

ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN HORIZONTAL DE LA CONTAMINACIÓN EN LA CIUDAD DE GRANADA

UNA APROXIMACIÓN MEDIANTE TÉCNICAS DE
TELEDETECCIÓN DOPPLER E IN-SITU



AUTORA

Elena Larisa Negoita

TUTOR

Juan Luis Guerrero Rascado

[Departamento de Física Aplicada,
Facultad de Ciencias]



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE ARQUITECTURA DE GRANADA

TRABAJO FIN DE GRADO
CONVOCATORIA ORDINARIA - CURSO 2023/2024

ÍNDICE

| | |
|--|-----------|
| TABLA DE ACRÓNIMOS..... | 2 |
| 1. INTRODUCCIÓN..... | 3 |
| 2. JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS..... | 5 |
| 3. FUNDAMENTOS | 5 |
| 3.1. LA ATMÓSFERA | 5 |
| 3.1.1. ESTRUCTURA DE LA ATMÓSFERA..... | 6 |
| 3.1.2. CAPA LÍMITE ATMOSFÉRICA Y TURBULENCIA | 7 |
| 3.1.3. COMPOSICIÓN DE LA ATMÓSFERA | 9 |
| 3.2. PRINCIPALES CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS..... | 10 |
| 3.3. INFRAESTRUCTURA VERDE URBANA..... | 13 |
| 3.4. TÉCNICA LIDAR DOPPLER | 15 |
| 4. ZONA DE ESTUDIO, MATERIALES Y MÉTODOS | 16 |
| 4.1. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO | 16 |
| 4.2. INSTRUMENTACIÓN Y OBTENCIÓN DE DATOS | 21 |
| 4.2.1. SISTEMA LIDAR DOPPLER..... | 22 |
| 4.2.2. CONCENTRACIÓN DE CONTAMINANTES NO BIOGÉNICOS | 23 |
| 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN..... | 25 |
| 5.1. CONTAMINACIÓN NO BIOGÉNICA..... | 26 |
| 5.2. DISTRIBUCIÓN HORIZONTAL DEL COEFICIENTE DE RETRODISPERSIÓN ATENUADA..... | 30 |
| 5.3. RELACIÓN PM_{10} - β_{att} | 39 |
| 6. CONCLUSIONES..... | 41 |
| BIBLIOGRAFÍA..... | 45 |
| ANEXO I. PLANO DE UBICACIÓN DE LAS TRES ESTACIONES DE CALIDAD DEL AIRE..... | 50 |
| ANEXO II. DESVIACIÓN ESTÁNDAR | 53 |

TABLA DE ACRÓNIMOS

| | |
|--------------------|---|
| ABL | <i>Atmospheric Boundary Layer</i> ; Capa límite atmosférica |
| ACTRIS | <i>Aerosol, Clouds and Trace Gases Research Infrastructure</i> ; Infraestructura de Investigación en Aerosol, Nubes y Gases Traza |
| ÁGORA | <i>Andalusian Global Observatory of the Atmosphere</i> ; Observatorio Global de la Atmósfera de Andalucía |
| AQI | <i>Air Quality Index</i> ; Índice de Calidad del Aire |
| DL | <i>Doppler lidar</i> ; Lidar Doppler |
| EPA | <i>Environmental Protection Agency</i> ; Agencia de Protección Ambiental |
| ES | <i>Ecosystem Services</i> ; Servicios Ecosistémicos |
| GI | <i>Green Infrastructure</i> ; Infraestructura Verde |
| IISTA-CEAMA | Instituto Interuniversitario De Investigación Del Sistema Tierra En Andalucía – Centro Andaluz de Medio Ambiente |
| LiDAR | <i>Light detection and rangin</i> |
| OA | <i>Organic Aerosol</i> ; Partículas de aerosol orgánicas |
| OMS | Organización Mundial de la Salud |
| RCS | <i>Range Corrected Signal</i> ; Señal Corregida de Rango |
| SNR | <i>Signal-to-Noise Ratio</i> ; Relación señal-ruido |
| UGI | <i>Urban Green Infrastructure</i> ; Estructura Verde Urbana |
| UV | Ultravioleta |

1. INTRODUCCIÓN

Ubicado en un territorio semiárido del sur de España, el privilegiado asentamiento del que goza la ciudad de Granada permitió, gracias a la domesticación de los ríos Beiro, Darro, Genil y Monachil mediante redes de acequias, el florecimiento de grandes civilizaciones. Si bien, en la coyuntura contemporánea, la morfología que presenta el territorio está resultando ser un catalizador para la contaminación.

Situada en una planicie rodeada de montes, el aire contaminado, procedente de la combustión de los vehículos y de la quema de biomasa en la Vega, queda atrapado en la hoya geográfica. Según Casquero-Vera (2021), la orografía existente, junto con condiciones atmosféricas caracterizadas por poco viento y escasas precipitaciones, hace que la polución ambiental no se pueda dispersar fácilmente. Tal es así que Granada es, según un informe del Observatorio de Sostenibilidad (2022) sobre la evolución del dióxido de nitrógeno en 80 ciudades españolas, la segunda ciudad más contaminada de España.

La Organización Mundial de la Salud (OMS, 2021-a) estima que el 91% de los habitantes urbanos respira aire contaminado, lo que supondría más de un 50% de la población mundial. En las ciudades, la constante modificación antropogénica del medio, resultante de una rápida e intensiva urbanización, constituye, al igual que la alta tasa de motorización (Grindlay et al., 2021), uno de los principales factores agravantes de la calidad del aire urbano y, por tanto, de la calidad de vida y la salud de los ciudadanos.

Poniendo en el punto de mira los graves daños que la contaminación del aire inflige sobre la salud humana, en concentraciones incluso mucho menores que las ya experimentadas, es en el año 2021 cuando la OMS (2021-b) decide realizar, tras una revisión sistemática de la evidencia acumulada, ciertos cambios en las Directrices de Calidad del Aire ya establecidas en 2005. Estas nuevas directrices toman en consideración contaminantes como las partículas en suspensión (PM), el monóxido de carbono (CO), el dióxido de nitrógeno (NO₂) o dióxido de azufre (SO₂), entre otros.

