

Bioindicación urbana: una aproximación a los líquenes epífitos en la ciudad de Madrid

Eduardo Sánchez de la Iglesia

Multiservicios Aeroportuarios, S.A (España) ✉

<https://dx.doi.org/10.5209/obmd.106441> Recibido: 21 de septiembre del 2025 / Enviado a evaluar: 24 de septiembre del 2025
/ Aceptado: 5 de diciembre del 2025

Resumen: Este artículo analiza la presencia de líquenes epífitos en la trama urbana madrileña en relación con la localización concreta de cada una de las estaciones que integran la Red de Vigilancia y Control de la Calidad del Aire del Ayuntamiento de Madrid. Con este punto de partida, se establece un análisis estadístico de los datos de contaminación aportados por las estaciones para comprobar la diferenciación existente en los distintos enclaves urbanos. Dando lugar a un trabajo de campo que aporta información sobre la existencia de ejemplares liquénicos como parte integrante del contexto ambiental en una de las ciudades más representativas del panorama internacional y donde la preservación del medio ambiente urbano sigue siendo una temática no exenta de debate. En este caso, llevando a cabo un trabajo sobre líquenes epífitos basado en el análisis de ejemplares de la especie arbórea *Ulmus Pumila* distribuidos ampliamente en la metrópoli madrileña, realizando un estudio homogéneo sobre los concionantes que influyen en la presencia liquénica en contextos urbanos. Obteniendo además una potencial herramienta vinculada con la educación ambiental de la ciudadanía y que puede ser empleada en la conformación de proyectos educativos de carácter ambiental.

Palabras clave: Talos liquénicos; contaminación; Madrid; análisis estadístico; *Ulmus Pumila*; Anova; Red de vigilancia y Control.

^{ENG} Urban bioindication: an approach to epiphytic lichens in the city of Madrid

^{ENG} **Abstract:** This article analyzes the presence of epiphytic lichens in the urban fabric of Madrid in relation to the specific location of each of the stations that make up the Madrid City Council's Air Quality Monitoring and Control Network. With this as a starting point, a statistical analysis of the pollution data provided by the stations is established to verify the differences between the various urban enclaves. This gives rise to fieldwork that provides qualitative information on the existence of lichen specimens as an integral part of the environmental context in one of the most representative cities on the international scene, where the preservation of the urban environment continues to be a subject of perpetual debate. In this case, research on epiphytic lichens was carried out based on the analysis of specimens of the tree species *Ulmus Pumila*, which is widely distributed in the Madrid metropolitan area, conducting a homogeneous study on the factors that influence the presence of lichens in urban contexts. This research also provides a potential tool linked to environmental education for citizens, which can be used in the development of environmental education projects.

Keywords: Lichen thalli; pollution; Madrid; statistical analysis; *Ulmus pumila*; ANOVA; Monitoring and Control Network.

FR Bioindication urbaine: une approche des lichens épiphytes dans la ville de Madrid

FR Résumé: Cet article analyse la présence de lichens épiphytes dans le tissu urbain madrilène en relation avec l'emplacement précis de chacune des stations qui composent le réseau de surveillance et de contrôle de la qualité de l'air de la mairie de Madrid. À partir de là, une analyse statistique des données de pollution fournies par les stations est établie afin de vérifier les différences existant entre les différents sites urbains. Il en résulte un travail de terrain qui apporte des informations qualitatives sur l'existence de spécimens lichéniques en tant que partie intégrante du contexte environnemental dans l'une des villes les plus représentatives du panorama international, où la préservation de l'environnement urbain reste un sujet de débat permanent. Dans ce cas, une recherche sur les lichens épiphytes a été menée à partir de l'analyse d'exemplaires de l'espèce arboricole *Ulmus Pumila* largement répandue dans la métropole madrilène, en réalisant une étude homogène sur les concionants qui influencent la présence des lichens dans les contextes urbains. Il a également permis d'obtenir un outil potentiel lié à l'éducation environnementale des citoyens, qui peut être utilisé dans l'élaboration de projets éducatifs à caractère environnemental.

Mots-clés: Thalos lichéniques; pollution; Madrid; analyse statistique; *Ulmus Pumila*; Anova; réseau de surveillance et de contrôle.

Sumario: 1. Introducción; 1.1. Metodología del estudio planteado. 1.2. Descripción de la zona de estudio: la urbe madrileña. 1.3. Métodos urbanos contemporáneos: isla de calor urbana. 1.4. Estrategia Madrid 360 para la preservación ambiental urbana. 1.5. Red de vigilancia y control. 1.6. Histórico de contaminación: análisis estadístico. 1.6.1. ANOVA de un factor. 1.7. Resultados del trabajo de campo. 1.8. Conclusiones. 1.9. Bibliografía.

Cómo citar: Sánchez de la Iglesia, E. (2025). "Bioindicación urbana: una aproximación a los líquenes epífitos en la ciudad de Madrid". *Observatorio Medioambiental*, 28(1), 31-48.

1. Introducción

En el contexto actual de urbanización acelerada, la conservación del medio ambiente urbano se ha convertido en una prioridad para garantizar la calidad de vida de los habitantes y la sostenibilidad de las ciudades. Los espacios urbanos no solo albergan a millones de personas, sino también a una diversidad de organismos que desempeñan funciones ecológicas esenciales. Entre estos organismos, los líquenes destacan como bioindicadores clave de la salud ambiental urbana.

Las ciudades son ecosistemas artificiales donde interactúan factores naturales y antropogénicos. La calidad del aire, la temperatura, el ruido, la disponibilidad de espacios verdes y la gestión de residuos son elementos que influyen directamente en el bienestar humano y en la biodiversidad urbana. La conservación de estos entornos implica no solo la protección de áreas verdes, sino también la implementación de políticas que reduzcan la contaminación y promuevan prácticas sostenibles.

Complementariamente a esta situación, cabe mencionar la importancia de los bioindicadores de contaminación atmosférica, mayoritariamente derivada de la actividad antrópica en el seno de los núcleos urbanos, que permiten recopilar información cualitativa y cuantitativa de gran utilidad para conocer su situación ambiental. Dentro de la catalogación de bioindicadores, se sitúan los líquenes, cuya importancia para concretar zonas de isocontaminación y áreas altamente contaminadas en el interior de grandes ciudades es ampliamente conocida.

Por lo que, en consecuencia, la producción científica en torno a esta temática ha experimentado un crecimiento significativo, lo que ha permitido la identificación de nuevas especies y un avance sustancial en el conocimiento de su ecología y funcionalidad. En particular, durante las décadas de 1970 y 1980 se llevaron a cabo numerosos estudios en entornos urbanos, algunos de ellos vinculados a la catalogación, en los que se comparaban los datos obtenidos con índices de referencia internacionales. A partir de estos estudios, se elaboraron mapas de isocontaminación en diferentes ciudades españolas como el caso de Madrid a través de

estudios como el realizado por Crespo et al. (1977). Cabe destacar que, en ese periodo, la problemática de la contaminación atmosférica no era ampliamente reconocida por la sociedad como un asunto de tanta gravedad, lo que otorga aún más valor a estos trabajos pioneros en el ámbito de la bioindicación urbana.

La conservación del medio ambiente urbano en este caso favorece la proliferación de talos líquénicos, lo que a su vez permite monitorear de forma natural y continua la calidad ambiental. Urbes que promueven la reducción de emisiones, el aumento de zonas verdes y la planificación ecológica tienden a presentar comunidades de líquenes más diversas y saludables. Estos organismos no solo cumplen una función bioindicadora, sino que también contribuyen al ciclo de nutrientes, a la formación de suelo y a la regulación climática.

1.1. Metodología del estudio planteado

La investigación dispuesta en este artículo busca establecer una aproximación de la presencia líquénica en la compleja trama urbana de la ciudad de Madrid, desde una perspectiva integradora que a su vez permita comprender las relaciones existentes entre las dimensiones ambiental y socioeconómica vinculadas con la preservación del medio ambiente urbano.

