

Aplicación de los métodos de ayuda a la toma de decisión para el análisis temporal de la contaminación ambiental en una ciudad

Application of decision-making methods for the temporary analysis of environmental pollution in a city

Emilio José García Vilchez¹

Resumen

Cualquier emisión industrial, de tráfico o incluso doméstica, lleva aparejado un cierto nivel de riesgo para la salud de las personas. Por ello, es responsabilidad de las autoridades la intervención y la investigación de dichas emisiones para lograr que la calidad del aire que respiramos todos los ciudadanos se mantenga siempre en el nivel óptimo posible. Debido a la normativa ambiental europea, traspuesta en España en el RD 102/2011 del 18 de enero, se exige que debe haber, al menos, un punto de medición de la contaminación por cada 50.000 km² o dos millones de habitantes. Para este fin, los Estados miembros deben de disponer de una red para el control de la contaminación atmosférica (RCCA) con el objetivo de monitorizar la contaminación ambiental y poder actuar en consecuencia en función de los resultados obtenidos. Este seguimiento debe realizarse los 365 días del año realizando mediciones de los parámetros exigidos en dicho RD en diferentes puntos durante las 24 horas, para así tener un conocimiento de lo que está sucediendo y poder tomar acciones en consecuencia en función de los valores de cada contaminante.

Este artículo hace referencia a los datos recogidos por una RCCA de una ciudad de España formada por siete estaciones meteorológicas que han medido 12 parámetros ambientales durante el mismo periodo de tiempo y durante ocho años en total. Este periodo se ha seleccionado debido a que el año 2020 coincide con el estado alarma debido a la covid-19, por lo que la actividad tanto de vehículos como de industrias fue menor. En consecuencia, se dispone de un periodo de referencia para poder comparar la evolución de los contaminantes ambientales durante diferentes periodos de una manera agregada mediante el uso de métodos matemáticos para la ayuda de toma de decisión.

Para ello, es necesario tratar los datos, ponderar y normalizar el conjunto de datos de cada periodo de cada año para, posteriormente, poder compararlos de manera objetiva mediante diferentes métodos matemáticos y poder extraer conclusiones de manera global en una clasificación de índices agregados anuales.

Palabras clave

Medición de la contaminación, análisis de contaminantes, métodos de ayuda a la toma de decisión, estaciones de medida de contaminantes.

Recibido/received: 17/08/2023 Aceptado/accepted: 20/02/2024

¹ Ingeniero técnico industrial en Química, ingeniero en Organización Industrial y doctor en Ingeniería de Procesos y Sistemas por la Universidad de Valladolid. Posgraduado en Logística e Ingeniería de la Calidad. Máster en Prevención de Riesgos Laborales. Más de 20 años de experiencia en la gestión de equipos en organizaciones nacionales e internacionales.

Autor para correspondencia: Emilio José García Vilchez, emigarvil@gmail.com
CÓDIGO UNESCO: 1209.03 Análisis de datos.

Abstract

Any industrial, traffic or even domestic emission carries a certain level of risk to people's health. For this reason, it is the responsibility of the authorities to intervene and investigate these emissions to ensure that the quality of the air that all citizens breathe is always maintained at the optimum possible level.

Due to the European environmental regulations, transposed in Spain in RD 102/2011 of January 18th, it is required that there must be at least one pollution measurement point for every 50,000 km² or two million inhabitants. To this end, the member States of European Union must have a Network for the Control of Air Pollution (NCAP) with the aim of monitoring environmental pollution and being able to act accordingly based on the results obtained.

This monitoring must be carried out 365 days a year, making measurements of the parameters required in said the RD 102/2011 at different points during 24 hours in order to have an understanding of what is happening and to be able to take actions accordingly based on the values of each pollutant.

This article refers to the data collected by a NCAP from a city in Spain made up of seven meteorological stations that have measured 12 environmental parameters during the same period of time and for a total of eight years. This period has been selected for this analysis because the year 2020 coincides with the Spanish state of alarm due to covid-19, so the activity of both vehicles and industries was lower. Therefore, there is a reference period to be able to compare the evolution of environmental contaminants during different periods in an aggregate manner using mathematical methods to aid decision-making.

For this, it is necessary to treat, weight and normalize the data set for each period of each year to later be able to compare them objectively through different mathematical methods and thus to be able to draw conclusions globally in a ranking of annual aggregate index.

Keywords

Pollution measurement, pollutant analysis, decision support methods, pollutant measurement stations.



Foto: Shutterstock.

1. Fundamento teórico

Objetivos

Con este artículo se pretenden abordar los siguientes objetivos:

- Extraer los datos ambientales de la RCCA desde sus Bases de Datos Web para el periodo concreto establecido (del 15 de marzo al 21 de junio para los años 2016 al 2023) eliminando los datos anómalos.
- Normalizar, ponderar, agregar y analizar los datos descargados de la RCCA en diferentes periodos utilizando para ello los métodos de ayuda a la toma de decisión.
- Realizar una comparación objetiva de los datos para establecer una clasificación y conocer, por tanto, qué año es el que presenta un índice agregado ambiental mayor con un impacto ambiental menor para los ciudadanos.
- Extraer conclusiones sobre los resultados obtenidos.

Red de Control de la Contaminación Ambiental (RCCA) de estudio

La RCCA de estudio, de la que se han extraído los datos, consta de siete estaciones de medida localizadas en diferen-

tes puntos de una ciudad de 198 km² y con 300.000 habitantes. Está acreditada por la norma ISO 17025:2017, por lo que se garantiza la calidad de las mediciones realizadas.

Los instrumentos de medida localizados en todas las estaciones son totalmente automáticos y realizan la medida de forma continuada en el tiempo. Todos los instrumentos se encuentran unidos a un sistema de adquisición de datos (SAD) que, de forma instantánea, captura la información del instrumento cada 15 minutos y la incorpora secuencialmente a su propia base de datos para llegar a un centro de proceso de datos (CPD).

La comunicación entre las estaciones y el CPD se verifica a través de una red propietaria de fibra óptica que garantiza la máxima disponibilidad de datos e inmunidad frente a posibles ataques externos, un conocimiento en tiempo real de la evolución de un episodio y una inmunidad a fallos muy superior a la dependencia de una red pública de telecomunicaciones; también un coste de operación casi nulo comparado con otras opciones comerciales dedicadas punto a punto.

Cada instrumento de medida de la contaminación de los instalados en las

estaciones verifica el análisis de la muestra de aire ambiente siguiendo una técnica oficial establecida por las diferentes normas reguladoras.

Los contaminantes medidos por la RCCA en sus diferentes estaciones de medida, así como sus valores límite diarios máximos según el RD 102/2011 del 18 de enero, son los establecidos de en la tabla 1.

Métodos de ayuda a la toma de decisión

A continuación, se presenta el soporte matemático que va a servir de ayuda en la normalización, ponderación, agregación y análisis de la serie temporal de datos para cada periodo para poder establecer una clasificación de ordenación de índices anuales.

La toma de decisiones puede considerarse una formalización del sentido común para aquellos problemas demasiado complejos en que este no puede ser utilizado de modo informal (Keeney, 1982).

La toma de decisión se asocia a las primeras cinco etapas de un proceso de resolución de problemas (fig. 1). Se inicia en la identificación y la definición del problema y concluye en la selección de la alternativa, que es en sí la toma de decisión.