Los habitantes cercanos a áreas donde pueden producirse interacciones entre diferentes tipos de contaminantes, así como variables meteorológicas locales de superficie, pueden estar expuestos, tal y como ya se ha dicho, a un mayor riesgo. Numerosos estudios resaltan, además, la desigual distribución de los contaminantes en las diferentes áreas que comprende una ciudad, siendo algunos de los factores condicionantes la intensidad de la fuente de emisión o las características de la estructura urbana: densidad edificatoria, altura de la edificación, ubicación y extensión de la superficie verde urbana, entre otros (da Silva et al., 2021). Por lo tanto, la caracterización y cuantificación de la

variabilidad de los contaminantes a escala suburbana es esencial para conocer todas las influencias particulares de la morfología urbana en el aire respirado por la población urbana.

Muchos de estos problemas se han visto agravados por la falta de planificación (o planificación inadecuada) y por el cambio climático, que está intensificando la aparición de eventos extremos de contaminantes, tanto biogénicos como no biogénicos, tales como intensos eventos de polvo sahariano (Cazorla et al., 2017 ; Fernández et al., 2019; Guerrero-Rascado et al., 2009; López-Cayuela et al., 2023), cantidades extremadamente altas de humo de incendios (Baars et al., 2019; Ortiz-Amezcuca et al., 2017; Sicard et al., 2019) o presencia de altas concentraciones de polen (Cariñanos et al., 2022), con el consiguiente riesgo para la población. En este contexto, el refuerzo de la Infraestructura Verde Urbana (UGI, en inglés Urban Green Infrastructure) y la gestión de los espacios verdes disponibles (Fig. 1) destacan como una de las soluciones basadas en la naturaleza más efectivas para la mitigación de la contaminación del aire y los impactos del cambio climático, especialmente en ciudades mediterráneas compactas (Delgado-Capel & Cariñanos, 2020).

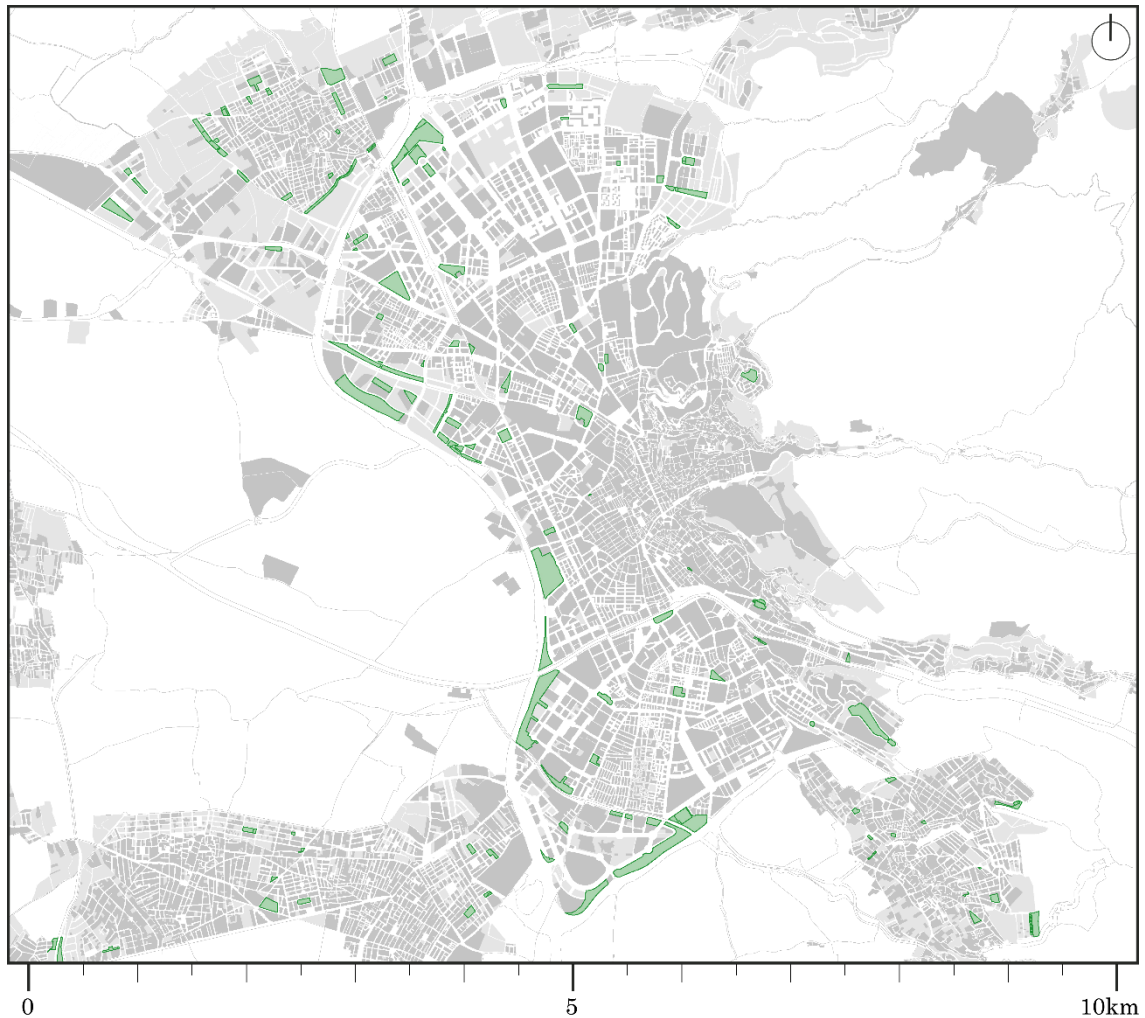


Figura 1. Distribución de zonas verdes en la ciudad de Granada.

2. JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS

El continuo monitoreo de la contaminación biogénica y no biogénica es una de las mejores medidas para cuantificar los beneficios y servicios ecosistémicos derivados de la UGI, proporcionando así datos e información suficientes para (1) estimar su impacto en la calidad del aire, (2) conocer su impacto en la salud de la población y (3) verificar la efectividad de la UGI como medida de mitigación. Esto resalta el valor de la modelización para el estudio del transporte de contaminantes biogénicos y no biogénicos y su aplicación como herramienta de pronóstico. Si bien, aún no se han realizado evaluaciones de modelos a escala suburbana por falta de, entre otros, medidas experimentales de alta resolución.

De modo que, con ayuda de técnicas avanzadas de teledetección activa e in situ, y centrándonos en el medio urbano de la ciudad de Granada, los objetivos principales de este TFG son:

- 1) El análisis de la variabilidad espacio-temporal de la presencia de partículas con ayuda de mediciones realizadas con un sistema lidar Doppler.
- 2) La caracterización de la contaminación no biogénica en diferentes estaciones puntuales de la Red Automática de Calidad del Aire de la Junta de Andalucía.
- 3) La generación de mapas horizontales cuantitativos de concentración de partículas.
- 4) El estudio de la relación entre la distribución de partículas y las características de la estructura urbana.