Partiendo de las características del entorno urbano madrileño, se ha optado por la adopción de un enfoque metodológico mixto que permita la obtención de resultados integrales. Este enfoque combina el análisis cuantitativo, basado en datos objetivos, con una perspectiva cualitativa que aporta profundidad interpretativa. Interrelacionando datos pertenecientes a indicadores ambientales publicados por el Ayuntamiento de Madrid (2024b), desgregados por distritos, como base para el análisis cuantitativo, así como una revisión de información cualitativa sobre el área de estudio y las características propias de los talos líquénicos para complementar el estudio y desarrollar la visión integral que pretende. Además, el trabajo de campo realizado ha permitido obtener una serie de resultados de índole cuantitativo expuestos en los apartados finales de este trabajo.

La metodología aplicada se ha estructurado en varias fases aplicando en consecuencia el enfoque mixto del trabajo. En primer lugar, se delimitó el área de estudio y se seleccionaron los puntos de muestreo en función de la red de estaciones de medición de contaminantes del Ayuntamiento de Madrid (2023a). Posteriormente, se identificaron los ejemplares arbóreos presentes en dichas zonas, priorizando aquellos que presentan determinadas condiciones: árboles aislados, no integrados en formaciones densas, y sin rebrotes en la base ni en el tronco.

Para la selección específica de los ejemplares se utilizó la herramienta digital “Un alcornoque un árbol”, desarrollada por el Ayuntamiento de Madrid, que permite consultar los criterios de plantación y las especies alóctonas introducidas en el arbolado urbano de la ciudad como se puede observar en Ayuntamiento de Madrid (2023b).

Como punto de referencia de localización exacta de cada estación, se ha considerado una circunferencia de 1,5 kilómetros de diámetro como área de muestreo con centro en las coordenadas exactas donde se sitúan cada una de las estaciones que integran la Red para cada uno de los veinticinco enclaves concretos que serán estudiados para esta tarea en particular. Encontrándose ubicados, todos y cada uno de los ejemplares arbóreos seleccionados para este fin, en el interior de dicha área de muestreo.

Precisamente en consonancia con lo anterior, y a partir de la información recopilada en Ayuntamiento de Madrid (2023b), se ha considerado la selección de ejemplares de una de las especies arbóreas alóctonas más abundantes en el entorno urbano madrileño como *Ulmus pumila* conocido popularmente como “Olmo de Siberia”. Una especie presente prácticamente en la totalidad de la ciudad y distribuida en un amplio rango de localizaciones.

Para la elaboración del estudio se ha optado por elegir seis ejemplares de dicha especie en cada uno de los puntos, salvo en el caso de las estaciones de tipología suburbana que no se han tenido en cuenta en esa parte del estudio de campo (Casa de Campo y Juan Carlos I) ya que las propias estaciones se encuentran influenciadas e inmersas en dos de los principales espacios verdes de la ciudad. Encontrándose además a cierta distancia del resto de la trama urbana y no cumpliendo por consiguiente con el resto de los criterios señalados para la homogenización del análisis.

2. Descripción de la zona de estudio: la urbe madrileña

Tomando como base lo expuesto anteriormente, resulta fundamental destacar que el desarrollo y la persistencia de los talos líquénicos en entornos urbanos están condicionados por una multiplicidad de factores, tanto directos como indirectos. “Las ciudades ya no están en la posición de competir aisladas. Tienen que basarse en una cultura de innovación para asegurar la sostenibilidad a largo plazo” (Vegara, 2008,9). Entre ellos, el medio físico se presenta como un elemento determinante, dada su capacidad para influir en la distribución y estabilidad de las comunidades líquénicas. Por este motivo, se considera imprescindible comentar algunas de las principales influencias del medio físico madrileño, con el objetivo de evaluar su papel en la conformación de una biodiversidad líquénica cosmopolita y estable. Asimismo, este estudio permite cuestionar si dicho medio actúa como un factor limitante en aquellas zonas donde no se ha logrado establecer una presencia líquénica consolidada, lo que podría estar relacionado con condiciones ambientales desfavorables o con alteraciones derivadas del proceso de urbanización. “Una ciudad deja de ser sostenible cuando provoca el empobrecimiento del medio sobre el que se sitúa, evitando entrar en una dinámica en la que se van empobreciendo los recursos de los medios físicos más cercanos provocando a su vez una mayor contaminación” (Mora y Castellano, 2002, 406).

El entorno físico de Madrid se caracteriza por una marcada heterogeneidad como se refleja en Instituto Geográfico Nacional (2025), resultado de los procesos de transformación urbanística que han tenido lugar en las últimas décadas. Estas modificaciones han influido significativamente en la configuración territorial de la ciudad, generando impactos tanto en el ámbito socioeconómico como en el ambiental. “El crecimiento urbano de nuestra ciudad está directamente unido a los mecanismos que operan en el sector inmobiliario, generando procesos consecuencia de su actuación” (Sotelo et al., 2021, 449).

Esta evolución ha afectado directamente a organismos sensibles como los líquenes, cuya respuesta a las variaciones climáticas y a la contaminación atmosférica es especialmente acusada. La complejidad geográfica de Madrid, como señala Valenzuela (2010), ha exigido históricamente la revisión y actualización de las políticas de ordenación territorial, mediante la identificación de los factores que impulsan su dinámica urbana. Desde una perspectiva geofísica, Madrid se sitúa en el centro de la Península Ibérica, alejada de influencias marítimas, lo que condiciona su clima y su exposición a determinados agentes ambientales. Con una altitud media de 657 metros sobre el nivel del mar, según datos del Instituto Geográfico Nacional (2025), el relieve madrileño presenta una notable diversidad, influido por la presencia de tres sistemas montañosos principales dentro de la Comunidad Autónoma. Entre ellos destaca la cumbre de Peñalara, que alcanza los 2.428 metros de altitud y constituye no solo un enclave de alto valor ecológico, sino también un referente histórico en el proceso de transformación urbana de la región.

3. Métodos urbanos contemporáneos: isla de calor urbana

El desarrollo de nuevas tecnologías y los avances científicos han desempeñado un papel fundamental en la consolidación de estándares eficaces relacionados con la calidad de vida en los entornos urbanos. Estas circunstancias han influido también en la consideración climática de dichos espacios, los cuales están sujetos a dinámicas complejas propias de las grandes metrópolis a nivel internacional, más allá del caso concreto de Madrid. En el caso de la climatología urbana nos encontramos ante un campo de investigación con un notable potencial, impulsado por los avances tecnológicos, especialmente aquellos vinculados a los sistemas de información geográfica. Estas particularidades hacen que el estudio del clima urbano requiera metodologías específicas, capaces de abordar fenómenos de gran relevancia en la meteorología contemporánea, como la isla de calor urbana, la cual se manifiesta en dos vertientes principales: la isla de calor atmosférica y la superficial.

Por una parte, nos encontramos en el tipo atmosférico que tal y como se expone en Fernández y Martilli (2012) hace referencia a las diferentes zonas climáticas que se establecen dentro de la propia ciudad en las que se podría hablar de partes urbanas propiamente dichas y zonas más rurales ligadas al más puramente medio ambiente establecido en ellas. Realmente este tipo de isla es el más preocupante y el que más afecta a las grandes ciudades entre otras cosas por el impacto de la radiación solar sobre el pavimento que en la mayoría de ellas ocupa un gran porcentaje de su superficie. Un hecho palpable a través de lo argumentado por Correa et al. (2003) donde se indica que la temperatura en las capas superficiales del pavimento es muy superior a la temperatura ambiente. Aunque este acontecimiento no ocurre durante todas las épocas del año

ni durante todas las horas del día de una manera regular, sino que el nivel de insolación y absorptividad depende de una gran variabilidad de factores. De hecho, los estudios relacionados con la investigación de las diferencias térmicas existentes, como trasciende de Fernández y Martilli (2012), entre la temperatura de los elementos más representación del contexto urbano y la temperatura ambiente tipo de la gran urbe es una materia aún con mucho potencial de análisis desde el terreno científico. Correa et al. (2003) señalan en su investigación y ejemplificando la argumentación anterior las diferencias existentes entre materiales como el asfalto o el hormigón a la hora de absorber la radiación solar y calentarse de forma superficial. Por lo que la configuración y selección de materiales a la hora de desarrollar los elementos propios del medio urbano tienen un peso específico en lo respectivo a la generación de la isla de calor urbana y por ende al calentamiento térmico de las grandes ciudades.