Contaminante	Definición de contaminante	Valor límite según RD 102/201
PM10	El material particulado presente en la atmósfera se clasifica en 3 grupos principales: material con tamaño de partícula superior a 10 micras, material con tamaño inferior o igual a 10 micras, conocido como PM10, y material con tamaño de partícula inferior a 2,5 micras, conocido como PM2,5. Las partículas de tamaño comprendido entre las 2,5 y las 10 micras no son realmente inhaladas hasta las vías profundas y se expulsan de manera relativamente eficaz a través de las mucosidades o de la tos, o sedimentan directamente sin llegar a penetrar en el árbol respiratorio. El material particulado se clasifica como primario si es emitido directamente a la atmósfera, secundario si se forma a partir de reacciones entre contaminantes dentro de la atmósfera o se modifica por condensación y crecimiento. La principal fuente de partículas primarias son los procesos de combustión. Estas partículas son transportadas por gases calientes a lo largo de un tubo o chimenea donde pueden aparecer nucleaciones espontáneas de partículas con posterioridad a la emisión. La contaminación ambiental producida por las fuentes móviles (vehículos) que circulan por la ciudad es uno de los graves problemas que tienen que afrontar los habitantes de las grandes ciudades.	40
PM2,5	Aún más importante es conocer la concentración de las partículas que entran en el organismo y se depositan en lo más profundo de las vías respiratorias como son los sacos alveolares. Estas partículas son conocidas como PM2,5 (debido al tamaño de la partícula, que son 2,5 micras). La fracción PM2,5 se produce por la combustión de los vehículos que circulan por las ciudades, en especial aquellos que funcionan con motores diésel. Las grandes capitales del mundo están muy preocupadas por la contaminación que emiten estos vehículos y es frecuente en estas ciudades la monitorización del material particulado fracción respirable PM2,5.	20
SO ₂	El dióxido de azufre (SO ₂) es un gas incoloro no inflamable con un olor penetrante que irrita los ojos. Reacciona en la superficie de cualquier material particulado que se encuentre en la atmósfera, es soluble en agua y puede oxidarse en el aire sin necesidad de que haya gotas de agua. La fuente más común del dióxido de azufre incluye el quemado de combustibles fósiles, la manufactura del ácido sulfúrico y la conversión de la pulpa de madera en papel. También la incineración de residuos y la producción de azufre elemental. El quemado del carbón es la fuente más próxima a nosotros en la producción de dióxido de azufre, pues llega a contabilizar hasta el 50% del global de emisiones. La fuente natural de emisiones de dióxido de azufre la forman los volcanes. El dióxido de azufre es un gas corrosivo que, combinado con el vapor de agua presente en la atmósfera, produce lluvia ácida. El dióxido de azufre en el aire ambiente se encuentra también asociado a problemas de salud como el asma y la bronquitis crónica. El dióxido de azufre se considera aún más peligroso cuando concentraciones elevadas de este gas se unen a concentraciones elevadas de material particulado. Esto es conocido como efecto cóctel.	125
NO Y NO ₂	Los principales compuestos del nitrógeno presentes en la atmósfera son N ₂ O, NO, NO ₂ , NH ₃ y las sales de NO ₂ ⁻ , NO ₃ ⁻ , y NH ₄ ⁺ . El óxido nítrico (NO), es emitido tanto por fuentes naturales como antropogénicas. La combustión de carburantes a elevadas temperaturas es la principal fuente artificial de NO. El dióxido de nitrógeno (NO ₂) es emitido en pequeñas cantidades junto con el NO, pero fundamentalmente se origina por oxidación del NO en la atmósfera. Tanto NO como NO ₂ están considerados contaminantes del aire y son conocidos conjunta y habitualmente bajo el nombre de óxidos de nitrógeno o NO _x . Los óxidos de nitrógeno se forman durante los procesos de combustión a elevadas temperaturas por la oxidación del nitrógeno del aire o presente en el combustible. La fuente principal de óxidos de nitrógeno, óxido nítrico NO y dióxido de nitrógeno NO ₂ procede directamente del tráfico rodado, y este es responsable de, aproximadamente, la mitad de las emisiones en Europa. Las concentraciones de NO y NO ₂ suelen ser elevadas en áreas urbanas donde el tráfico es más intenso. Otras fuentes importantes de este contaminante son las centrales térmicas productoras de energía eléctrica, instalaciones domésticas de calefacción y procesos industriales. Los óxidos de nitrógeno producen una enorme variedad de impactos sobre la salud y el medio ambiente. Es un irritante de las vías respiratorias. Puede exacerbar el asma y es susceptible de provocar incrementos en las infecciones de las vías respiratorias. En presencia de la luz solar, reacciona con los hidrocarburos para originar contaminantes fotoquímicos como el ozono.	40
CO	El monóxido de carbono es un gas incoloro, prácticamente inodoro, sin sabor y sin capacidad irritante. Se forma a partir del quemado incompleto de combustibles en condiciones de mala ventilación: gasolinas, carbón vegetal, humos procedentes de madera, etc. El gas de escape de los automóviles contiene diferentes cantidades de monóxido de carbono. Este penetra en el torrente sanguíneo a través de los pulmones para dar lugar a la formación de la carboxihemoglobina, compuesto que inhibe el transporte de oxígeno a las células del organismo y los tejidos. Las personas con enfermedades cardíacas son especialmente sensibles al envenenamiento por este gas, al igual que niños, ancianos y personas con dificultades respiratorias de cualquier tipo. El monóxido de carbono afecta a la salud de las personas, incapacitando el organismo para la realización de ejercicio físico, reduciendo la percepción visual o la destreza manual, las funciones cognitivas y la habilidad para formular razonamientos complejos.	10
Benceno y etilbenceno	Hay dos grandes grupos de hidrocarburos involucrados en la contaminación urbana, los compuestos orgánicos volátiles (COV) y los hidrocarburos policíclicos aromáticos (PAH). Los COV se encuentran ligados a las emisiones de los escapes de automóviles, como resultado de combustiones incompletas de las gasolinas. También resultan de las emisiones de disolventes, y de las mismas gasolinas en sus procesos de transporte y distribución a las gasolineras. El benceno y el 1,3 butadieno son particularmente importantes como agentes peligrosos para la salud. Otros COV son importantes por la función que desempeñan en la formación fotoquímica del ozono en la baja atmósfera. El benceno es un hidrocarburo aromático, constituyente minoritario de las gasolinas (±2% en volumen). La mayor fuente del benceno presente en las atmósferas urbanas de las ciudades europeas procede en su mayor parte de las emisiones que se generan en la distribución y venta de las gasolinas y en segundo lugar de la combustión incompleta de estas gasolinas en los motores de los automóviles también de la evaporación de los depósitos de estos. El benceno es emitido en los gases de escape no solo como un residuo de gasolina sin quemar, sino también como subproducto procedente de la descomposición térmica de otros hidrocarburos aromáticos. El benceno en la atmósfera constituye un riesgo importante para la salud de las personas. Por eso la Unión Europea ha establecido una regulación a través de una directiva de obligado cumplimiento cuyo objetivo es lograr una reducción de las emisiones de este contaminante a la atmósfera y, consecuentemente, reducir la exposición de la población a este compuesto químico.	5