3. FUNDAMENTOS

En este capítulo se ofrece una visión general sobre los conceptos más relevantes necesarios para la comprensión de este estudio. Se hablará de la atmósfera, de los principales contaminantes del aire, de la estructura verde urbana y de la técnica lidar Doppler.

3.1. LA ATMÓSFERA

La atmósfera es la capa gaseosa que, debido a la acción gravitatoria, envuelve la Tierra. La atmósfera de nuestro planeta se caracteriza por la presencia de tres tipos de componentes: gases, partículas de aerosol y nubes de agua (Seinfeld & Pandis, 2016). Tiene un papel crucial para la vida debido a, entre otros, el efecto invernadero, gracias al cual es posible modular la temperatura del planeta, y a la capacidad que tiene de absorber radiación solar ultravioleta (UV) (Ortiz-Amezcu, 2019).

3.1.1. ESTRUCTURA DE LA ATMÓSFERA

La atmósfera terrestre se caracteriza por variaciones de presión, densidad y temperatura a lo largo de su altura. De hecho, la variación media de la temperatura con respecto a la altitud (*average thermal structure*) es la base para la distinción de las diferentes capas en las que se divide la atmósfera (Seinfeld & Pandis, 2016). Estas capas son (Fig. 2):

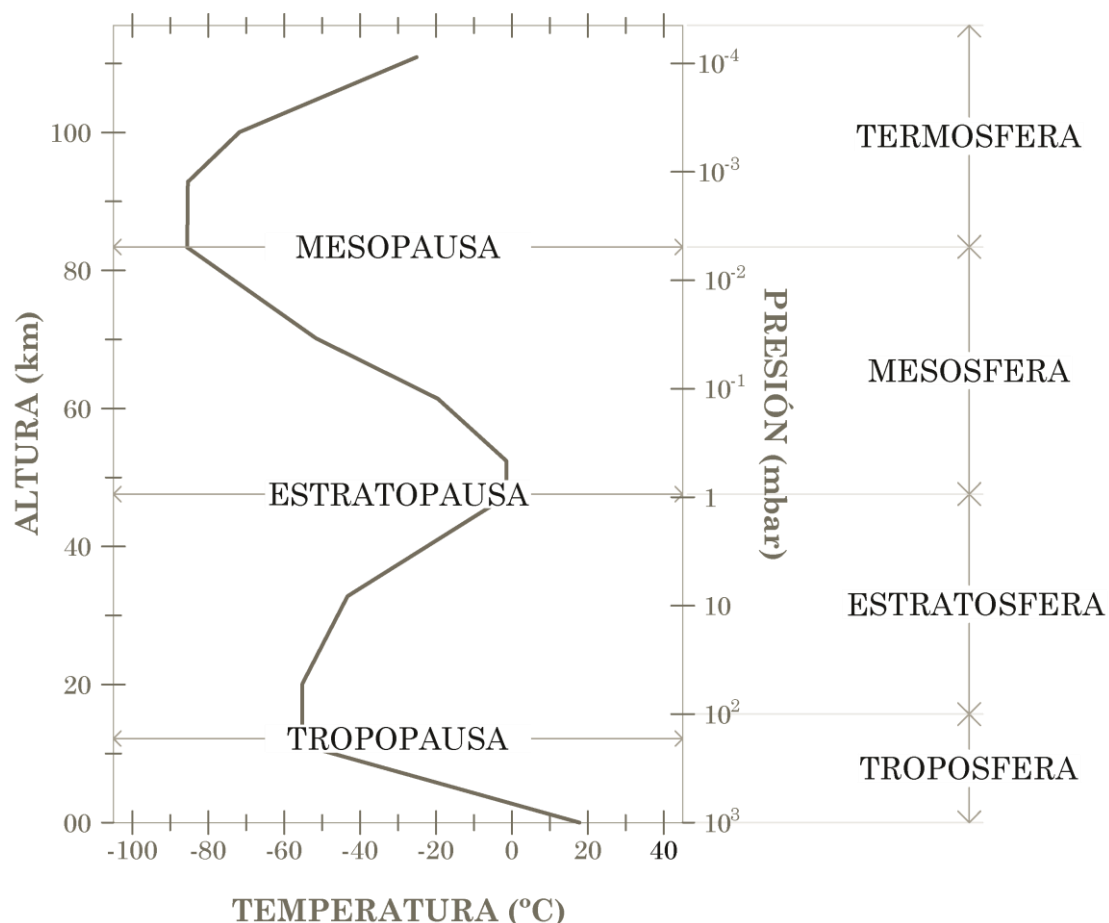


Figura 2. Estratificación de la atmósfera en función de las variaciones en el gradiente vertical de temperatura. Reelaboración a partir de Seinfeld & Pandis (2016).

- *Troposfera.* Capa que se extiende desde la superficie terrestre hasta la tropopausa. El gradiente de temperatura, disminución de la temperatura con la subida en altura, es de $6,5^{\circ}\text{C}/\text{km}$. Capa de rápida mezcla vertical.
- *Tropopausa.* Localizada entre 8 a 15 km por encima de la superficie, en función de variaciones latitudinales (mayor grosor en los trópicos y menor en los polos) y estacionales (más gruesa en verano y más delgada en invierno).
- *Estratosfera.* Compreendida entre la tropopausa y la estratopausa. Destaca la presencia de una capa de máxima concentración de O_3 a 25 km de altura, encargada de la absorción de la radiación solar UV y, por

tanto, causante del aumento de temperatura con la altura. En esta capa, la mezcla vertical es lenta.

- *Estratopausa*. Situada alrededor de los 50 km de altura. Caracterizada por tener una temperatura constante.
- *Mesosfera*. Comprendida entre la estratopausa y la mesopausa. La temperatura aumenta con la altitud a causa de la emisión de radiación infrarroja, dando lugar a una capa en la que la mezcla vertical es rápida.
- *Mesopausa*. Situada alrededor de los 85 km. Es el punto más frío de la atmósfera, con una temperatura que ronda los -90°C .
- *Termosfera*. Es la región situada por encima de la mesopausa. Al igual que en la mesosfera, la temperatura de esta capa aumenta con la altura como resultado de la absorción de radiación de onda corta por parte del O_2 y del N_2 allí presente. Mezcla vertical rápida
- *Exosfera*. Capa más externa de nuestra atmósfera, situada a más de 500 km de la superficie terrestre.