La segunda tipología, identificada como isla de calor superficial, se caracteriza por la presencia de múltiples factores que incrementan su complejidad analítica. De acuerdo con Fernández y Martelli (2012), esta categoría se refiere a la variabilidad térmica entre superficies de origen artificial —como pavimentos, aceras, cubiertas de edificaciones y techos de vehículos— y superficies naturales, principalmente vegetación arbórea y arbustiva. Esta diferenciación térmica responde a las propiedades físicas de los materiales, como la capacidad de absorción y emisión de calor, que influyen directamente en la temperatura superficial del entorno urbano.

Todos los argumentos expuestos conducen a considerar que el progresivo desencadenamiento de eventos climáticos extremos, observado en múltiples regiones del planeta, así como el incremento generalizado de las temperaturas como consecuencia del cambio climático, pueden verse intensificados por el efecto isla de calor urbana en el interior de las grandes ciudades. Este fenómeno adquiere especial relevancia en urbes de características similares a Madrid, donde la configuración urbana y la densidad poblacional contribuyen a acentuar sus impactos. “Las situaciones anticiclónicas, el día despejado y las temperaturas nocturnas muy bajas, favorecen las islas de calor intensas; mientras que las situaciones sinópticas contrarias, bajas presiones, cielos cubiertos y precipitaciones, favorecen las islas de calor débil” (Almendros y López, 1995, 221). Las notables diferencias existentes entre zonas y distritos permiten identificar diversas realidades en el proceso de asentamiento sobre el entorno urbano. En este sentido, resulta cada vez más habitual recurrir al estudio de estas variables mediante indicadores específicos, con el propósito de evaluar su impacto en la calidad ambiental de grandes entornos urbanos como es el caso de los publicados por Ayuntamiento de Madrid (2024a).

En el marco del presente estudio, resulta pertinente abordar la realidad actual de Madrid desde una perspectiva histórica, con el fin de identificar las transformaciones que han contribuido al fortalecimiento del carácter arraigado de su sociedad contemporánea. Cabe destacar que la consideración de Madrid como una de las principales capitales europeas y como una urbe de reconocimiento internacional es, en términos históricos, un fenómeno relativamente reciente. Sin olvidar que, en la actualidad, la ciudad de Madrid cuenta con una población superior a los tres millones de habitantes, según los datos proporcionados por el Ayuntamiento de Madrid (2024a). Esta cifra, que representa un volumen demográfico considerable, se encuentra en consonancia con los registros poblacionales de otras grandes capitales europeas. No obstante, al analizar la evolución histórica de la ciudad, se observa que su desarrollo y consolidación como núcleo urbano de relevancia se produjo, de manera significativa, a partir de la segunda mitad del siglo XX.

Concretamente, la primera transformación significativa de la concepción madrileña como una ciudad relevante en el contexto nacional se remonta hasta el siglo XVI, cuando por expresa elección del rey Felipe II se convirtió en la sede permanente de la Corte nacional como se interpreta de lo comentado en Ramos y Revilla (2021). Ese fue el comienzo de la hegemonía madrileña como centro neurálgico político y socioeconómico español, aunque son muchos los cambios sucedidos a lo largo de la historia que han permitido construir el Madrid del siglo XXI. En este sentido, la demografía y el aumento de la capacidad financiera de la población juegan un papel fundamental a la hora de la consolidación de una ciudad dentro del paradigma internacional de grandes urbes. Aunque el afianzamiento y la atracción urbana para establecer nuevos residentes, está estrechamente ligado al desarrollo de oportunidades laborales y a un crecimiento prolongado del nivel de vida sustentado en el progreso de nuevas tecnologías e infraestructuras. “La ciudad entendida como organismo vivo que se reescribe y rehace, se va transformando de forma continua, se transforma sus formas y aspectos dando cabida a diversos tipos arquitectónicos, urbanos y geográficos que se adaptan a las realidades sociales, políticas y económicas” (Sotelo, 2017, 301).

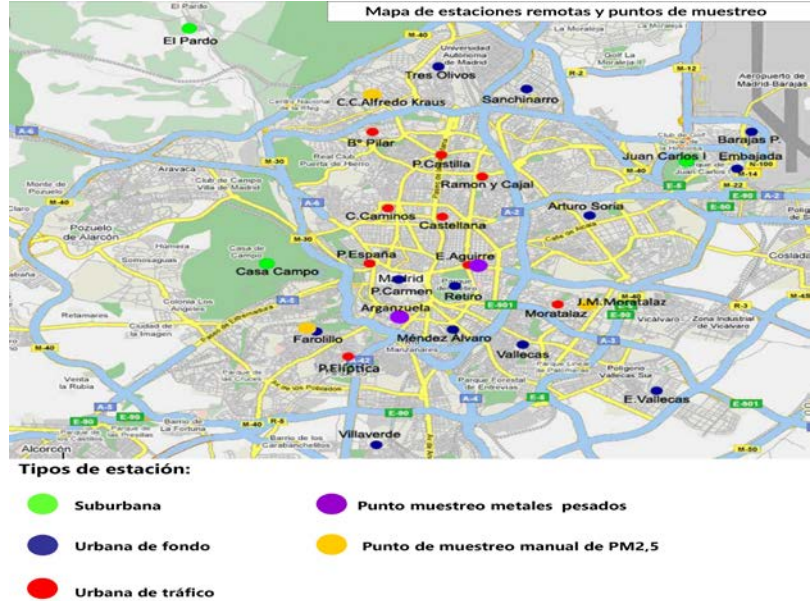
4. Estrategia Madrid 360 para la preservación ambiental urbana

Como parte de los esfuerzos y proyectos más representativos que afectan al grado de preservación y conservación del medio ambiente urbano de la ciudad de Madrid, el Ayuntamiento ha puesto en marcha en las últimas anualidades una iniciativa bajo la denominación de Estrategia Urbana 360, donde se sitúa la sostenibilidad como una de las temáticas más arraigadas a las preocupaciones institucionales de la gobernanza municipal. Este punto de partida implica una planificación que prioriza el equilibrio ecológico, la eficiencia energética y la resiliencia frente al cambio climático, promoviendo un modelo de ciudad que minimice su impacto ambiental. Incluyendo proyectos que profieran un aumento representativo de la conservación ambiental urbana y, en consecuencia, asociado a esta investigación concreta, a la preservación de ejemplares y poblaciones líquenicas distribuidas en el contexto metropolitano. Siendo algunas de ellas como se expone en Ayuntamiento de Madrid (2025), aumento de zonas verdes, la renaturalización de espacios urbanos degradados y la mejora del espacio público contribuyendo además a la reducción de la temperatura urbana y mejora de la calidad del aire y el bienestar psicológico de los ciudadanos. Adicionalmente en relación con lo publicado en Ayuntamiento de Madrid (2025), otros objetivos asociados a las condiciones atmosféricas y ambientales son perseguidos a través de esta estrategia metropolitana como el uso de modos de transporte sostenibles o la transformación positiva de infraestructuras urbanas considerando el uso de tecnologías limpias y la rehabilitación energética de edificios. Esta situación genérica crea un contexto apropiado para el optimismo futuro con relación a perspectivas futuras donde la sostenibilidad y el cuidado del entorno urbano ganen enteros generando así un impacto positivo en términos socioeconómicos y ambientales que ratifiquen una mejora representativa de los estándares de calidad de vida de la ciudadanía a la par que certifiquen la presencia de una biodiversidad sólida ampliamente distribuida por la totalidad de la metrópoli.

5. Red de vigilancia y control

En relación con lo expuesto anteriormente acerca de la importancia de la sostenibilidad y la calidad de vida en el contexto urbano madrileño, es momento de prestar atención a la actual Red de Control y Vigilancia de la Calidad del Aire y en particular a la situación actual de las estaciones que la integran, con el objetivo de estudiar en detalle cada una de las zonas específicas.

Figura 1. Representación sobre el relieve madrileño de las estaciones fijas que integran la Red de control de calidad del aire del Ayuntamiento de Madrid.



