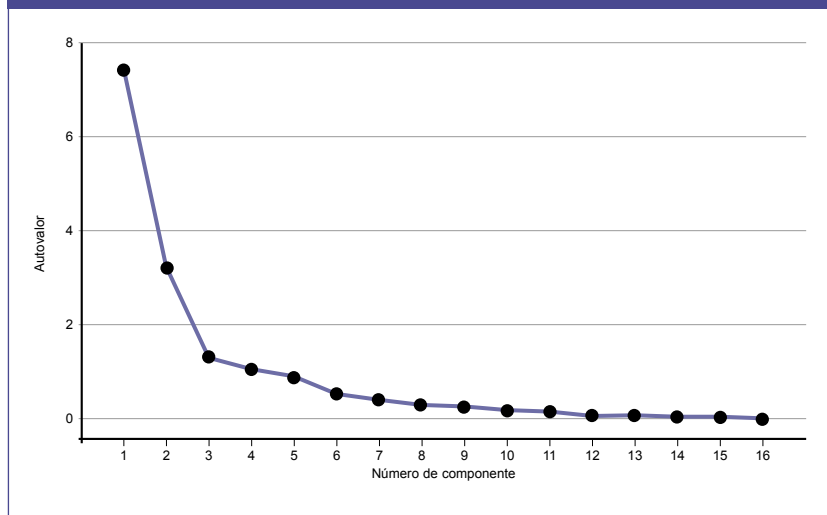
Las comunalidades, que son estimaciones de la cantidad de varianza en cada variable recogida con los factores extraídos,

**Tabla 2**  
**Varianza total explicada.**

Componentes	Autovalores iniciales			Sumas de las saturaciones al cuadrado de la extracción			Suma de las saturaciones al cuadrado de la rotación		
	Total	% de la varianza	% acumulado	Total	% de la varianza	% acumulado	Total	% de la varianza	% acumulado
1	7,409	46,303	46,303	7,409	46,303	46,303	6,922	46,303	46,303
2	3,245	20,284	66,587	3,245	20,284	66,587	3,112	20,284	66,587
3	1,509	10,181	76,768	1,509	10,181	76,768	1,543	10,181	76,768
4	1,369	7,683	84,452	1,369	7,683	84,452	1,199	7,683	84,452
5	1,191	7,262	91,713	1,191	7,262	91,713	1,162	7,262	91,713
6	0,541	1,800	93,514						
7	0,414	1,500	95,014						
8	0,293	1,233	96,247						
9	0,271	1,000	97,247						
10	0,182	0,837	98,084						
11	0,164	0,701	98,784						
12	0,072	0,440	99,224						
13	0,063	0,391	99,616						
14	0,041	0,256	99,872						
15	0,018	0,112	99,984						
16	0,003	0,016	100,000						

Fuente: Elaboración propia.

**Figura 7.**  
**Gráfico de sedimentación.**



Fuente: Elaboración propia.

se presentan en la Tabla 3. Obsérvese que las comunidades son, todas ellas, ciertamente elevadas, lo cual indica que los factores extraídos tienen un gran potencial a la hora de representar la variabilidad de las variables originales.

Por último, para confirmar la elección de cinco factores para la elaboración del IGDA, se han rotado los factores obtenidos en la solución inicial. La rotación que se ha llevado a cabo es la Varimax, en su versión estandarizada, dadas sus conocidas ventajas a la hora de interpretar los factores.