Contaminante	Definición de contaminante	Valor límite según RD 102/201
Tolueno	El tolueno en las ciudades procede de las emisiones generadas por el funcionamiento de los motores de gasolina y diésel. Puede ser emitido también a la atmósfera como consecuencia de la manipulación de productos que lo contengan como pinturas, disolventes, etc. Una vez en la atmósfera, este compuesto presenta una reactividad elevada, participa en diferentes mecanismos fotoquímicos y tiene una influencia notable en los procesos de formación del ozono. Las estrategias de control y reducción de las emisiones de tolueno a la atmósfera implican el uso en proporciones elevadas de compuestos oxigenados dentro de la formulación de las gasolinas. La Agencia Ambiental Americana ha calificado el tolueno como no sospechoso de causar cáncer en las personas a partir de dos estudios epidemiológicos en los que no se detectó un incremento significativo a padecer cáncer como resultado de la inhalación del tolueno.	No especificado
Ortoxileno (oxileno), meta y paraxileno (MP-xileno)	Los xilenos (orto, meta y paraxileno) proceden, en las atmósferas urbanas, de la combustión incompleta de las gasolinas; en los vehículos dotados de catalizador aparece como consecuencia de daño o destrucción de este como resultado de su agotamiento o envenenamiento por otros agentes contaminantes. Como en el caso del tolueno, la Agencia Ambiental Americana ha descartado estos compuestos como causantes de carcinogénesis en las personas, aunque es un compuesto tóxico capaz de dar lugar a otro tipo de afecciones en la salud de las personas.	No especificado
Ozono (O ₃)	El ozono troposférico, también conocido como ozono de baja cota, O ₃ a diferencia de los otros contaminantes, no es emitido directamente a la atmósfera, sino que se trata de un contaminante secundario producido por la reacción entre el dióxido de nitrógeno, NO ₂ , los hidrocarburos, HCn, y la radiación. El ozono puede irritar los ojos y los conductos pulmonares y causar dificultades respiratorias e incrementar la susceptibilidad de las personas a las infecciones pulmonares. Es un reactivo químico energético, capaz de atacar las superficies, obras de fábrica y materiales de goma (p. ej., los neumáticos). El ozono es igualmente tóxico para la vegetación y los árboles. Además de la participación del dióxido de nitrógeno, NO ₂ , en la formación del ozono, el óxido nítrico, NO, destruye a su vez el ozono para formar oxígeno, O ₂ , y dióxido de nitrógeno, NO ₂ . Por esta razón, las concentraciones de ozono no suelen ser elevadas en áreas urbanas, donde hay elevados niveles de NO emitido por los vehículos, a diferencia de lo que sucede en las zonas rurales. Tanto los óxidos de nitrógeno como los hidrocarburos son transportados fuera de las áreas urbanas en recorridos cuya longitud depende de la velocidad de los vientos dominantes en la zona. Siempre que el ozono es foto disociado por efecto de la radiación, dará lugar a la formación de radicales libres. Como tal es un promotor de la oxidación química, que, a su vez, cataliza su propia generación por autocatálisis. En consecuencia, concentraciones elevadas de ozono son generalmente observadas durante los periodos estivales en zonas donde las masas de aire han recogido previamente emisiones de hidrocarburos, HCn, y de óxidos de nitrógeno NO _x (p. ej., áreas urbanas con un tráfico intenso).	120

Tabla 1. Contaminantes estudiados, explicación y valor límite (Quijano y Orozco, 2005 y web del Ayuntamiento de Valladolid, 2023).

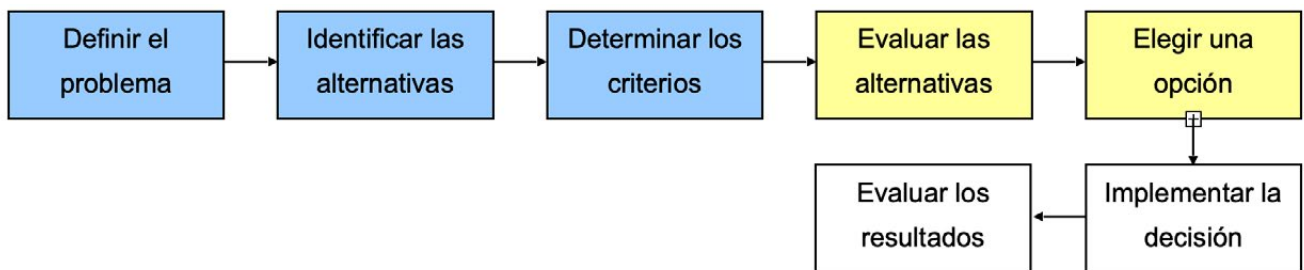


Figura 1. Etapas del proceso de resolución de problemas (Simon, 1960).

Agentes y elementos presentes en una toma de decisión

Según Chiavenato (2007), es necesario contar con diferentes elementos para llevar a cabo la toma de decisión de forma acertada:

- Decisor o analista. Es el responsable de la recogida de la información, de la determinación de los criterios a utilizar, de la construcción de las alternativas y de la selección de una de ellas.
- Alternativas. Es una de las posibles soluciones que se le puede dar al problema. Por la generalidad, las alternativas son diferentes, excluyentes y exhaustivas.
- Atributos y criterios. Consisten en los diferentes ejes de evaluación que se consideran para la elección de una alternativa. En algunas ocasiones, para establecer diferentes planos de igualdad y poder hacer la decisión más fácil y objetiva,

se otorgan unos pesos a cada atributo.

- Pesos. Valores que hacen que un criterio sea más o menos importante frente a otro. Los pesos pueden ser cardinales u ordinales. De entre los diferentes métodos de asignación de pesos destaca el de la asignación directa, que está formado por el método de la ordenación simple, el método de la tasación simple, el método de las comparaciones sucesivas y el método de los eigenpesos.
- Matriz de decisión. Es la matriz formada por los pesos y las alternativas, con todas las valoraciones dos a dos. En esta matriz pueden coexistir valores en muy distintos rangos y unidades, por lo que hay que normalizar los datos a través del uso de los métodos del porcentaje del máximo, porcentaje del rango, porcentaje del total o el vector unitario.

Tipologías

La elección de la mejor opción se presenta cuando una alternativa supera al resto en todos los criterios (solución ideal). Esto no es lo que sucede normalmente, por lo que no existe dicha solución óptima.

Los distintos problemas de decisión, tras diversas investigaciones, se agrupan en dos grandes categorías (White, 1990):

a. Toma de decisiones multiatributo. Está asociada con problemas en los que el número de alternativas está predefinido, y el decisor tan solo debe seleccionar, clasificar u ordenar las diferentes alternativas. Dentro de esta categoría se encuentra los métodos con solución a priori y los métodos interactivos.

Los métodos más utilizados son los de solución a priori, en los que la información es obtenida, a priori, a partir de los datos suministrados por los decisores. La clasificación de estos métodos (fig. 2) se realiza según la información que tiene disponible el decisor, ya sea ordinal, cardinal (numérica) o estandarizada (Venkata, 2007).

b. Toma de decisiones multiobjetivo. En este caso está asociada con proble-

mas en los que dichas alternativas no están determinadas a priori, y el propósito del decisor es obtener o diseñar la mejor alternativa con los recursos limitados de que dispone (como pueden ser el tiempo y el coste).