Fuente: Ayuntamiento de Madrid (2024b).

La figura precedente orienta el desarrollo de la sección práctica de este estudio, al ilustrar el criterio seguido para la selección de los puntos de muestreo, determinados en función de su ubicación dentro de la geografía de Madrid. Como complemento a dicha representación gráfica, se ha confeccionado la tabla que se presenta a continuación, con el propósito de categorizar cada tipología de estación según su emplazamiento en el entorno urbano.

Tabla 1: Dirección y tipología de las estaciones que integran la Red de Control y Vigilancia de la calidad del aire del Ayuntamiento de Madrid.

Nombre de la estación	Tipo de estación	Dirección de la estación
Arganzuela	Muestreo metales pesados	C/ Canarias, 17
Arturo Soria	Urbana de fondo	C/ Arturo Soria esq. C/ Vizconde de los Asilos
Barajas Pueblo	Urbana de fondo	C/ Júpiter, 21
Barrio del Pilar	Urbana de tráfico	Avd. Betanzos esq. C/ Monforte de Lemos
Casa de Campo	Suburbana	Casa de Campo. Terminal del Teleférico
Castellana	Urbana de tráfico / indicador PM _{2,5}	C/ José Gutiérrez Abascal
C.C. Alfredo Kraus	Indicador PM _{2,5}	Glorieta Pradera de Vaquerizas, 9
Cuatro Caminos	Urbana de tráfico/ indicador PM _{2,5}	Avda. Pablo Iglesias esq. c/ Marqués de Lema
El Pardo	Suburbana	Avda. de la Guardia
Ensanche de Vallecas	Urbana de fondo	Avda. La Gavia - Avda. Las Suertes
Escuelas Aguirre	Tráfico/Indicador PM _{2,5} / Metales pesado	C/ Alcalá y C/ O' Donnell
Farolillo	Indicador PM _{2,5} /Urbana de fondo	C/ Farolillo esq. C/ Ervigio
J. M. Moratalaz	Indicador PM _{2,5}	C/ Fuente Carrantona, 8
Juan Carlos I	Suburbana	Parque Juan Carlos I
Méndez Álvaro	Urbana de fondo/ indicador PM _{2,5}	C/Juan de Mariana - Pza. Amanecer Méndez Álvaro
Moratalaz	Urbana de tráfico	Avda. Moratalaz esq. Camino de Vinateros
Plaza de Castilla	Urbana de tráfico/ indicador PM 2,5	Plaza Castilla - Canal
Plaza de España	Urbana de tráfico	C/ Princesa esq. Plaza de España
Plaza del Carmen	Urbana de fondo	Plaza del Carmen esq. Tres Cruces
Plaza Elíptica	Urbana de tráfico/ indicador PM 2,5	Plaza Elíptica - Avda. Oporto
Ramón y Cajal	Urbana de tráfico	Avda. Ramón y Cajal esq. c/ Príncipe de Vergara
Retiro	Urbana de fondo	Paseo Venezuela - Casa de Vacas
Sanchinarro	Urbana de fondo/ indicador PM 2,5	C/ Princesa de Éboli esq. C/ María Tudor
Tres Olivos	Urbana de fondo	Plaza de Tres Olivos
Urbanización Embajada	Urbana de fondo	C/ Riaño
Vallecas	Urbana de fondo	C/ Arroyo del Olivar esq. C/ Río Grande
Villaverde	Urbana de fondo	C/ Juan Peñalver

Fuente: Elaboración propia a partir de la información publicada en Ayuntamiento de Madrid (2024b).

En función de esta circunstancia, las primeras comparaciones se establecerán atendiendo a la tipología de las estaciones de muestreo, las cuales presentan características homogéneas dentro del entorno urbano. Cabe señalar que algunas estaciones pertenecen simultáneamente a varias categorías, dado que en un mismo emplazamiento pueden coexistir diversos equipos de análisis destinados al monitoreo de múltiples contaminantes atmosféricos según se indica en Ayuntamiento de Madrid (2024b).

La implementación de una normativa ambiental más estricta, junto con el incremento en la concienciación ciudadana y el compromiso institucional, ha propiciado el desarrollo de una red de vigilancia ambiental compuesta por estaciones de diversa tipología. Esta infraestructura ha permitido una mejora sustancial en la estabilidad y fiabilidad de los datos cuantitativos sobre contaminantes atmosféricos, como resultado directo de la inversión pública en tecnología de monitoreo.

La clasificación de las estaciones, según lo establecido por el Ayuntamiento de Madrid (2024b), se organiza en función de su ubicación y funcionalidad dentro del tejido urbano, distinguiéndose las siguientes categorías: estaciones urbanas de tráfico, estaciones urbanas de fondo, estaciones suburbanas, puntos de muestreo de metales pesados y puntos manuales de toma de datos de partículas $PM_{2,5}$.

Esta categorización representa una limitación operativa en la incorporación de equipos de análisis específicos, dado que cada tipo de estación responde a objetivos diferenciados. Las estaciones urbanas de fondo están diseñadas para evaluar los niveles de exposición ambiental de la población; las estaciones urbanas de tráfico permiten estimar el impacto del tránsito vehicular en zonas específicas; y las estaciones suburbanas, ubicadas en áreas periféricas, se orientan al control de la concentración de ozono troposférico, especialmente en zonas donde se registran los niveles más elevados de este contaminante.

Concretamente la red está integrada como se deriva de Ayuntamiento de Madrid (2024b) por 9 estaciones urbanas de tráfico, 11 urbanas de fondo, 3 suburbanas, 2 puntos de muestreo de metales pesados y 3 puntos de muestreo manuales de $PM_{2,5}$. Atendiendo a un matiz importante puesto que la estación urbana de fondo de Farolillo también se desarrolla como punto manual de muestreo de $PM_{2,5}$, así como la estación urbana de tráfico Escuelas Aguirre posee una doble función al ejercer como puntos de muestreo de metales pesados.

La evolución reciente de la red de estaciones fijas de vigilancia de la calidad del aire del Ayuntamiento de Madrid pone de manifiesto su adaptación a las nuevas exigencias normativas y a una creciente sensibilidad ambiental. Esta transformación responde tanto a la implementación de políticas más estrictas como al aumento de la conciencia ciudadana sobre los efectos de la contaminación atmosférica.

No obstante, esta reestructuración ha implicado la retirada de ciertos dispositivos de medición que anteriormente proporcionaban datos relevantes para el análisis histórico y la identificación de focos puntuales de contaminación. En particular, a partir de enero de 2021, se produjo una modificación significativa en la configuración de la red, con la eliminación de todos los analizadores de hidrocarburos distribuidos en distintas estaciones, según lo documentado por el Ayuntamiento de Madrid (2024b). Esta decisión conllevó la interrupción del registro de compuestos como hidrocarburos totales, metano e hidrocarburos no metánicos, considerados de menor relevancia en el contexto urbano actual por las administraciones actuales.

Asimismo, de acuerdo con Ayuntamiento de Madrid (2024b), se retiraron cinco equipos de medición de monóxido de carbono ubicados en las estaciones de Arturo Soria, Casa de Campo, Moratalaz, Barrio del Pilar y Sanchinarro, así como cuatro analizadores de dióxido de azufre instalados en Villaverde, Casa de Campo, Cuatro Caminos y Vallecas.

Como complemento a esta red fija, se han incorporado unidades móviles de detección de contaminantes, cuya función es especialmente relevante dentro del sistema integral de monitoreo. Estas unidades permiten realizar mediciones en ubicaciones variables, atendiendo a necesidades específicas de análisis, lo que amplía la cobertura espacial y mejora la capacidad de respuesta ante situaciones emergentes.

6. Histórico de contaminación: análisis estadístico

El análisis estadístico desarrollado en esta investigación ha sido realizado mediante el software Microsoft Excel. Aunque este programa no está específicamente diseñado para estudios estadísticos avanzados, ofrece funcionalidades suficientes para ejecutar pruebas estadísticas básicas a través de la herramienta "Análisis de datos" y mediante el uso de fórmulas específicas adaptadas a cada tipo de prueba aplicada.