**Tabla 3:**  
**Comunalidades.**

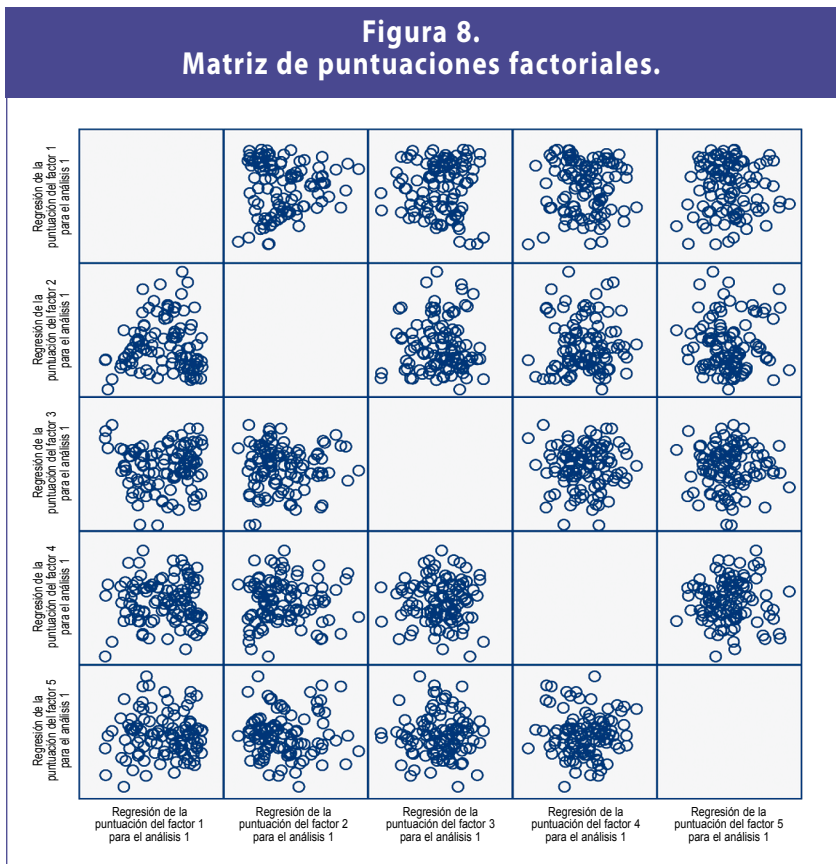
	Inicial	Extracción
CO	1,000	,806
NO <sub>2</sub>	1,000	,729
NO <sub>x</sub>	1,000	,941
O <sub>3</sub>	1,000	,868
PM <sub>10</sub>	1,000	,885
SO <sub>2</sub>	1,000	,815
P.Mar	1,000	,807
Tx	1,000	,985
Tn	1,000	,976
T.Var	1,000	,913
Rain	1,000	,953
nr	1,000	,845
Pre.Max	1,000	,736
Viento	1,000	,912
Total.Vehí	1,000	,895
Horas_Sol	1,000	,871

Fuente: Elaboración propia.

Según la matriz de componentes rotados, el ozono y las variables solares -horas de sol, temperaturas medias máximas y mínimas (favorecen la contaminación del aire y el incremento de ozono), y la humedad (favorece la acumulación de humos y polvo)- están altamente correlacionados con el primer factor, presentando una correlación muy escasa con los otros cuatro.

El segundo factor, que podría denominarse “precipitaciones”, está altamente correlacionado con las precipitaciones, número de días con lluvias y precipitaciones máximas. Este factor tiene un efecto de limpieza del aire, aunque, desafortunadamente los contaminantes pasan a los suelos o a las aguas.

El tercer factor será denominado “contaminantes primarios” por las variables que lo componen. Está fuertemente correlacionado con el CO, NO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, PM<sub>10</sub>, SO<sub>2</sub> y la presión a nivel del mar.



Fuente: Elaboración propia.

El cuarto factor se identifica con el total de tráfico rodado, que es una de las mayores fuentes de emisión de contaminantes.

Por último, el quinto factor se identifica con la variable "viento", que, generalmente, favorece la difusión de los contaminantes ya que desplaza las masas de aire.

A la vista de la matriz de puntuaciones factoriales (Figura 8) se puede deducir la incorrelación entre los factores extraídos (la primera representación de la primera fila muestra la primera componente sobre el eje vertical frente a la segunda componente sobre el eje horizontal, y así sucesivamente).

Obtenidos los factores, se elaborarán unos sub-inidcadores que, además de servir como instrumentos exploratorios de la base de datos, se utilizarán en la construcción del IGDA.

Estos sub-indicadores obedecen a la expresión

$$IGC_i = \sum_{j=1}^n a_j X_j$$

siendo  $X_j$  las variables incluidas en cada sub-indicador (las relacionadas con el factor correspondiente) y  $a_j$  sus ponderaciones.