Es de interés para nuestro estudio la capa más baja, la troposfera, zona donde mayoritariamente ocurren los fenómenos meteorológicos encargados de regular el clima y el tiempo atmosférico, y donde más marcadas son la turbulencia atmosférica y la convección, fenómenos causantes de la mezcla de las moléculas gaseosas. Además, debido a la atracción gravitatoria y a la compresibilidad de los gases, ésta contiene el 75% de la masa gaseosa total de la atmósfera y, prácticamente, todo el vapor de agua y las partículas de aerosol presentes; por ello, es la capa más importante a considerar cuando se quiere conocer los efectos de la atmósfera y sus componentes sobre la vida terrestre.

3.1.2. CAPA LÍMITE ATMOSFÉRICA Y TURBULENCIA

La capa límite atmosférica (del inglés *Atmospheric Boundary Layer*, ABL) es la región más baja de la troposfera, donde tienen lugar las interacciones con la superficie terrestre (Seibert et al., 2000), y se diferencia del resto de la troposfera, denominada troposfera libre o *Free Troposphere* (Fig. 3). Al ser la parte más baja de la atmósfera, es la que define el aire que respiramos, los vientos cosechados por las turbinas eólicas y la formación de niebla o nubes bajas, entre muchos otros procesos (Kotthaus et al., 2023); es por ello que el conocimiento cuantitativo de la dinámica de la ABL es crucial para el desarrollo de la vida terrestre. La ABL define el volumen en el que los gases y las partículas de aerosol emitidas en la superficie de la Tierra se dispersan. En lo referente a superficies heterogéneas o que presenten una topografía compleja, como sería el caso de la ciudad de Granada, los intercambios entre la ABL y la troposfera libre, los cuales tienen lugar mediante procesos de

eyección y arrastre (Stull, 1988), se vuelven más significativos (Lehning et al., 1998). Son muchos los mecanismos activos y pasivos involucrados en el comportamiento de la ABL en terrenos irregulares, complejizando su estructura a patrones tridimensionales (Finnigan, 2003; Lehner & Rotach, 2018) en los que se alternan capas estables y turbulentas.

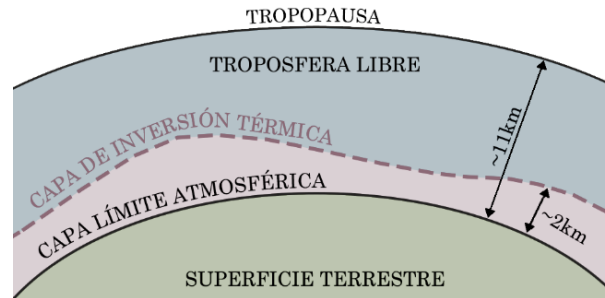


Figura 3. Subestructura de la troposfera terrestre. Reelaboración a partir de Seinfeld & Pandis (2016).

El espesor de la capa es variable en el espacio y en el tiempo, oscilando entre decenas de metros hasta 4 km de altura, aunque normalmente tiene un valor de entre uno a dos kilómetros (Stull, 1998). En esta capa, la turbulencia y la estabilidad atmosférica juegan un papel fundamental y determina su comportamiento a lo largo del día (Ortiz-Amezcu, 2019). Las características principales que presenta la capa son:

- Permanente interacción que se produce entre la superficie terrestre y la ABL. Esta interacción puede ser impulsada por los contrastes en la cobertura de la superficie, la rugosidad o la topografía, así como por la cizalladura del viento (por ejemplo, chorro de bajo nivel) o la dinámica de las nubes (Garratt, 1994). Es destacable, además, la transferencia de calor sensible y latente desde la superficie terrestre hasta la ABL (Arya, 2001). De esta manera, la superficie terrestre calienta el aire adyacente, lo que provoca la formación de corrientes ascendentes y la mezcla vertical de la atmósfera.
- Naturaleza turbulenta, que en ciertos momentos del día (fundamentalmente en las horas centrales) hace que sus propiedades (concentraciones de gases y partículas, temperatura, momento) estén mezcladas y, por tanto, sean verticalmente homogéneas. Las estructuras turbulentas en la ABL se denominan remolinos, y transportan y dispersan materia atmosférica en un proceso conocido como difusión turbulenta. Los remolinos son responsables de la eficaz dispersión de los contaminantes que se encuentran en el aire; sin embargo, estos pueden no ser efectivos cuando en la troposfera se dan

episodios de inversión térmica. Los contaminantes situados en la parte inferior de la capa, en contacto con la superficie terrestre, no podrán ascender y, por tanto, no lograrán alcanzar la troposfera libre (donde los vientos en altura los dispersarían), quedando atrapados cerca de la superficie. Sin vientos importantes o en escenarios de gran estabilidad atmosférica, no hay dispersión ni dilución efectiva de contaminantes.

3.1.3. COMPOSICIÓN DE LA ATMÓSFERA

La atmósfera está compuesta por aire, mezcla de diferentes gases, además de por partículas sólidas y/o líquidas en suspensión (conocidas como partículas de aerosol) y nubes (agua en forma de gotas líquidas y/o en forma de cristales de hielo). Los gases atmosféricos pueden dividirse, tal y como se muestra en la Tabla 1, en dos grupos: (1) los gases permanentes, aquellos que mantienen una proporción constante en la atmósfera y (2) los gases variables, los cuales sufren cambios en su proporción.

Entre los gases que componen la atmósfera, los más abundantes son el nitrógeno molecular, el oxígeno molecular y el argón; el resto de compuestos representan cantidades ínfimas. No obstante, la proporción de los gases en la atmósfera no tiene relación directa con la importancia meteorológica y climática de los mismos. Tanto es así, que los gases más abundantes, el nitrógeno y el oxígeno, apenas tienen importancia climática, mientras que otros como el dióxido de carbono o el vapor de agua resultan cruciales en numerosos procesos meteorológicos o para la regulación térmica del planeta.

| GAS | FÓRMULA QUÍMICA | PORCENTAJE (EN VOLUMEN) |
|----------------------------|------------------|----------------------------|
| GASES PERMANENTES | | |
| Nitrógeno | N ₂ | 78,08 |
| Oxígeno | O ₂ | 20,95 |
| Argón | Ar | 0,93 |
| Neón | Ne | 0,0018 |
| Helio | He | 0,0005 |
| Hidrógeno | H ₂ | 0,00006 |
| Xenón | Xe | 0,000009 |
| GASES VARIABLES | | |
| Vapor de agua | H ₂ O | 0 a 4 |
| Dióxido de carbono | CO ₂ | 0,036 |
| Metano | CH ₄ | 0,00017 |
| Óxido nitroso | N ₂ O | 0,00003 |
| Ozono | O ₃ | 0,000004 |
| Clorofluorocarbonos | - | 0,00000002 |

Tabla 1. Gases de la atmósfera y su concentración. Los clorofluorocarbonos (CFC) son una familia de diferentes compuestos con gran variedad de fórmulas químicas.