Además de estas dos categorías principales, hay otros métodos denominados interactivos los cuales son progresivos. Se caracterizan por que el decisor se desplaza de una solución a la

siguiente de forma interactiva, según la información facilitada en cada etapa por las preferencias sobre las soluciones presentadas.

Dentro del abanico de métodos existentes, se ha utilizado en este artículo el método AHP (Analytic Hierarchy Process) propuesto por Saaty a finales de la década de 1970, que pertenece a la categoría de los Eigenpesos y, por ello, se va a desarrollar a continuación con más profundidad (fig. 2).

El AHP calcula el autovector dominante de una matriz de comparación binaria para cada categoría y se pondera para calcular el valor normalizado que le corresponde a cada criterio.

Para ello, parte de comparar cada criterio *i* con cada criterio *j*, dos a dos, para obtener unos valores *a_{ij}* (aun cuando utilicen la misma notación, no tienen nada que ver con las evaluaciones de las alternativas) que se pueden agrupar en una matriz cuadrada de orden *n*: la llamada matriz de comparaciones binarias *A* = [*a_{ij}*]. La razón fundamental de comparar de dos en dos los criterios es que para al decisor le resulte más fácil (divide y vencerás) que compararlos todos a la vez (tabla 2).

La escala de medida elegida por Saaty para realizar las comparaciones es la mostrada en la tabla 1.

En el caso de que al hacer la comparación no fuese el criterio *i* igual o más importante que el *j*, sino al revés, lo que se haría sería estimar *a_{ji}*; de acuerdo con lo anterior y la valoración de *a_{ij}* = 1/ *a_{ji}*.

Las matrices *A* de comparaciones binarias son del tipo de las llamadas matrices recíprocas, las cuales gozan de unas interesantes propiedades en las que se basa, en gran parte, la eficacia del método AHP.

Para calcular los pesos y la importancia de cada una de las alternativas en los diferentes criterios, y de los diferentes criterios entre sí, se deben obtener los vectores propios asociados al mayor valor propio de cada matriz de comparaciones binarias.

El cálculo exacto del mayor valor propio y del vector propio asociado a cada una de estas matrices, cuando las dimensiones de las matrices son mayores de 4 × 4, es muy complejo y se recurre bien a programas informáticos (Macros en MS Excel, Matlab, MDwin, Expert Choice, etc.) o en su

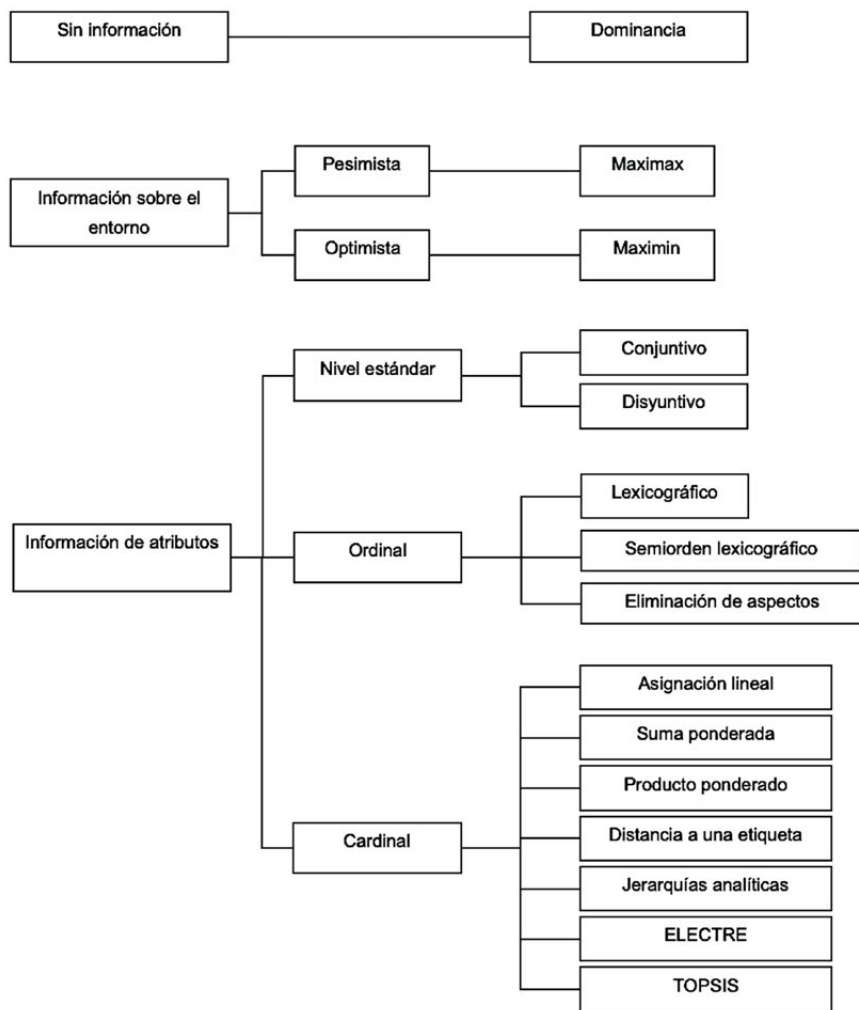


Figura 2. Resumen de los métodos de toma de decisión según la información de que dispone el decisor. (Hwang y Yoon, 1981 y Chen y Hwang, 1992, en Venkata, 2007).

Cuando <i>i</i> al compararlo con <i>j</i> es		Factor <i>a_{ij}</i>
Igual importancia	Las actividades contribuyen de idéntica forma al objetivo	1
Ligeramente más importante o preferida	La experiencia y el juicio favorecen ligeramente una actividad sobre la otra	3
Fuertemente más importante o preferida	La experiencia y el juicio favorecen fuertemente una actividad sobre la otra	5
Muy fuertemente más importante o preferida	Una actividad es fuertemente favorable y su dominación está demostrada en la práctica	7
Extremadamente más importante o preferida	La evidencia que favorece a una actividad sobre la otra es la mayor posible en el orden de afirmaciones	9
Valores intermedios	Expresivos en la indefinición entre dos valores básicos de la escala	2, 4, 6, 8

Tabla 2. Asignación de pesos según Saaty (Saaty, 1982).

defecto a métodos para el cálculo aproximado más inmediatos y muy fiables.

Para este caso de análisis en este artículo, de todos los métodos presentados se han utilizado los siguientes: suma ponderada, raíz n-ésima, entropía y AHP.

A continuación, se explica su fundamento teórico para poder entender su funcionamiento y características.

Suma ponderada

El método de aproximación básico consiste en sumar los elementos de cada fila y los normaliza dividiendo cada una de estas sumas entre la suma de las de todas las filas. El vector resultante es el que se use como vector de pesos.

Raíz n-ésima

El método de aproximación mejor consiste en multiplicar los elementos de cada fila y se hace la raíz n-ésima. Después se normalizan los resultados. El vector resultante es el que se use como vector de pesos.

Entropía

Se parte de la matriz de decisión normalizada a_{ij} , siendo i las alternativas y j los criterios para calcular la entropía E_j de cada criterio j :

$$E_j = -k \cdot \sum_{ij} a_{ij} \cdot \log a_{ij}$$

Donde k es una constante que se ajustará para que $0 \leq E_j \leq 1$, para todos los criterios. Asignando a k el siguiente valor: $k = 1/\log(m)$, m es el número de alternativas.