En función de las variables consideradas, y con el objetivo de evaluar su grado de dependencia o independencia, se han implementado distintos métodos estadísticos, entre los que destacan: el análisis de varianza de un factor (ANOVA), el coeficiente de correlación lineal y el coeficiente de correlación de Pearson. Estas técnicas permiten establecer relaciones significativas entre los datos recopilados, ya sean de naturaleza cualitativa o cuantitativa, y proporcionan evidencia empírica sobre la existencia o ausencia de vínculos entre las variables analizadas.

6.1. ANOVA de un factor

El análisis de varianza (ANOVA) se ha consolidado como una técnica estadística ampliamente utilizada en contextos científicos y empresariales, debido a su capacidad para evaluar el efecto de una variable independiente sobre la media de una variable dependiente. Esta herramienta permite comparar las medias entre distintos grupos, facilitando la identificación de posibles relaciones significativas o, en su defecto, la ausencia de asociación entre ellos.

Tal como señalan Boqué y Maroto (2004), el ANOVA se fundamenta en la descomposición de las fuentes de variabilidad presentes en los datos, lo que permite distinguir entre la variación atribuible al factor estudiado y la variación residual. Esta capacidad de segmentar la varianza es clave para interpretar los resultados con rigor y establecer conclusiones fundamentadas en evidencia estadística.

A través de este argumento debemos explicar las dos hipótesis sobre las que se basa esta herramienta y que en consecuencia posibilitan averiguar si existen diferencias significativas o no entre las muestras tomadas; $H0: \mu_1=\mu_2=\dots=\mu_k$, y, $H1$:no todas las medias son iguales

Estas dos hipótesis de partida sobre las que discurre esta prueba estadística posibilitan la comparación acerca de si existe una igualdad significativa entre las medias consideradas o si por el contrario existe evidencia estadística de que las medias de los datos obtenidos son significativamente desiguales.

Una vez explicado lo anterior, vamos a utilizar esta prueba para concluir si los valores promedio de NO_2 , PM_{10} y $PM_{2,5}$ fundamentados en los datos procedentes de Ayuntamiento de Madrid (2024b) durante el periodo de 2018-2023 son iguales o si por el contrario se puede rechazar la hipótesis nula y concluir que existen diferencias significativas entre dichos valores y la ubicación de la estación donde han sido valorados.

Para ello se ha configurado una primera tabla resumen con toda la información de carácter cuantitativo aportada por Ayuntamiento de Madrid (2024b) de las 24 estaciones que detectaron NO_2 en el periodo establecido dentro de la red madrileña.

Tabla 2. Resumen anual de valores de NO_2 medidos en cada una de las estaciones que integran la Red del Ayuntamiento de Madrid.

Ensanche de Vallecas	Escuelas Aguirre	Farolillo	Juan Carlos I	Méndez Álvaro	Moratalaz	Plaza de Castilla	Plaza de España	Plaza del Carmen
37	55	34	25	35	39	40	43	45
37	51	33	26	34	36	37	40	36
31	35	27	19	27	29	28	31	29
27	35	28	21	29	31	33	28	31
29	34	28	21	29	29	33	25	31
30	33	27	22	28	29	30	28	31

Plaza Elíptica	Ramón y Cajal	Retiro	Sanchinarro	Tres Olivos	Urbanización Embajada	Vallecas	Villaverde
43	43	29	31	28	41	37	37
39	39	25	31	25	38	36	39
42	32	21	24	26	27	29	31
43	33	23	26	29	32	30	36
40	31	22	26	26	31	31	35
36	33	20	24	21	29	30	36

Fuente: Elaboración propia a partir de la información publicada en Ayuntamiento de Madrid (2024b).

Siendo las siguientes hipótesis las que se pretenden comprobar con relación a este caso.

H0: los valores de NO₂ medidos son iguales en todas las estaciones.

H1: los valores de NO₂ medidos no son iguales en todas las estaciones.

Obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 3. Resumen resultados análisis de la varianza de la prueba Anova para los valores promedio de NO₂.

RESUMEN					
	Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Arturo Soria		6	184	30,66666667	19,86666667
Barajas Pueblo		6	212	35,33333333	9,46666667
Barrio del Pilar		6	187	31,16666667	25,36666667
Casa de Campo		6	107	17,83333333	3,36666667
Castellana		6	185	30,83333333	22,16666667
Cuatro Caminos		6	202	33,66666667	27,46666667
El Pardo		6	85	14,16666667	1,36666667
Ensanche de Vallecas		6	191	31,83333333	17,76666667
Escuelas Aguirre		6	243	40,5	95,9
Farolillo		6	177	29,5	9,9
Juan Carlos I		6	134	22,33333333	7,06666667
Méndez Álvaro		6	182	30,33333333	11,06666667
Moratalaz		6	193	32,16666667	18,56666667
Plaza de Castilla		6	201	33,5	19,5
Plaza de España		6	195	32,5	53,1
Plaza del Carmen		6	203	33,83333333	35,36666667
Plaza Elíptica		6	243	40,5	7,5
Ramón y Cajal		6	211	35,16666667	22,56666667
Retiro		6	140	23,33333333	10,66666667
Sanchinarro		6	162	27	10,4
Tres Olivos		6	155	25,83333333	7,76666667
Urbanización Embajada		6	198	33	29,2
Vallecas		6	193	32,16666667	11,76666667
Villaverde		6	214	35,66666667	7,06666667

ANÁLISIS DE VARIANZA						
	Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad
Entre grupos		5402,659722	23	234,8982488	11,6422344	6,16473E-21
Dentro de los grupos		2421,166667	120	20,17638889		
Total		7823,826389	143			

	Valor crítico para F
	1,61965543

Fuente: Elaboración propia.

Por lo tanto y tal como se puede confirmar a través de los resultados que se muestra en la tabla Anova, $F >$ Valor crítico de F lo que significa que podemos rechazar H0 y aceptar la hipótesis alternativa H1. Concluyendo en consecuencia, que existe evidencia estadística con un nivel de significación de 0,05, de que los valores anuales de NO₂ medidos no son iguales en todas las estaciones y que existe una relación entre éstos y la ubicación de las estaciones por las que sean detectados.

De la misma manera que se ha procedido para el caso de los valores de NO₂, se ha procedido a realizar una prueba semejante en lo referente a los valores de PM₁₀ para el mismo intervalo temporal que el anterior. Siendo en esta ocasión las estaciones que miden este contaminante en la red madrileña únicamente 13, cuyos datos derivados de Ayuntamiento de Madrid (2024b) se han resumido en la tabla que se muestra a continuación:

Tabla 4. Resumen anual de valores de PM₁₀ medidos en cada una de las estaciones que integran la Red del Ayuntamiento de Madrid.

Nombre de la estación	Casa de Campo	Castellana	Cuatro Caminos	Escuelas Aguirre	Farolillo
Promedio valores PM ₁₀ 2018 (µg/m3)	17	16	18	21	18
Promedio valores PM ₁₀ 2019 (µg/m3)	13	18	18	21	15
Promedio valores PM ₁₀ 2020 (µg/m3)	16	17	19	19	17
Promedio valores PM ₁₀ 2021 (µg/m3)	19	18	16	18	19
Promedio valores PM ₁₀ 2022 (µg/m3)	21	18	21	18	21
Promedio valores PM ₁₀ 2023 (µg/m3)	16	18	19	21	20

Méndez Álvaro	Moratalaz	Plaza de Castilla	Plaza Elíptica	Sanchinarro	Tres Olivos	Urbanización Embajada	Vallecas
16	21	17	23	18	19	21	20
17	20	18	20	15	15	21	18
15	20	16	15	15	14	22	18
18	20	21	17	17	14	24	21
21	22	21	22	17	19	26	23
18	18	19	24	15	18	24	16

Fuente: elaboración propia a partir de la información publicada en Ayuntamiento de Madrid (2024b).

Siendo las siguientes hipótesis las que se pretenden comprobar en relación con este caso.
H0: los valores de PM10 medidos son iguales en todas las estaciones.
H1: los valores de PM10 medidos no son iguales en todas las estaciones.

Obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 5: Resumen resultados análisis de la varianza de la prueba Anova para los valores promedio de PM10

RESUMEN						
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza		
Casa de Campo	6	102	17	7,6		
Castellana	6	105	17,5	0,7		
Cuatro Caminos	6	111	18,5	2,7		
Escuelas Aguirre	6	118	19,66666667	2,266666667		
Farolillo	6	110	18,33333333	4,666666667		
Méndez Álvaro	6	105	17,5	4,3		
Moratalaz	6	121	20,16666667	1,766666667		
Plaza de Castilla	6	112	18,66666667	4,266666667		
Plaza Elíptica	6	121	20,16666667	12,56666667		
Sanchinarro	6	97	16,16666667	1,766666667		
Tres Olivos	6	99	16,5	5,9		
Urbanización Embajada	6	138	23	4		
Vallecas	6	116	19,33333333	6,266666667		

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	247,8205128	12	20,6517094	4,56844394	2,63163E-05	1,904369611
Dentro de los grupos	293,8333333	65	4,520512821			
Total	541,6538462	77				

Fuente: Elaboración propia.

Por lo tanto y tal como se puede confirmar a través de los resultados que se muestra en la tabla Anova, $F >$ Valor crítico de F lo que significa que podemos proceder a rechazar H_0 y aceptar la hipótesis alternativa H_1 . Concluyendo, por consiguiente, que existe evidencia estadística con un nivel de significación de 0,05, de que los valores anuales de PM_{10} medidos no son iguales en todas las estaciones y que existe una relación entre éstos y la ubicación de las estaciones por las que sean detectados.

En la misma línea continuista, se ha considerado el mismo ensayo para los valores publicados de $PM_{2,5}$ por Ayuntamiento de Madrid (2024 b) para el mismo intervalo temporal. En este caso integrado tan solo por las 7 estaciones dentro de la red que realizan mediciones para este contaminante.

Tabla 6. Resumen anual de valores de $PM_{2,5}$ medidos en cada una de las estaciones que integran la Red del Ayuntamiento de Madrid.

Nombre de la estación	Casa de Campo	Castellana	Cuatro Caminos	Escuelas Aguirre	Méndez Álvaro	Plaza de Castilla	Plaza Elíptica
Promedio valores $PM_{2,5}$ 2018 ($\mu g/m^3$)	8	10	10	11	10	10	13
Promedio valores $PM_{2,5}$ 2019 ($\mu g/m^3$)	8	9	10	10	10	9	12
Promedio valores $PM_{2,5}$ 2020 ($\mu g/m^3$)	9	10	10	10	8	8	10
Promedio valores $PM_{2,5}$ 2021 ($\mu g/m^3$)	10	10	9	9	10	10	10
Promedio valores $PM_{2,5}$ 2022 ($\mu g/m^3$)	9	9	10	10	9	9	11
Promedio valores $PM_{2,5}$ 2023 ($\mu g/m^3$)	8	10	10	10	9	8	12

Fuente: Elaboración propia a partir de la información publicada en Ayuntamiento de Madrid (2024b).

Siendo las siguientes hipótesis las que se pretenden comprobar con relación a este caso:

H_0 : los valores de $PM_{2,5}$ medidos son iguales en todas las estaciones.

H_1 : los valores de $PM_{2,5}$ medidos no son iguales en todas las estaciones.

Obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 7. Resumen resultados análisis de la varianza de la prueba Anova para los valores promedio de $PM_{2,5}$.

RESUMEN						
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza		
Casa de Campo	6	52	8,666666667	0,666666667		
Castellana	6	58	9,666666667	0,266666667		
Cuatro Caminos	6	59	9,833333333	0,166666667		
Escuelas Aguirre	6	60	10	0,4		
Méndez Álvaro	6	56	9,333333333	0,666666667		
Plaza de Castilla	6	54	9	0,8		
Plaza Elíptica	6	68	11,333333333	1,466666667		

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	26,80952381	6	4,468253968	7,055137845	5,5782E-05	2,371781196
Dentro de los grupos	22,16666667	35	0,633333333			
Total	48,97619048	41				

Fuente: Elaboración propia.

En este sentido y tal como se puede confirmar a través de los resultados que se muestra en la tabla Anova, $F >$ Valor crítico de F lo que significa que podemos proceder a rechazar H_0 y aceptar la hipótesis alternativa H_1 . Concluyendo, por consiguiente, que existe evidencia estadística con un nivel de significación de 0,05, de que

los valores anuales de PM2,5 medidos no son iguales en todas las estaciones y que existe una relación entre éstos y la ubicación de las estaciones por las que sean detectados.

A raíz de las tres pruebas llevadas a cabo con anterioridad y su vinculación con las conclusiones significativas de índole estadística por separado, se ha considerado de interés ejecutar un análisis similar teniendo en cuenta los datos de los tres contaminantes en aquellas estaciones que realizan mediciones de estos compuestos para averiguar si se puede establecer una relación entre la interacción de estos. Esta circunstancia ha propiciado la generación de una tabla que se encuentra conformada por los valores promedio de las anualidades por tipo de contaminante de las seis estaciones que generan datos asociados a todos ellos.

Tabla 8. Comparación de los valores anuales 2018-2023 de las estaciones que miden NO₂, PM₁₀ y PM_{2,5}.

		Valores promedio 2018-2023 (µg/m3)		
		NO2	PM10	PM2,5
Estación	Casa de Campo	20	17	8
		20	13	8
		16	16	9
		18	19	10
		17	21	9
		16	16	8
	Castellana	39	16	10
		34	18	9
		28	17	10
		28	18	10
		27	18	9
		29	18	10
	Cuatro Caminos	42	18	10
		38	18	10
		30	19	10
		33	16	9
		30	21	10
		29	19	10
	Escuelas Aguirre	55	21	11
		51	21	10
		35	19	10
		35	18	9
		34	18	10
		33	21	10
	Méndez Álvaro	35	16	10
		34	17	10
		27	15	8
		29	18	10
		29	21	9
		28	18	9
	Plaza de Castilla	40	17	10
		37	18	9
		28	16	8
		33	21	10
		33	21	9
		30	19	8
	Plaza Elíptica	43	23	13
		39	20	12
		42	15	10
		43	17	10
		40	22	11
		36	24	12

Fuente: Elaboración propia a partir de la información publicada en Ayuntamiento de Madrid (2024b).

Obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 9. Resumen resultados análisis de la varianza de la prueba Anova para los valores promedio de la interacción entre los tres contaminantes estudiados

RESUMEN	NO2	PM10	PM2,5	Total	
Casa de Campo					
Cuenta	6	6	6	18	
Suma	107	102	52	261	
Promedio	17,83333333	17	8,666666667	14,5	
Varianza	3,366666667	7,6	0,666666667	21,55882353	
Castellana					
Cuenta	6	6	6	18	
Suma	185	105	58	348	
Promedio	30,83333333	17,5	9,666666667	19,33333333	
Varianza	22,16666667	0,7	0,266666667	87,64705882	
Cuatro Caminos					
Cuenta	6	6	6	18	
Suma	202	111	59	372	
Promedio	33,66666667	18,5	9,833333333	20,66666667	
Varianza	27,46666667	2,7	0,166666667	111,6470588	
Escuelas Aguirre					
Cuenta	6	6	6	18	
Suma	243	118	60	421	
Promedio	40,5	19,66666667	10	23,38888889	
Varianza	95,9	2,266666667	0,4	200,4869281	
Méndez Álvaro					
Cuenta	6	6	6	18	
Suma	182	105	56	343	
Promedio	30,33333333	17,5	9,333333333	19,05555556	
Varianza	11,06666667	4,3	0,666666667	83,82026144	
Plaza de Castilla					
Cuenta	6	6	6	18	
Suma	201	112	54	367	
Promedio	33,5	18,66666667	9	20,38888889	
Varianza	19,5	4,266666667	0,8	114,7222222	
Plaza Elíptica					
Cuenta	6	6	6	18	
Suma	243	121	68	432	
Promedio	40,5	20,16666667	11,33333333	24	
Varianza	7,5	12,56666667	1,466666667	164,2352941	
Total					
Cuenta	42	42	42		
Suma	1363	774	407		
Promedio	32,45238095	18,42857143	9,69047619		
Varianza	74,44889663	5,421602787	1,194541231		

Fuente: Elaboración propia.