3.2. PRINCIPALES CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS

Entendemos por contaminación atmosférica a la presencia de sustancias nocivas en el aire, las cuales tienen la capacidad de producir efectos adversos en la salud humana, los ecosistemas y el clima, así como de atacar a distintos materiales (degradación del patrimonio y edificaciones) o reducir la visibilidad. Estas sustancias pueden ser gases, partículas sólidas o líquidas, y pueden provenir de fuentes naturales o actividades humanas, como lo son la quema de combustibles fósiles, las emisiones industriales, el transporte, la agricultura y otros procesos. La contaminación atmosférica puede manifestarse a escala local, cuando los impactos se limitan a las proximidades de las fuentes de emisión, o a escala planetaria, cuando los contaminantes afectan a zonas alejadas de aquellas que contienen los focos emisores y al equilibrio global del planeta.

La contaminación del aire está estrechamente relacionada con la presencia de sustancias perjudiciales en la atmósfera. El Índice de Calidad del Aire (AQI, *Air Quality Index*) es la herramienta usada por la Agencia de Protección Ambiental, EPA (*Environmental Protection Agency*) y otras agencias como medio para proveer al público información sobre la calidad del aire local, indicando si los niveles de polución son perjudiciales para la salud de la población. Según la EPA, son cinco los contaminantes cuya regulación resulta primordial para garantizar una óptima calidad del aire: el dióxido de azufre (SO₂), el monóxido de carbono (CO), los óxidos de nitrógeno (NO_x), el ozono (O₃) y el material particulado (PM). A excepción del O₃, que se es un contaminante secundario, todos estos contaminantes forman parte de los contaminantes primarios, emitidos directamente a la atmósfera. Las principales características de estos cinco contaminantes se recogen en la Tabla 2.

El dióxido de azufre (SO₂) es un gas procedente, en mayor parte, de procesos industriales de alta temperatura y de generación eléctrica, donde se lleva a cabo la combustión de carburantes fósiles que contienen azufre, como el petróleo o los combustibles sólidos. Por otro lado, el monóxido de carbono (CO) es un gas resultante de la combustión incompleta de carburantes fósiles y biocombustibles. Aproximadamente, su vida media en la atmósfera es de tres meses, tiempo en el que se produce una lenta oxidación de la molécula hasta formar CO₂, proceso durante el cual también se genera O₃. Finalmente, hay que destacar los óxidos de nitrógeno (NO_x), resultantes de la oxidación que sufre el nitrógeno atmosférico (N₂), principal componente del aire, a altas temperaturas. En ambientes urbanos, más del 75% del NO₂ del aire es aportado por el tráfico rodado, sobre todo vehículos automóviles y, en especial, de motores diésel (Gobierno de España, 2011).

| FUENTES | EFFECTOS SOBRE LA SALUD | EFFECTOS SOBRE EL MEDIO AMBIENTE |
|--|---|---|
| DIÓXIDO DE AZUFRE (SO₂) | | |
| <ul style="list-style-type: none"> - Procesos industriales de alta temperatura - Generación eléctrica - Erupciones volcánicas | <ul style="list-style-type: none"> - Irritación e inflamación del sistema respiratorio - Afecciones e insuficiencias pulmonares - Dolor de cabeza o ansiedad | <ul style="list-style-type: none"> - Daños a la vegetación - Degradación de la clorofila - Reducción de la fotosíntesis |
| MONÓXIDO DE CARBONO (CO) | | |
| <ul style="list-style-type: none"> - Procesos de combustión en sectores no industriales y procesos industriales sin combustión - Actividades del sector agropecuario - Transporte por carretera | <ul style="list-style-type: none"> - Disminución de la capacidad de transporte de oxígeno de la sangre - Disfunciones cardíacas - Daños en el sistema nervioso - Dolor de cabeza, mareos y fatiga | <ul style="list-style-type: none"> - Aflicciones sobre la fauna silvestre similares a las producidas sobre el ser humano - Participa en la formación de gases de efecto invernadero: CO₂ y O₃ |
| OZONO (O₃) | | |
| <ul style="list-style-type: none"> - Centrales térmicas y hogares de combustión - Tráfico rodado | <ul style="list-style-type: none"> - Inflamaciones y cambios morfológicos y funcionales en el sistema respiratorio - Disminución de las defensas del organismo | <ul style="list-style-type: none"> - Daños a la vegetación natural y a los cultivos - Reducción de la absorción de CO₂ |
| ÓXIDOS DE NITRÓGENO (NO_x) | | |
| <ul style="list-style-type: none"> - Combustión: <ul style="list-style-type: none"> • en relación con el tráfico • en instalaciones industriales de alta temperatura - Generación eléctrica - Estufas y cocinas de gas | <ul style="list-style-type: none"> - Inflamación de las vías aéreas, infecciones pulmonares e insuficiencias respiratorias - Afecciones de órganos o de sistemas (circulatorio, inmunitario, ...) | <ul style="list-style-type: none"> - Acidificación y eutrofización de ecosistemas - Afecciones metabólicas - Limitación del crecimiento vegetal - Lluvia ácida |
| MATERIAL PARTICULADO | | |
| <ul style="list-style-type: none"> - Polvo mineral de origen africano y partículas del suelo - Partículas salinas marinas - Esporas y pólenes procedentes de la vegetación - Tráfico rodado - Combustión de la calefacción de edificios y viviendas | <ul style="list-style-type: none"> - Conducción de sustancias nocivas hasta zonas muy sensibles - En caso de alcanzar el torrente sanguíneo, afecta: <ul style="list-style-type: none"> • a diversos órganos • al sistema nervioso central • al sistema reproductor | <ul style="list-style-type: none"> - Limita el crecimiento vegetal - Aflicciones sobre la fauna similares a las producidas sobre el ser humano - Reducción de la visibilidad - Alteración de la relación entre la radiación reflejada e incidente - Daños en las edificaciones |

Tabla 2. Principales contaminantes atmosféricos. Fuentes y efectos sobre la salud humana y los ecosistemas a considerar. Elaboración propia a partir de: Gobierno de España, 2011; Observatorio de Sostenibilidad en España, 2011.