La entropía E_j de un criterio es tanto mayor cuanto más iguales son sus evaluaciones a_{ij} . Precisamente lo contrario de lo que nos gustaría que ocurriera si E_j fuese a ser un valor aproximado del peso del criterio. Utilizaremos, entonces, una medida opuesta que se llamará diversidad D_j del criterio: $D_j = 1 - E_j$.

Finalmente, normalizamos a suma uno las diversidades D_j y se obtienen los pesos buscados:

$$W_j = \frac{D_j}{\sum_j D_j}$$

Método AHP

El método AHP consiste en dividir los elementos de cada columna entre la suma de esta columna (normalizar la columna), después realizar la suma de los elementos de cada fila (ya normalizados por columnas) y dividirlos entre el número de elementos de cada fila (o sea, realizar la media) y los normaliza dividiendo cada una de estas sumas entre la suma de las de todas las filas. El vector resultante es el que se use como vector de pesos.

La metodología AHP con la ponderación de índices se ha utilizado en distintas publicaciones con datos de indicadores de desarrollo sostenible para las multinacionales Henkel (Krajnc y Glavic, 2004), BP y Shell (Krajnc y Glavic, 2005).

Tras realizar cualquier análisis AHP, es necesario llevar a cabo un análisis de consistencia. Una matriz de comparaciones binarias es consistente cuando $a_{ij} = w_i \cdot w_j$, para todo i, j . Esto significa que a_{ij} (la importancia relativa de i frente a j) es exactamente el cociente w_i/w_j de sus pesos (sus importancias absolutas que tratamos de estimar).

Para realizar este análisis, primero se calcula Aw^T , multiplicando la matriz de comparaciones binaria (A) por la matriz transpuesta de los pesos (w^T).

Posteriormente, se calcula el autovector dominante de la siguiente forma:

$$\delta_{\text{máx}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\text{fila } i \text{ de } Aw^T}{\text{fila } i \text{ de } w^T}$$

A continuación, se calcula el índice de consistencia:

$$CI = \frac{\delta_{\text{máx}} - n}{n - 1}$$

siendo n el rango de la matriz A ($n \times n$)

Para ello, hay que buscar el índice aleatorio (RI) para el rango de la matriz (N), que se establece en la tabla 3.

Finalmente, se hace el cociente

que muestra la ratio de inconsistencia, que debe ser menor que 0,1 para que la consistencia de la matriz de comparaciones binarias sea aceptable.

2. Aplicación práctica

Tomando como referencia el trabajo realizado en 2010 por García y Báscones, en el artículo se han llevado a cabo los siguientes apartados:

Tratamiento y agregación de datos

Inicialmente se han considerado los datos obtenidos de la RCCA de referencia mencionados al inicio correspondientes al periodo comprendido entre el 15 de marzo y el 21 de junio entre los años 2016 y 2023. Este histórico de datos por contaminante, por estación de medida y por día se han descargado de la base de datos en formato MS Excel de la RCCA.

Esta información corresponde al periodo seleccionado que incluye 99 días por cada año, 10 contaminantes y 7 estaciones de medida. Una vez descargados los valores de los parámetros, más de 50.000 datos porque no en todas las estaciones se miden todos los parámetros, se han llevado a cabo los siguientes cuatro pasos:

- Paso 1. Eliminar de los ficheros Excel los valores anómalos identificados como dato erróneo (N), dato de mantenimiento de la estación de medida (M) y dato de calibración/verificación (C).
- Paso 2. Por periodos anuales, sacar promedio de cada contaminante para cada estación de medida. Finalmente, los datos por cada año serán 33 valores, dado que ninguna de las estaciones mide todos los contaminantes.
- Paso 3. Sacar promedio anual por cada contaminante. Con los valores que se han obtenido por contaminante se saca un promedio anual para cada uno de ellos. La tabla 4 es un resumen final.
- Paso 4. Normalizar la matriz de datos. En este paso se normalizan los datos obtenidos teniendo en cuenta que todos los indicadores son decrecientes, es decir, que lo que buscamos es obtener año a año un valor lo más bajo

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Ri	0	0	0,58	0,90	1,12	1,18	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51	1,48	1,56	1,57	1,59

Tabla 3. Valores del índice aleatorio para el rango de la matriz (Saaty, 1980).

Parámetro	Notación y unidad de medida	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Partículas en suspensión con tamaño inferior o igual a 10 micras	PM10 (µg/m³)	12,22	15,81	13,12	13,13	14,44	14,70	21,27	18,48
Partículas en suspensión con tamaño inferior o igual a 2,5 micras	PM2,5 (µg/m³)	7,88	10,32	8,80	9,03	8,38	9,90	11,84	8,09
Dióxido de azufre	SO ₂ (µg/m³)	5,98	7,08	3,47	5,11	5,00	6,88	6,30	7,44
Monóxido de nitrógeno	NO (µg/m³)	4,96	5,54	5,05	4,32	2,50	3,17	3,47	2,85
Dióxido de nitrógeno	NO ₂ (µg/m³)	14,47	16,61	14,89	13,21	7,45	12,17	12,06	10,45
Monóxido de carbono	CO (mg/m³)	0,20	0,31	0,41	0,47	0,41	0,42	0,44	0,25
Benceno	Benceno (µg/m³)	0,38	0,36	1,24	1,81	0,84	0,15	0,65	0,58
Tolueno	Tolueno (µg/m³)	0,75	0,84	2,43	2,94	2,53	2,23	2,60	2,17
Meta-xileno y para-xileno	MP-Xileno (µg/m³)	0,14	0,15	1,36	1,28	2,00	1,97	1,59	1,81
Etil-benceno	Etil-Benceno (µg/m³)	0,28	0,28	1,01	0,28	0,24	0,3	0,37	0,43
Orto-xileno	O-Xileno (µg/m³)	0,19	0,20	0,43	0,59	0,43	0,49	0,75	0,67
Ozono	O ₃ (µg/m³)	60,17	63,40	70,37	70,37	55,35	62,44	62,50	69,95

Tabla 4. Valores promedio por contaminante y año de la RCCA (elaboración propia).

Parámetro normalizado	Notación y unidad de medida	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Partículas en suspensión con tamaño inferior o igual a 10 micras	PM10 (µg/m³)	0,90	0,87	0,89	0,89	0,88	0,88	0,83	0,85
Partículas en suspensión con tamaño inferior o igual a 2,5 micras	PM2,5 (µg/m³)	0,89	0,86	0,88	0,88	0,89	0,85	0,87	0,84
Dióxido de azufre	SO ₂ (µg/m³)	0,87	0,85	0,93	0,89	0,89	0,85	0,87	0,84
Monóxido de nitrógeno	NO (µg/m³)	0,84	0,83	0,84	0,86	0,92	0,90	0,89	0,91
Dióxido de nitrógeno	NO ₂ (µg/m³)	0,86	0,84	0,85	0,87	0,93	0,88	0,88	0,90
Monóxido de carbono	CO (mg/m³)	0,93	0,89	0,86	0,84	0,86	0,86	0,85	0,91
Benceno	Benceno (µg/m³)	0,94	0,94	0,79	0,70	0,86	0,98	0,89	0,90
Tolueno	Tolueno (µg/m³)	0,95	0,95	0,85	0,82	0,85	0,86	0,84	0,87
Meta-xileno y para-xileno	MP-Xileno (µg/m³)	0,99	0,99	0,87	0,88	0,81	0,81	0,85	0,82
Etil-benceno	Etil-Benceno (µg/m³)	0,91	0,91	0,68	0,91	0,93	0,91	0,88	0,87
Orto-xileno	O-Xileno (µg/m³)	0,95	0,95	0,88	0,84	0,89	0,87	0,80	0,82
Ozono	O ₃ (µg/m³)	0,88	0,88	0,87	0,86	0,89	0,88	0,88	0,86

Tabla 5. Valores promedio por contaminante y año de la RCCA normalizado (elaboración propia).

posible. Para la normalización esto se interpreta como tender a la unidad. Cuanto más próximo esté un dato o un índice agregado a la unidad, mejor resultado será para ese parámetro medido. Para normalizar cada dato, se divide cada celda entre la suma de la fila y el valor resultante se resta de la unidad (tabla 5).