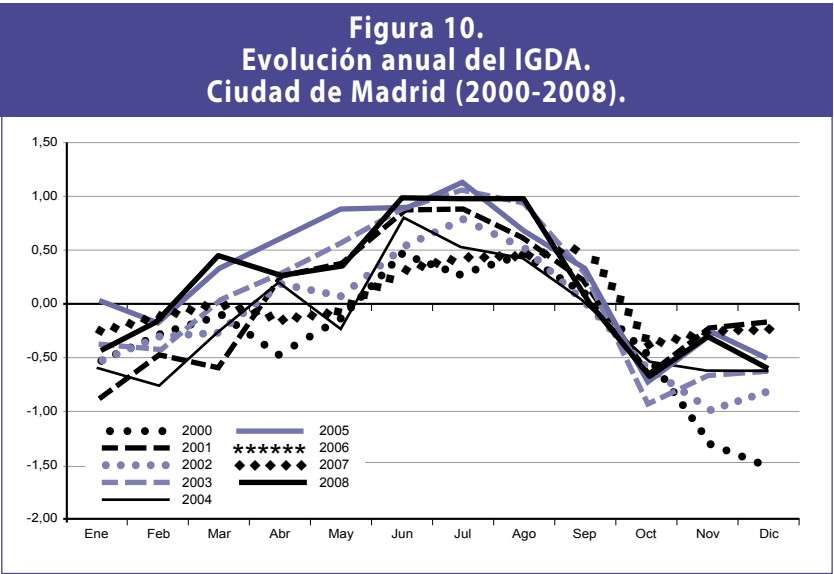
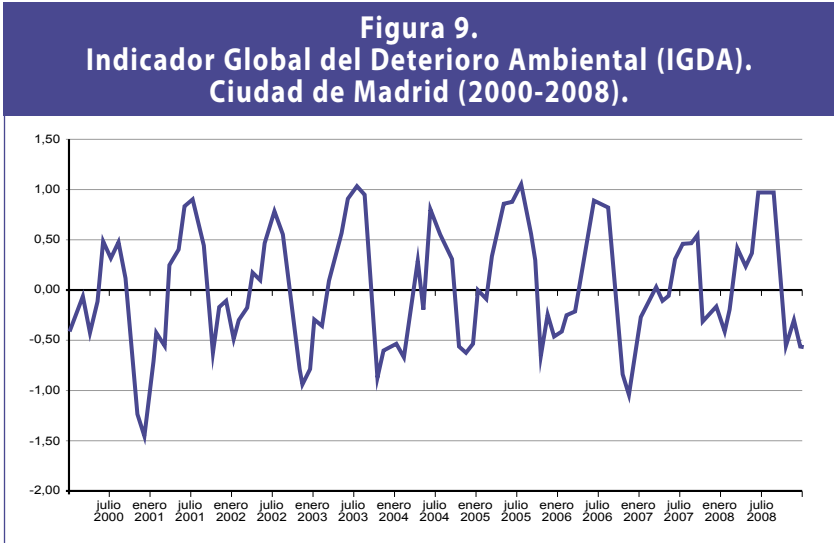
A partir de estos sub-indicadores, se construye el Indicador global de deterioro ambiental que se define como:

$$IGDA = \sum_{i=1,3,4} IGC_i - \sum_{i=2,5} IGC_i$$

ya que los factores 2 y 5 tienen un efecto limpieza de las áreas contaminadas.

Los resultados del IGDA en la ciudad de Madrid, durante el período 2000-2008, se ofrecen, de forma gráfica, en la Figura 9.

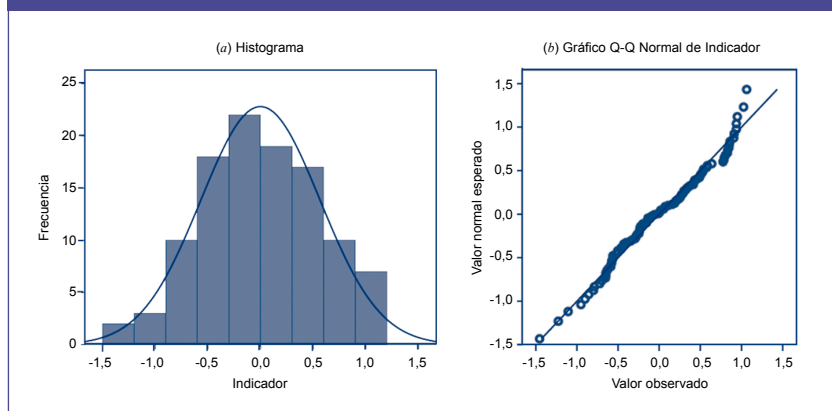
Como puede observarse, el IGDA para la ciudad de Madrid presenta una clara componente estacional. Además, el patrón anual del índice es idéntico para los 9 años considerados en el estudio, alto deterioro en los meses centrales del año y menor en el resto (véase Figura 10).



**4.4 Construcción de un Índice de Calidad Ambiental (ICA).**

Las Figuras 11 (a), 11 (b), junto con el test Jarque-Bera (p-valor de 0,3296), nos permiten no rechazar la hipótesis nula para un nivel de significación del 5%, relativa a la distribución Gaussiana del IGDA anteriormente obtenido. Recuérdese que es necesario el conocimiento de la distribución de probabilidad que sigue el IGDA para calcular el ICA, ya que éste se define como:

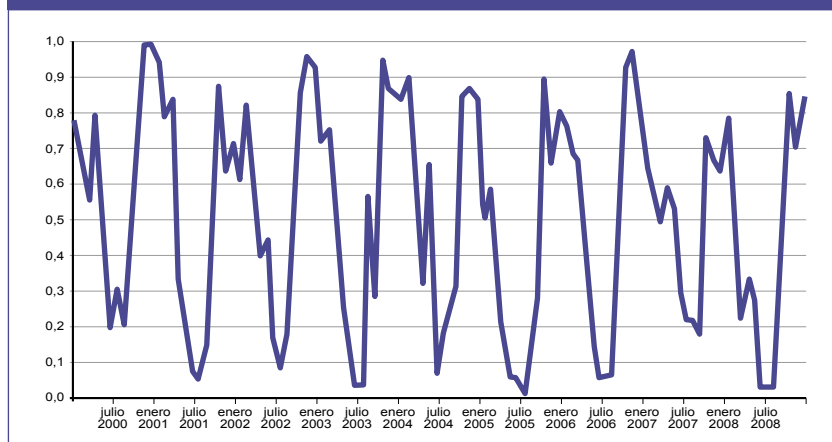
**Figura 11.**  
**Histograma y Q-Q plot para el IGDA.**



Fuente: Elaboración propia.

Bajo el supuesto de normalidad del IGCA, en la Figura 12 se recogen gráficamente los valores del ICA a lo largo del período de estudio considerado. Como puede apreciarse, se observa claramente un patrón estacional, tomando valores cercanos a cero en los meses estivales) y cercanos a uno (en los meses de invierno). Esta circunstancia muestra la importancia de las variables de carácter atmosférico, así como del tráfico rodado, en la calidad del aire, ya que, recuérdese, las series de contaminantes (con la excepción del ozono) alcanzan sus valores más altos en los meses de invierno.

**Figura 12.**  
**Indicador de Calidad del Aire.**  
**Ciudad de Madrid (2000-2008).**



Fuente: Elaboración propia.

## 5.- Conclusiones.

Para finalizar, decir que con los resultados obtenidos se reafirma que los indicadores ambientales representan un valioso instrumento para cuantificar, simplificar y sistematizar la información relacionada con los distintos aspectos del medio ambiente.

Aunque los resultados obtenidos aún deben refinarse, mejorando la precisión de los datos relativos a algunas variables, incorporando nuevas de las que se pueda disponer de información que en esta ocasión no pudo ser recopilada, etc., éstos proporcionan una imagen del deterioro de la calidad ambiental y de la calidad del aire. En este trabajo, la aplicación práctica se ha realizado en el municipio de Madrid, siendo tanto el IGDA como el ICA aplicables a cualquier gran urbe.

Es de destacar que el carácter probabilístico del ICA propuesto es totalmente novedoso en este tipo de indicadores. Por tanto, esta investigación constituye una herramienta útil, representativa y actual de trabajo para quienes tienen que tomar las decisiones en materia de política ambiental.

## Bibliografía.

BISHOI, B., PRAKASH, A., y JAIN, V. K. (2009): A Comparative Study of Air Quality Index Based on Factor Analysis and US-EPA Methods for an Urban Environment. *Aerosol and Air Quality Research*, Vol. 9, No. 1, pp. 1-17.

CUESTA SANTOS, O., WALLO VÁZQUEZ, A., COLLAZO ARANDA, A., y BOYS MOYA, A. (2007): Análisis del comportamiento de un índice de la calidad del aire (ICA) en el municipio de Regla, La Habana (CUBA). *Centro de Contaminación y Química Atmosférica, Instituto de Meteorología de Cuba, CITMA*.

HARMAN, H. H. (1968): *Modern Factor Analysis*, 2nd Ed., Revised. University of Chicago Press, Chicago.

INHABER, H. (1976): *Environmental Indices*. John Wiley & Sons Publication, New York.

JOHNSTON, R. J. (1978): *Multivariate Statistical Analysis in Geography*, Longman, New York.

KAISE, H. F. (1974): An index of factorial simplicity, *Psychometrika*, 139, pp. 31-36.

MONTERO, J. M., FERNÁNDEZ-AVILÉS, G., MATEU, J. y PORCU, E. (2009): The use of environmental quality indexes for the estimation of housing prices, en (Ferrari, G. Montero, JM. Mondejar, J. y Vargas, M. eds). *Impacto ambiental de las actividades económicas*. Septem Ediciones, Oviedo. pp. 92-109.

MONTERO, J. M. y FERNÁNDEZ-AVILÉS, G. (2009): Mixed environmental quality indexes for hedonic housing price models: an alternative with area-to point kriging with external drift. *AESTIMUM*, 54, pp. 1- 22.

MURENA, F. (2004): Measuring Air Quality over Large Urban Areas: Development and Application of an Air Pollution Index at the Urban Area of Naples. *Atmos. Environ.* 38: 6195-6202.

OTT, W. R. y THOM, G. C. (1976): A Critical Review of Air Pollution Index Systems in the United States and Canada. *J. Air Poll. Control Assoc.* 26: 460-470.

SHENFELD, L. (1970): Note on Ontario's Air Pollution Index and Alert System. *J. Air Poll. Control Assoc.* 20: 612.

<http://www.mambiente.munimadrid.es/opencms/opencms/calaire>