El material particulado, también conocido como aerosol atmosférico, es una suspensión de partículas microscópicas sólidas y/o líquidas en el gas atmosférico, del que quedan excluidas las nubes, pues se consideran un fenómeno aparte (Seinfeld & Pandis, 2016). La procedencia de estas moléculas puede ser tanto de fuentes naturales, tales como el polvo arrastrado por el viento, el aerosol marino, los volcanes, el humo de los incendios o las plantas o animales (genéricamente conocidos como partículas de aerosol natural), como proceder de la actividad humana (conocidas como partículas antropogénicas), por ejemplo, de la combustión de carburantes o la quema de biomasa agrícola (Ortiz-Amezcu, 2019). Las partículas de aerosol atmosférico pueden ser primarias, aquellas emitidos a la atmósfera directamente desde la fuente emisora, sin sufrir transformaciones físicas ni químicas, o secundarias, aquellas formados en la atmósfera a través de procesos químicos o fotoquímicos capaces de convertir precursores gaseosos en partículas (Seinfeld & Pandis, 2016). El tamaño de las partículas de aerosol varía entre unos pocos nanómetros y decenas o cientos de micrómetros, haciendo que su tiempo de residencia en la atmósfera varíe desde unos pocos días (los de mayor tamaño) hasta unas pocas semanas (los de menor tamaño), y siendo eliminadas por dos diferentes mecanismos: (1) deposición seca, en la superficie terrestre, o (2) deposición húmeda, tras incorporarse a las gotas de las nubes durante el proceso de precipitación.

Las partículas de aerosol están constituidas, principalmente, por sustancias inorgánicas (sulfatos, nitratos, amonio, sal marina o polvo mineral, entre otros), sustancias orgánicas (conocidos como partículas de aerosol orgánicas, OA, son compuestos químicos que presentan carbono en su estructura molecular), carbono negro (procedente de la combustión incompleta de combustibles en determinadas condiciones), y minerales y partículas de bioaerosoles primarias (PBAP) (Ortiz-Amezcu, 2019).

Estas afectan, tanto directa como indirectamente, al clima de la Tierra, a la actividad humana y a la salud. Por un lado, las partículas de aerosol desempeñan un papel esencial en la formación de nubes, puesto que actúan como núcleos de condensación y/o de formación de hielo (Andreae & Rosenfeld, 2008). Esto puede afectar a ciertas propiedades de las nubes, como a su reflectividad o tiempo de vida y, por ende, puede tener impactos en la distribución y cantidad de precipitación en diferentes regiones. Además, ayudan al enfriamiento de la atmósfera y de la superficie terrestre al interactuar con la radiación solar, ya que algunas partículas de aerosol como el polvo mineral o los sulfatos son capaces de reflejar la radiación solar (Forster et al., 2007), produciendo un forzamiento radiativo negativo. Por otro lado, especialmente en entornos urbanos e industriales, las partículas de aerosol orgánicas y el material particulado fino contribuyen de sobremanera

a la pésima calidad del aire y visibilidad atmosférica (Zhang et al., 2007). De igual manera, en grandes concentraciones pueden ser perjudiciales para la salud humana, causando problemas respiratorios y cardiovasculares en la población (Pope, 2002). Por ello, resulta de vital importancia comprender y monitorear la concentración de ciertas partículas de aerosol en el ambiente urbano, para poder así mitigar sus efectos negativos en la salud y en el medio ambiente, al mismo tiempo que se reconoce su papel en los procesos climáticos naturales.

3.3. INFRAESTRUCTURA VERDE URBANA

Las alteraciones producidas en la estructura, procesos y funciones ecosistémicas a través de la urbanización (Ouyang et al., 2021), así como el insostenible desarrollo de aglomeraciones urbanas no optimizadas funcionalmente, provocan y agravan problemas ya latentes tales como la expansión desordenada y el aumento de los espacios de construcción, la contaminación y degradación de los ecosistemas acuáticos, y las pérdidas de hábitats y biodiversidad (Manoli et al., 2019). Ante esta enorme amenaza para la provisión de Servicios Ecosistémicos (ES), la Infraestructura Verde (GI) surge como una solución basada en la naturaleza, capaz de combatir el cambio climático y evitar la fragmentación de los espacios ecológicos (Tudorie et al., 2019). La búsqueda de una planificación coherente en las ciudades que, a través de la mejora de los componentes de la GI, solucione el problema de la fragmentación del espacio ecológico fue la base del surgimiento de las UGI.

La Comisión Europea (2014) define la GI como “una red estratégicamente planificada de zonas naturales y seminaturales de alta calidad con otros elementos medioambientales, diseñada y gestionada para proporcionar un amplio abanico de servicios ecosistémicos y proteger la biodiversidad tanto de los asentamientos rurales como urbanos”. Elementos que pueden formar parte de la GI son los parques, jardines, áreas recreativas y deportivas, además de elementos de menor escala como paredes y cubiertas vegetales, zonas de flores silvestres, pasos elevados para fauna, cañaverales y colmenas, entre otros. Todos estos elementos tienen como objetivo la conservación ecosistémica desde una perspectiva multiescalar, interconectando escalas locales, regionales y nacionales por medio de principios de conectividad y coherencia ecológica.

Sin embargo, pese a ser responsable de la generación de ES favorables para el bienestar humano, la GI también es responsable de otros servicios que pueden afectar negativamente. Además de que algunas especies emiten compuestos orgánicos volátiles (COVs del inglés Volatile Organic Compounds) que aumentan la concentración de O₃ y PM en el aire (Ren et al., 2017), la emisión de polen por parte de la vegetación conforma el servicio con mayor

impacto sobre la salud humana, llegando a provocar respuestas alérgicas en el 30-40% de la población a nivel mundial. No obstante, una adecuada selección y distribución de los sexos y especies vegetales puede, según Cariñanos et al. (2014), paliar este problema.