Análisis de los datos

Para la etapa de análisis de los datos, es necesario asignar los pesos a cada contaminante en función del resto y normalizar los valores. Para ello, se han llevado a cabo los siguientes dos pasos:

- Paso 1. Asignar los pesos a cada contaminante teniendo en cuenta entre sí su importancia en función de su nocividad y los valores límite exigidos en la legislación.

A continuación, es necesario asignar los pesos en función de lo detallado en la tabla 2 para comparar la importancia relativa entre unos contaminantes y otros. Con esta asignación de pesos se construye la matriz de pesos que es clave para el correcto desarrollo del método como luego se comprobará (tabla 6).

Esta asignación de pesos, que se realiza basada en la tabla 2, sirve para

la elaboración de la matriz de pesos como ya hemos comentado, se trata de una matriz simétrica (tabla 7).

- Paso 2. Normalizar los resultados utilizando cuatro métodos: pesos promedio, pesos mediante la raíz enésima, pesos mediante entropía y AHP. Se comprueba consistencia de los métodos.

Una vez que ya se dispone de la matriz de datos normalizada y de la matriz de pesos, se normalizan los resultados de manera global multiplicando la matriz de datos por la matriz de pesos de manera genérica. Como se van a utilizar cuatro métodos diferentes para la

Contaminante	PM10 (µg/m³)	PM2,5 (µg/m³)	SO ₂ (µg/m³)	NO (µg/m³)	NO ₂ (µg/m³)	CO (mg/m³)	Benceno (µg/m³)	Tolueno (µg/m³)	MP-Xileno (µg/m³)	Etil-Benceno (µg/m³)	O-Xileno (µg/m³)	O ₃ (µg/m³)
Peso asignado	1	2	1	2	2	2	3	3	3	3	3	3

Tabla 6. Asignación de pesos realizada (elaboración propia).

Matriz de pesos	PM10 (µg/m³)	PM2,5 (µg/m³)	SO ₂ (µg/m³)	NO (µg/m³)	NO ₂ (µg/m³)	CO (mg/m³)	Benceno (µg/m³)	Tolueno (µg/m³)	MP-Xileno (µg/m³)	Etil-Benceno (µg/m³)	O-Xileno (µg/m³)	O ₃ (µg/m³)
PM10 (µg/m³)	1,00	0,50	1,00	0,50	0,50	0,50	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33
PM2,5 (µg/m³)	2,00	1,00	2,00	1,00	1,00	1,00	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67
SO ₂ (µg/m³)	1,00	0,50	1,00	0,50	0,50	0,50	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33
NO (µg/m³)	2,00	1,00	2,00	1,00	1,00	1,00	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67
NO ₂ (µg/m³)	2,00	1,00	2,00	1,00	1,00	1,00	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67
CO (mg/m³)	2,00	1,00	2,00	1,00	1,00	1,00	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67
Benceno (µg/m³)	3,00	1,50	3,00	1,50	1,50	1,50	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Tolueno (µg/m³)	3,00	1,50	3,00	1,50	1,50	1,50	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
MP-Xileno (µg/m³)	3,00	1,50	3,00	1,50	1,50	1,50	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Etil-Benceno (µg/m³)	3,00	1,50	3,00	1,50	1,50	1,50	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
O-Xileno(µg/m³)	3,00	1,50	3,00	1,50	1,50	1,50	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
O ₃ (µg/m³)	3,00	1,50	3,00	1,50	1,50	1,50	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Suma	28,00	14,00	28,00	14,00	14,00	14,00	9,33	9,33	9,33	9,33	9,33	9,33

Tabla 7. Matriz de pesos (elaboración propia).

Matriz de pesos normalizada	PM10 (µg/m³)	PM2,5 (µg/m³)	SO ₂ (µg/m³)	NO (µg/m³)	NO ₂ (µg/m³)	CO (mg/m³)	Benceno (µg/m³)	Tolueno (µg/m³)	MP-Xileno (µg/m³)	Etil-Benceno (µg/m³)	O-Xileno (µg/m³)	O ₃ (µg/m³)	Suma
PM10 (µg/m³)	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
PM2,5 (µg/m³)	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
SO ₂ (µg/m³)	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
NO (µg/m³)	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
NO ₂ (µg/m³)	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
CO (mg/m³)	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
Benceno (µg/m³)	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11
Tolueno (µg/m³)	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11
MP-Xileno (µg/m³)	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11
Etil-Benceno (µg/m³)	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11
O-Xileno(µg/m³)	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11
O ₃ (µg/m³)	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11
Suma	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1

Tabla 8. Matriz de pesos normalizada (elaboración propia).

Año	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Resultados pesos promedio	0,9176	0,9064	0,8408	0,8474	0,8790	0,8802	0,8587	0,8699

Tabla 9. Resultado del índice agregado según el método de pesos promedio (elaboración propia).

asignación de los pesos, en cada caso se hará de una forma diferente.

◦ Método 1: pesos promedio. En este método se calcula la matriz de pesos normalizada como primer paso (tabla 8).

A continuación, se multiplica de forma matricial la tabla 5 (valores promedio por contaminante y año de la RCCA normalizados) por la suma de la tabla 8 (matriz de pesos normalizada).

De esta manera, se obtienen los valores agregados de los índices por cada uno de los años usando el método de pesos ponderados, donde están representados cada uno de los 12 contami-

nantes de manera normalizada (tabla 9).

Al finalizar el método, se lleva a cabo el análisis de consistencia, obteniendo un CI = 0 y con un RI (12 datos) = 1,48 (tabla 3). Por tanto, el cociente CI/RI = 0; el método es consistente debido a que este número es menor de 0,1.

◦ Método 2: pesos mediante la raíz N-ésima. En este método como primer paso se hace una normalización de pesos a partir de la raíz n-ésima. Para ello, se multiplican las filas de la matriz de pesos normalizada, se calcula la raíz duodécima de estas filas y se normaliza el resultado de esta raíz (tabla 10).

A continuación, se multiplica de forma matricial la tabla 5 (valores promedio por contaminante y año de la RCCA normalizados) por la normalización de pesos de la tabla 10 (matriz de pesos normalizada a partir de la raíz n-ésima).

De esta manera, se obtienen los valores agregados de los índices por cada uno de los años usando el método de la raíz n-ésima, donde están representados cada uno de los 12 contaminantes de manera normalizada (tabla 11).