Atendiendo a los resultados hallados encontramos en primer término correspondiente a la fila de Muestra donde $F >$ Valor crítico de F en relación la ubicación de las estaciones de donde se han tomado los datos. De la misma manera, reflejada la fila de “Columnas” de la tabla de resultados de análisis de la varianza comprobamos de nuevo que $F >$ Valor crítico de F en referencia clara al tipo de contaminante que se ha analizado a través de esta prueba estadística. Por último, ligado a la fila de Interacción de la tabla resultante del análisis de la varianza

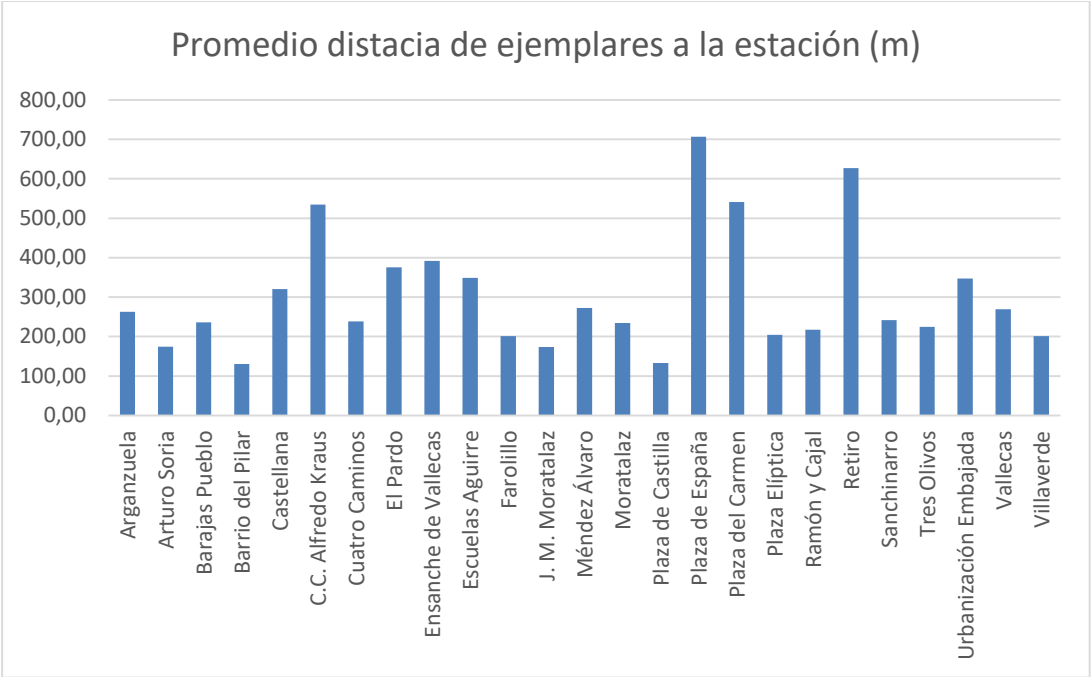
se visualiza una vez más que $F >$ Valor crítico de F ligado a la interrelación existente entre las ubicaciones y los tipos de contaminantes estudiados. A partir del análisis estadístico realizado, se han obtenido conclusiones relevantes que confirman la existencia de diferencias significativas en los niveles de contaminación según la ubicación de las estaciones de medición dentro del entorno urbano madrileño. En primer lugar, se ha demostrado que, con un nivel de significación del 0,05, la localización geográfica de las estaciones influye directamente en la detección de valores de contaminación diferenciados entre zonas. Asimismo, los resultados obtenidos en las tablas de análisis confirman que, bajo el mismo umbral de significación, los valores promedio anuales de cada contaminante específico varían de forma significativa entre estaciones. Finalmente, el estudio de la interacción entre ambos factores —ubicación y tipo de contaminante— revela que existe suficiente evidencia estadística para afirmar que los niveles medios de contaminación están condicionados por la localización de las estaciones dentro de la ciudad.

7. Resultados del trabajo de campo

En consecuencia, directa de la independencia de las estaciones y por tanto con la certeza desde el terreno estadístico de una desigualdad en cuanto a las diferentes zonas de la ciudad, fue el momento de desarrollar el trabajo de campo correspondiente a los ejemplares arbóreos seleccionado siguiendo las directrices estipuladas al comienzo del estudio.

Una vez visualizadas las distinciones entre los distintos puntos de muestreo y la tipología de las estaciones vinculadas, se debe considerar otra de las variables a tener en cuenta a la hora de poder establecer una comparación fiable entre los resultados obtenidos como es el promedio de distancia entre la estación de medición y los ejemplares estudiados.

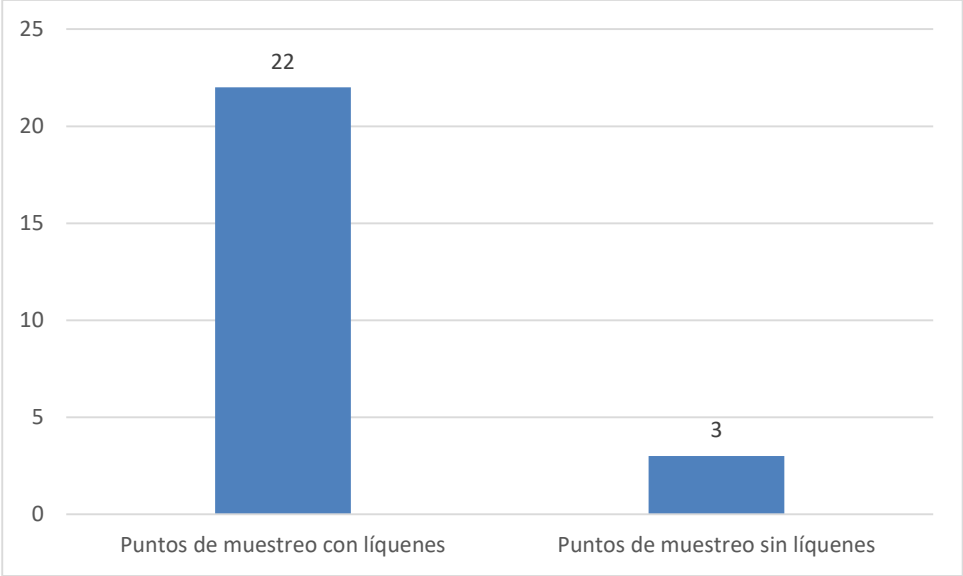
Figura 10. Promedio de distancia entre los ejemplares arbóreos analizados y la ubicación de las estaciones.



Fuente: Elaboración propia.

El gráfico anterior revela que una proporción significativa de los puntos de muestreo seleccionados —concretamente el 88%— presenta líquenes epífitos en su entorno inmediato. Un dato que confirma una amplia presencia de estos organismos en el arbolado urbano de Madrid, lo que refuerza la idea de una colonización líquénica generalizada en el área metropolitana.

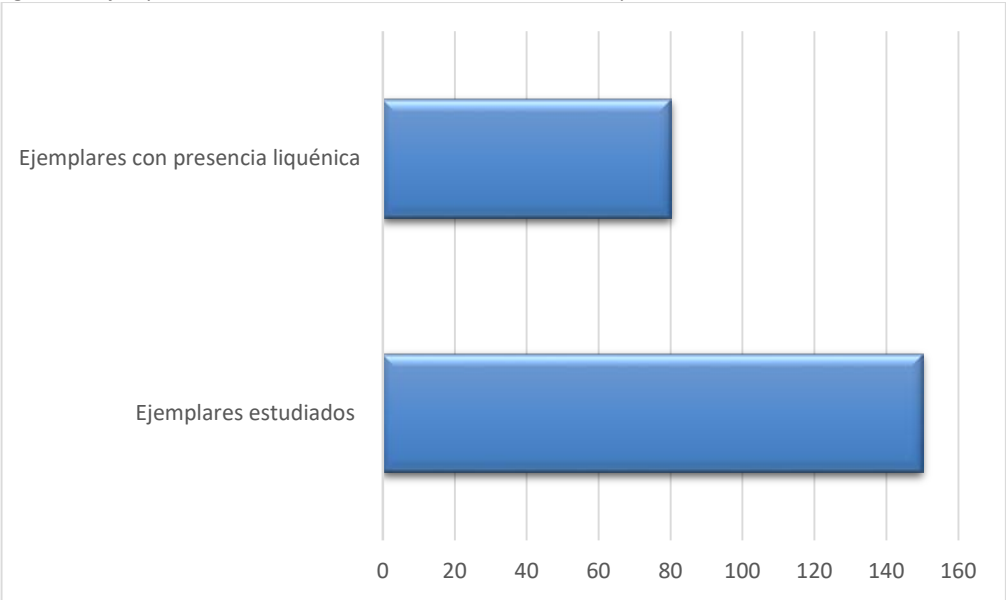
Figura 11. Zonas de estudio donde se han apreciado líquenes en los ejemplares arbóreos estudiados. Fuente: elaboración propia.