Debido a la necesidad de sintetizar los conocimientos teóricos existentes sobre la UGI en relación a la gestión de los riesgos asociados al cambio climático, es en el año 2020 cuando Delgado-Capel y Cariñanos (2020) deciden crear un marco sistemático estandarizado que englobe diversas disciplinas, con el fin de promover la identificación de la UGI en entornos urbanos mediterráneos compactos. El protocolo establecía criterios para la definición y selección del mayor número posible de zonas verdes, en función a su distribución espacial, extensión, capacidad para proporcionar ES y mejorar el bienestar ciudadano. Para ello, tomaron como caso de estudio la ciudad de Granada (por ser una ciudad compacta de tamaño medio situada en la región mediterránea), que no cuenta con una UGI bien definida ni con un plan integrado para su promoción y gestión (Fig. 4).

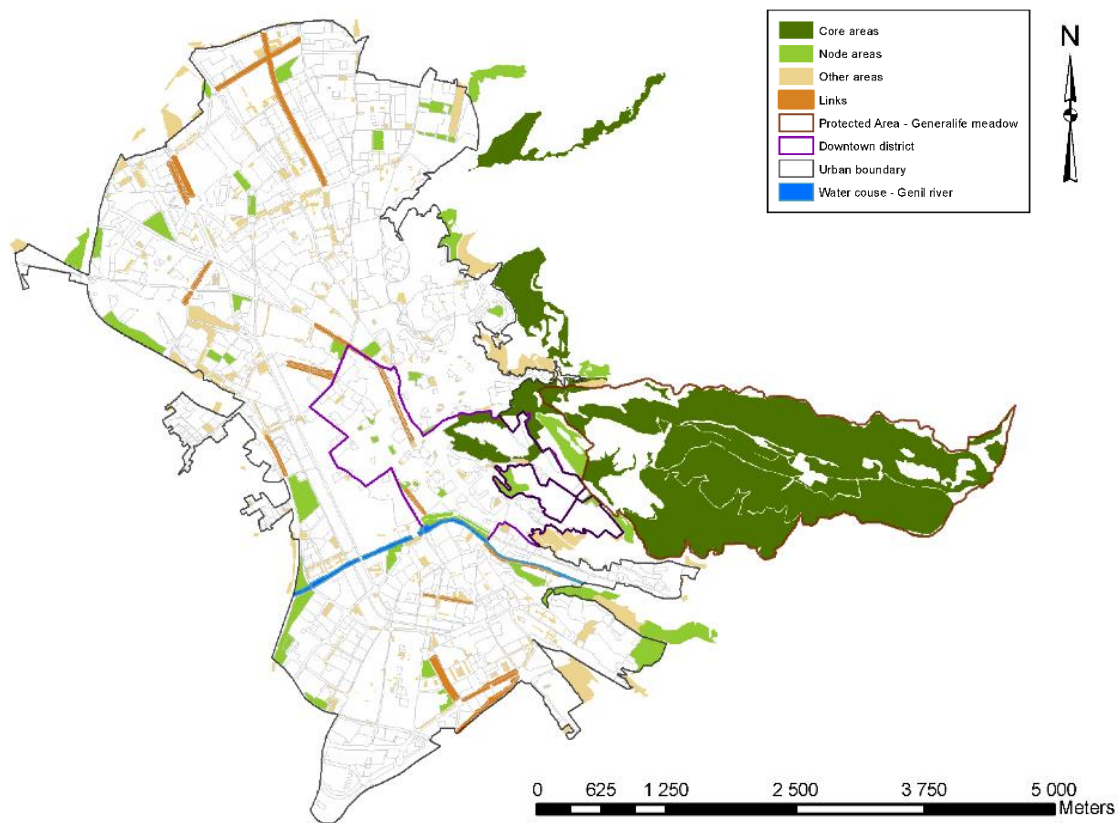


Figura 4. Distribución de las zonas verdes urbanas y periurbanas en la ciudad de Granada clasificadas en zonas núcleo, nodo y "otras" y enlaces. Extraído de Delgado-Capel & Cariñanos (2020).

3.4. TÉCNICA LIDAR DOPPLER

La técnica lidar Doppler combina los principios del lidar (*Light Detection And Rangin*) con el efecto Doppler óptico, para medir no solo la distancia, sino también la velocidad de objetos en movimiento. Por un lado, el sistema lidar emite pulsos de radiación láser con el fin de medir la distancia entre el emisor y un objeto, en nuestro caso partículas de aerosol. Su funcionamiento es similar al del radar, pero con la diferencia de que el lidar trabaja en la banda de radiación UV, visible o infrarroja, en lugar de en ondas de radio. Emitiendo un pulso de radiación láser infrarroja y midiendo el tiempo que tarda en reflejarse de vuelta al sensor es como el lidar puede calcular la distancia al objeto con gran precisión. Por otro lado, el efecto Doppler óptico es un fenómeno físico capaz de describir cambios en la frecuencia de una onda electromagnética cuando el objeto en el que incide está en movimiento respecto a la fuente de la onda (Andújar-Maqueda, 2020).

Esta técnica de teledetección activa es capaz de proporcionar mediciones de la velocidad radial del aire v_r y de la retrodispersión atenuada β_{att} de las partículas de aerosol. Estos últimos son trazadores ideales de los campos de vientos atmosféricos, pues se asume que el material particulado contenido en el aire se desplaza a la velocidad del viento. Tal y como se muestra en la Figura 5, su funcionamiento se basa en un sensor que emite a la atmósfera pulsos de radiación láser infrarroja con frecuencia f_0 con cierta repetición y capta sus retornos con frecuencia $f_0 + \Delta f$ (es decir, con cierto desplazamiento en frecuencia). Las partículas de aerosol atmosférico dispersan de vuelta al receptor una pequeña fracción de la energía electromagnética emitida, donde la señal se recoge y registra (Newsom et al., 2010). El tiempo que tarda en regresar la radiación permite calcular la distancia y, de este modo, es capaz de obtener información tridimensional de los elementos. El sensor lidar es también capaz de calcular la velocidad a la que la partícula se desplaza, pues ésta está relacionada con el cambio de frecuencia producido en la radiación reflejada debido a la interacción con las partículas en movimiento.