Al finalizar el método, se lleva a cabo el análisis de consistencia, y se obtiene un CI = 0 y con un RI (12 datos) = 1,48

Contaminante	Multiplicación por filas	Raíz n-ésima	Normalización pesos
PM10 (µg/m³)	8,57E-05	4,58E-01	3,57E-02
PM2,5 (µg/m³)	3,51E-01	9,16E-01	7,14E,02
SO ₂ (µg/m³)	8,57E-05	4,58E-01	3,57E-02
NO (µg/m³)	3,51E-01	9,16E-01	7,14E,02
NO ₂ (µg/m³)	3,51E-01	9,16E-01	7,14E,02
CO (mg/m³)	3,51E-01	9,16E-01	7,14E,02
Benceno (µg/m³)	45,5625	1,37E+00	1,07E-01
Tolueno (µg/m³)	45,5625	1,37E+00	1,07E-01
MP-Xileno (µg/m³)	45,5625	1,37E+00	1,07E-01
Etil-Benceno (µg/m³)	45,5625	1,37E+00	1,07E-01
O-Xileno(µg/m³)	45,5625	1,37E+00	1,07E-01
O ₃ (µg/m³)	45,5625	1,37E+00	1,07E-01

Tabla 10. Matriz de pesos normalizada mediante el método de la raíz n-ésima a partir de la tabla 7 - matriz de pesos (elaboración propia).

Año	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Resultado raíz n-ésima	0,9176	0,9064	0,8408	0,8474	0,8790	0,8802	0,8587	0,8699

Tabla 11. Resultado del índice agregado según el método de la raíz n-ésima (elaboración propia).

Parámetro normalizado	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	Ej	Dj	Wj
PM10 (µg/m³)	0,90	0,87	0,89	0,89	0,88	0,88	0,83	0,85	0,45	0,55	0,082774
PM2,5 (µg/m³)	0,89	0,86	0,88	0,88	0,89	0,87	0,84	0,89	0,45	0,55	0,082687
SO ₂ (µg/m³)	0,87	0,85	0,93	0,89	0,89	0,85	0,87	0,84	0,45	0,55	0,082817
NO (µg/m³)	0,84	0,83	0,84	0,86	0,92	0,90	0,89	0,91	0,45	0,55	0,082960
NO ₂ (µg/m³)	0,86	0,84	0,85	0,87	0,93	0,88	0,88	0,90	0,45	0,55	0,082820
CO (mg/m³)	0,93	0,89	0,86	0,84	0,86	0,86	0,85	0,91	0,45	0,55	0,082908
Benceno (µg/m³)	0,94	0,94	0,79	0,70	0,86	0,98	0,89	0,90	0,43	0,57	0,085026
Tolueno (µg/m³)	0,95	0,95	0,85	0,82	0,85	0,86	0,84	0,87	0,44	0,56	0,083293
MP-Xileno (µg/m³)	0,99	0,99	0,87	0,88	0,81	0,81	0,85	0,82	0,44	0,56	0,084111
Etil-Benceno (µg/m³)	0,91	0,91	0,68	0,91	0,93	0,91	0,88	0,87	0,44	0,56	0,084550
O-Xileno(µg/m³)	0,95	0,95	0,88	0,84	0,89	0,87	0,80	0,82	0,44	0,56	0,083429
O ₃ (µg/m³)	0,88	0,88	0,87	0,86	0,89	0,88	0,88	0,86	0,45	0,55	0,082623

Tabla 12. Matriz de pesos normalizada a partir de la entropía (elaboración propia).

Año	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Resultado entropía	0,9104	0,8959	0,8501	0,8539	0,8821	0,8785	0,8582	0,8710

Tabla 13. Resultado del índice agregado según el método de la entropía (elaboración propia).

(tabla 3). Por tanto, el cociente CI/RI = 0; el método es consistente debido a que este número es menor de 0,1.

◦ Método 3: entropía. En este método, como primer paso se calcula la entropía E_j de cada criterio y, posteriormente, se calcula su correspondiente diversidad D_j . Finalmente, se normaliza a suma una las diversidades D_j y se obtienen los pesos buscados W_j (tabla 12).

◦ De esta manera, se obtienen los valores agregados de los índices por cada uno de los años usando el método de la entropía, en el que están representados cada uno de los 12 contaminantes de manera normalizada

(tabla 13).

Este método no es susceptible del cálculo de consistencia, dado que la matriz no es simétrica.

◦ Método 4: AHP. Para la obtención de los pesos, en este caso se ha utilizado el método AHP o de las jerarquías analíticas de Saaty, que consiste en dividir los elementos de cada columna entre la suma de esta columna (normalizar la columna). Después, se realiza la suma de los elementos de cada fila (ya normalizados por columnas) y se dividen entre el número de elementos de cada fila (o sea, se realiza la media) y se normalizan al dividir cada una de estas sumas entre la suma de las de todas las

filas. El vector resultante es el que se use como vector de pesos (tablas 14-16). Con el cálculo del mayor valor propio se lleva a cabo el análisis de consistencia y se obtiene un CI = - 0,1 con un RI (12 datos) = 1,48 (tabla 3). Por tanto, el cociente CI/RI = - 0,1; el método es consistente debido a que este número es menor de 0,1. De esta manera, se obtienen los valores agregados de los índices por cada uno de los años usando el método AHP, en el que están representados cada uno de los 12 contaminantes de manera normalizada (tabla 17).

Resultados objetivos

Finalmente, el último paso es establecer

Asignación de pesos en matriz	PM10 (µg/m³)	PM2,5 (µg/m³)	SO ₂ (µg/m³)	NO (µg/m³)	NO ₂ (µg/m³)	CO (mg/m³)	Benceno (µg/m³)	Tolueno (µg/m³)	MP-Xileno (µg/m³)	Etil-Benceno (µg/m³)	O-Xileno (µg/m³)	O ₃ (µg/m³)	Pesos (vector propio)
PM10 (µg/m³)	1,00	0,50	1,00	0,50	0,50	0,50	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	3,57E-02
PM2,5 (µg/m³)	2,00	1,00	2,00	1,00	1,00	1,00	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	7,14E-02
SO ₂ (µg/m³)	1,00	0,50	1,00	0,50	0,50	0,50	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	7,14E-02
NO (µg/m³)	2,00	1,00	2,00	1,00	1,00	1,00	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	7,14E-02
NO ₂ (µg/m³)	2,00	1,00	2,00	1,00	1,00	1,00	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	7,14E-02
CO (mg/m³)	2,00	1,00	2,00	1,00	1,00	1,00	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	7,14E-02
Benceno (µg/m³)	3,00	1,50	3,00	1,50	1,50	1,50	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,107142857
Tolueno (µg/m³)	3,00	1,50	3,00	1,50	1,50	1,50	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,107142857
MP-Xileno (µg/m³)	3,00	1,50	3,00	1,50	1,50	1,50	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,107142857
Etil-Benceno (µg/m³)	3,00	1,50	3,00	1,50	1,50	1,50	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,107142857
O-Xileno (µg/m³)	3,00	1,50	3,00	1,50	1,50	1,50	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,107142857
O ₃ (µg/m³)	3,00	1,50	3,00	1,50	1,50	1,50	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,107142857
Suma	28,00	14,00	28,00	14,00	14,00	14,00	9,33	9,33	9,33	9,33	9,33	9,33	

Tabla 14. Matriz de pesos (vector propio) a partir del método AHP (elaboración propia).