Fuente: Elaboración propia.

Cabe señalar que únicamente en tres ubicaciones no se ha detectado presencia liquénica en ninguno de los seis ejemplares de *Ulmus pumila* previamente seleccionados. Esta observación se complementa con la figura siguiente, en la que se representa el número total de árboles estudiados que presentan talos liquénicos, proporcionando una visión más detallada de la distribución espacial de estos organismos en el contexto urbano.

Figura 12. Ejemplares arbóreos donde se han observado talos liquénicos.



Fuente: Elaboración propia.

Del análisis realizado se desprende que el 53% de los árboles muestreados presentan talos líquénicos en su superficie, lo que evidencia la existencia de poblaciones líquénicas estables y ampliamente distribuidas en el área metropolitana de Madrid. Este dato sugiere que las condiciones ambientales de la ciudad permiten el desarrollo sostenido de estos organismos en gran parte del territorio urbano.

Cabe destacar que únicamente en tres puntos de muestreo —Méndez Álvaro, Plaza de Castilla y Plaza del Carmen—, no se ha detectado presencia de líquenes, lo que refuerza la idea de una colonización generalizada en el resto de las zonas analizadas. Esta distribución sugiere una adaptación significativa de las comunidades líquénicas al entorno urbano madrileño, salvo en áreas concretas donde factores locales podrían estar limitando su establecimiento.

8. Conclusiones

A través de toda la información que se ha aportado durante este trabajo, se constata la gran heterogeneidad existente entre la totalidad de los distritos que integran la ciudad de Madrid. Principalmente en términos de concentraciones de contaminantes, así como de presencia líquénica cuya trascendencia se traslada a cuestiones integradas dentro del concepto de calidad de vida de la población en cada uno de ellos. Diferencias todas ellas perceptibles a partir de los datos recopilados procedentes de Ayuntamiento de Madrid (2024b) y que además han sido evidenciadas estadísticamente en este trabajo a partir de los resultados recabados a través del análisis efectuado con el método ANOVA de un factor.

A partir del análisis estadístico realizado, se ha podido evidenciar la existencia de una correlación significativa entre distintas zonas de la ciudad y las desigualdades observadas en la concentración de diversos contaminantes atmosféricos, según los datos publicados por el Ayuntamiento de Madrid (2024b). Esta hipótesis, planteada inicialmente como una expectativa previa al trabajo de campo, ha sido confirmada tras la recopilación y evaluación de los datos.

Una de las conclusiones preliminares más relevantes es que la ciudad de Madrid presenta una distribución líquénica extensa y consolidada en la mayoría de las zonas urbanas analizadas. Esta presencia generalizada sugiere que existe una alta probabilidad de encontrar líquenes en prácticamente cualquier enclave del entorno metropolitano, lo que refuerza su utilidad como bioindicadores en estudios de calidad ambiental urbana.

Este hecho confirma la viabilidad de realizar estudios relacionados con la temática líquénica en el entorno urbano de Madrid. En este contexto, cabe destacar los datos obtenidos durante el trabajo de campo, los cuales abren la posibilidad a futuros estudios orientados a evaluar la importancia de la vigilancia de las poblaciones líquénicas consolidadas en la ciudad como complemento a la Red de Vigilancia y Control de la Calidad del Aire del Ayuntamiento de Madrid.

Esta función adquiere especial relevancia, dado que los datos recopilados en determinados casos no se corresponden plenamente con la información proporcionada por las estaciones de medición ni con la concepción preliminar establecida antes del análisis de zonas específicas, como se ha observado en los ejemplares estudiados en Castellana y Sanchinarro. Por tanto, una vigilancia sistemática y un análisis detallado de los líquenes presentes en el entorno urbano madrileño podrían contribuir significativamente a una comprensión más precisa del estado ambiental de la ciudad.

Considerando lo expuesto a lo largo del presente trabajo, se evidencia la necesidad de disponer de datos sistemáticos y actualizados sobre la presencia de líquenes en los entornos urbanos de gran escala. Este recurso permitiría la elaboración de series históricas y la realización de análisis comparativos, con el objetivo de verificar si las mejoras observadas en la calidad de vida y en las condiciones ambientales de determinadas áreas urbanas pueden extrapolarse a otras grandes ciudades a nivel internacional. Asimismo, se ha constatado que el contexto socioeconómico ejerce una influencia significativa sobre la dinámica ambiental en zonas metropolitanas, lo que refuerza la importancia de considerar variables sociales en los estudios ecológicos urbanos.

9. Bibliografía

Almendros, M. A., y López, A. (1995). La isla de calor en Madrid y las situaciones sinópticas. *Estudios Geográficos*, 56(219), 207–221. <https://doi.org/10.3989/egеоgr.1995.i219.207>

- Boqué, R. y Maroto, A. (2004). El análisis de la varianza (ANOVA) 1. Comparación de múltiples poblaciones. Técnicas Laboratorio Barcelona, 294, 680-683. Recuperado de: <https://www.studocu.com/latam/document/universidad-nacional/fundamentos-de-quimica-analitica/anovacast-lectura/11507514>
- Correa, E.N., Flores, S. y Lesino, G. (2003). Isla de calor urbana: efecto de los pavimentos. Informe de avance. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, 7 (2), 1125- 1130. Recuperado de: <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/81350>
- Crespo, A., Manrique, E., Barreno, E. y Serriñá, E. (1977). Valoración de la contaminación atmosférica del área urbana de Madrid mediante bioindicadores (líquenes epífitos). Anal. Inst. Bot. Cavanilles, 34 (1), 71-94.
- Fernández, F. y Martilli, A. (2012) El clima urbano: aspectos generales y su aplicación en el área de Madrid. Índice, (50), 21-24. Recuperado de: <http://revistaindice.com/numero50/p21.pdf>
- Mora, J. y Castellano, R. (2002). Reflexiones sobre la sostenibilidad del medio urbano. Observatorio medioambiental, (5), 403-408. Recuperado de: <https://revistas.ucm.es/index.php/OBMD/article/view/OBMD0202110403A>
- Ramos, R. y Revilla, F. (2021). Historia breve de Madrid. (3ª ed.). Ediciones La Librería. Madrid.
- Sotelo, I. (2017). Modelos de Desarrollo y Medio Ambiente: Estudio de Caso de la Ciudad de Madrid. Reflexiones sobre una Ciudad en Curso. Observatorio Medioambiental, 20, 277-318. <https://doi.org/10.5209/OBMD.57954>
- Sotelo, I., Sotelo, M., y Sotelo, J. A. (2021). “Madrid, nuevo norte”, un proyecto contra la Covid-19: el turismo como oportunidad. Cuadernos de Turismo, (47), 447–486. <https://doi.org/10.6018/turismo.474501>
- Valenzuela, M. (2010). La planificación territorial de la región metropolitana de Madrid. Una asignatura pendiente. Cuadernos Geográficos, (47), 95-129. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=17118691005>
- Vegara, A. (2008). La planificación urbanística y sus implicaciones en el mundo en globalización. Revista sobre la sociedad del conocimiento. (7); 1-15. Recuperado de: <https://www.uoc.edu/uocpapers/7/dt/esp/vegara.pdf>