Matriz de pesos normalizados	Suma de las filas	Pesos (promedio de la suma de valores)
PM10 (µg/m³)	0,43	0,036
PM2,5 (µg/m³)	0,86	0,071
SO ₂ (µg/m³)	0,43	0,036
NO (µg/m³)	0,86	0,071
NO ₂ (µg/m³)	0,86	0,071
CO (mg/m³)	0,86	0,071
Benceno (µg/m³)	1,29	0,107
Tolueno (µg/m³)	1,29	0,107
MP-Xileno (µg/m³)	1,29	0,107
Etil-Benceno (µg/m³)	1,29	0,107
O-Xileno (µg/m³)	1,29	0,107
O ₃ (µg/m³)	1,29	0,107

Tabla 15. Matriz de pesos normalizada calculada por el método AHP (Elaboración propia) a partir de la tabla 8. Matriz de pesos normalizada (elaboración propia).

Contaminante	Promedio de la suma de pesos	Vector fila total	Pesos (Promedio de la suma de valores)	Cociente
PM10 (µg/m³)	0,028	0,16667	0,036	4,67
PM2,5 (µg/m³)	0,056	0,16667	0,071	9,33
SO ₂ (µg/m³)	0,028	0,16667	0,036	4,67
NO (µg/m³)	0,056	0,66667	0,071	9,33
NO ₂ (µg/m³)	0,056	0,66667	0,071	9,33
CO (mg/m³)	0,056	0,66667	0,071	9,33
Benceno (µg/m³)	0,083	1,50000	0,107	14,00
Tolueno (µg/m³)	0,083	1,50000	0,107	14,00
MP-Xileno (µg/m³)	0,083	1,50000	0,107	14,00
Etil-Benceno (µg/m³)	0,083	1,50000	0,107	14,00
O-Xileno (µg/m³)	0,083	1,50000	0,107	14,00
O ₃ (µg/m³)	0,083	1,50000	0,107	14,00
Mayor valor propio (promedio cocientes)				10,89

Tabla 16. Matriz con el vector fila total y el mayor valor propio calculado por del método AHP a partir de la tabla 7 - matriz de pesos (elaboración propia).

Año	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Resultado AHP	0,9176	0,9064	0,8408	0,8474	0,8790	0,8802	0,8587	0,8699

Tabla 17. Resultado del índice agregado según el método AHP (elaboración propia).

Año	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Resultado pesos promedio	0,9176	0,9064	0,8408	0,8474	0,8790	0,8802	0,8587	0,8699
Resultado raíz n-ésima	0,9176	0,9064	0,8408	0,8474	0,8790	0,8802	0,8587	0,8699
Resultado entropía	0,9104	0,8959	0,8501	0,8539	0,8821	0,8785	0,8582	0,8710
Resultado AHP	0,9176	0,9064	0,8408	0,8474	0,8790	0,8802	0,8587	0,8699
PROMEDIO	0,9158	0,9038	0,8431	0,8490	0,8798	0,8798	0,8586	0,8702

Tabla 18. Promedio de los resultados de los 4 métodos de ayuda a la toma de decisión utilizados (elaboración propia).

Puesto en la clasificación	Año
1	2016
2	2017
3	2020
4	2021
5	2023
6	2022
7	2019
8	2018

Tabla 19. Clasificación de sostenibilidad por años atendiendo al valor promedio de la última fila de la tabla 18 (elaboración propia).

una clasificación de los índices para poder concluir el año más sostenible o, lo que es lo mismo, menos contaminante.

Una vez que se tienen los valores anuales normalizados y son validados por cada método, se comparan de mayor a menor. El resultado más alto es el año con mejor perfil ambiental o, lo que es lo mismo, con menor porcentaje global de contaminantes.

Para ello, se calcula el promedio de los resultados de los cuatro métodos utilizados previamente (tabla 19).

Atendiendo a los resultados promedio de los cuatro métodos, la clasificación de sostenibilidad sería la siguiente (tabla 19).

Conclusiones

Una vez que se han analizado los datos de la RCCA para los diferentes años, las conclusiones que se obtienen son las siguientes:

- Los métodos de ayuda a la toma de decisión permiten analizar series temporales de datos para establecer una lista, dado que los valores están normalizados y ponderados, lo que comprueba la robustez del estudio.
- Los cuatro métodos de ayuda a la toma de decisión utilizados arrojan resultados similares, por lo que el análisis es robusto.
- El método de la entropía es el único

que aporta resultados algo diferentes; los valores de los otros tres métodos son exactamente iguales, a pesar de tener fundamentos matemáticos diferentes.

• Según la tabla 19, se concluye lo siguiente:

- En contra de lo que inicialmente pudiera parecer, el periodo correspondiente al año 2016 es el más sostenible, dado que su índice agregado es el mayor de todos.
- El periodo del año 2020 (periodo del estado de alarma) es el tercero en la clasificación. Analizando los parámetros y comparándolos con otros años, se detectan valores bajos para el dióxido de azufre, monóxido de nitrógeno y dióxido de nitrógeno. En cambio, los parámetros de hidrocarburos policíclicos aromáticos y de ozono que pesan más en el análisis son medios-altos.
- El periodo del año 2018 es el menos sostenible, dado que su índice agregado es el menor de todos.

Bibliografía

Álvarez-Arenas, M. (2000): "Indicadores del Desarrollo Sostenible". *Ekonomi Gerizan*. N° 7: 114-131, Federación de Cajas de ahorros Vasco-Navarras, Bilbao.

Chiavenato, A. (2007): "Administración de

Recursos Humanos". McGraw-Hill Interamericana, Colombia.

García Vílchez, E.J., Sánchez Báscones, M.I. (2010): "Desarrollo del modelo de sostenibilidad integrado (M.S.I.) para la medida de la gestión sostenible de una industria de procesos: Aplicación al sector de fabricación de neumáticos". Universidad de Valladolid (España). Y/D Tesis 003933

Keeney, R. L. (1982): "Decision analysis. An Overview". Woodward-Clyde Consultants. San Francisco (California). doi:10.1057/jors.1982.89

Krajnc, D., Glavic, P. (2004): "A model for integrated assessment of Sustainable Development". *Resources, Conservation and Recycling*. Vol. 43, n° 2:189-208, Elsevier Ltd.

Krajnc, D., Glavic, P. (2005): "How to compare companies on relevant dimensions of sustainability". *Ecological Economics*. Vol. 55, n° 4: 551-553. Elsevier Ltd.

Quijano, A, Orozco, J.A. (2005): "Monitoreo de material particulado-fracción respirable (PM2,5) en Pamplona (Colombia)". *Revista de la Facultad de Ciencias Básicas*. Vol. 3, n° 2: 1-11.

Saaty, T.L. (1980): "The Analytic Hierarchy Process". McGraw-Hill, New York.

Saaty, T.L. (1982): "Decision making with the analytic hierarchy process". *International Journal of Services Sciences*. Vol.1, n° 1:83-98, Pittsburgh (Pensilvania).

Simon, H. (1960): "The new Science of Management Decision". Harper & Row, New York.

Venkata Rao, R. (2007): "Decision making in the manufacturing environment. Using graph theory and fuzzy multi attribute decision making". Springer-Verlag, London.

Web del Ayuntamiento de Valladolid (<https://www.valladolid.es/es/rccava>). Consultada entre el 01/02/2023 y el 31/07/2023.