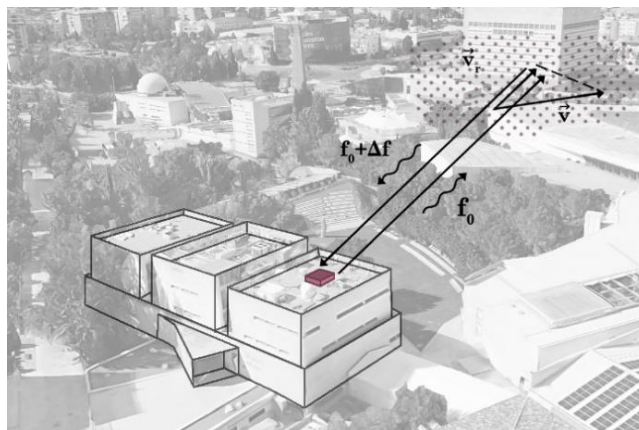


Figura 5. Principio de la medición en la técnica lidar Doppler.

La toma de datos válidos por medio de este sistema suele acotarse a: (1) la ABL, ya que el lidar Doppler (DL) proporciona mediciones precisas únicamente en regiones de la atmósfera donde la concentración de partículas de aerosol es lo suficientemente alta como para garantizar una buena relación señal-ruido (SNR, Signal-to-Noise Ratio), y (2) a las nubes ópticamente delgadas por encima de la ABL (Newsom et al., 2010). En resumen, el DL se puede emplear para obtener perfiles verticales y horizontales de partículas de aerosol troposféricos utilizando una longitud de onda con una alta resolución espaciotemporal (Ortiz-Amezcuca, 2019), especialmente si la comparamos con otros sistemas como el radar o el sonar.

4. ZONA DE ESTUDIO, MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

La ciudad sobre la que se realizará el estudio de la distribución horizontal de los contaminantes es, tal y como se ha hecho referencia anteriormente, la ciudad de Granada, situada en la Comunidad Autónoma de Andalucía, al sur de la Península Ibérica (Fig. 6). Granada es una ciudad de tamaño medio, con una superficie aproximada de 88,4 km² y una notable compacidad edificatoria. Según datos del Instituto Nacional de Estadística, el área metropolitana de Granada contaría, en 2023, con 501791 habitantes, de los cuales un 45,95% residirían en la capital granadina, siendo ésta la mayor ciudad del área metropolitana.



Figura 6. Ubicación del término municipal de Granada.

La ciudad de Granada, geológicamente emplazada en una amplia depresión intrabética formada por el río Genil y por la falda del macizo más alto de la península Ibérica (Sierra Nevada), presenta una climatología caracterizada por tener un clima mediterráneo continentalizado, diferente del clima mediterráneo típico debido a la altitud (de 682 msnm) a la que se encuentra la ciudad y su lejanía respecto de la costa. De acuerdo con la clasificación climática de Köppen, el clima de la ciudad de Granada es de transición entre el clima mediterráneo (Csa) y el clima semiárido frío (BSk). En la Figura 7a vemos que los inviernos son frescos y, aunque no quede reflejado en el

climograma, en ocasiones las temperaturas descienden los 0°C; los veranos secos y calurosos, con una gran variabilidad térmica a lo largo de todo el año. Las lluvias son ciertamente escasas, sobre todo en época estival, donde no superan los 30 mm; las pocas precipitaciones que se producen se concentran en invierno, dando una media anual de 536 mm. La velocidad del viento a nivel de superficie muestra un claro patrón (Casquero-Vera et al., 2016), caracterizado por velocidades bajas durante las horas nocturnas y primeras de la mañana (lo que favorece el estancamiento de los contaminantes atmosféricos emitidos en superficie), con un aumento paulatino de la velocidad que provoca picos máximos durante las horas de la tarde (favoreciendo la dispersión de los contaminantes suspendidos en el aire).

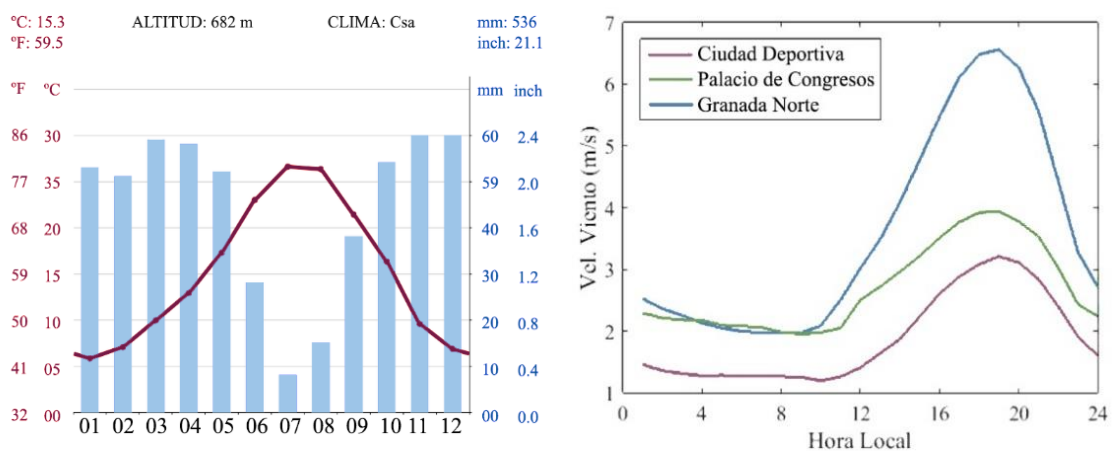


Figura 7. *Izquierda* - Climograma de la ciudad de Granada. Extraído de CLIMATE-DATA.ORG, 2020. *Derecha* - Promedio de velocidades de viento para las estaciones de medida en el periodo 2010-2015. Extraído de Casquero-Vera et al. (2016).

Este régimen climático favorece la diversidad floral, tanto natural como ornamental, en las zonas verdes de la ciudad, que alcanza un total de 2.740.125 m². Esta superficie se reparte entre el bosque periurbano que rodea el complejo patrimonial de la Alhambra, de 1.179.023 m², y entre los 363 parques y zonas ajardinadas de diversos tamaños que registra el núcleo urbano (entre los que se registran, según la web oficial del Ayto. de Granada, el suelo cultivable, las superficies pavimentadas bajo las que el arbolado viario extienda su sistema radicular, los restos de vegetación espontánea o natural y los suelos vegetales no degradados por el proceso urbanizador, además del total de la superficie de recintos ajardinados históricos y parques de nueva creación), que en total suman 1.561.102 m². Teniendo en cuenta el número de habitantes que registra la ciudad, esto implicaría un total de 11,88 m²/habitante, lo cual concuerda con las pautas establecidas por la OMS, que recomienda un mínimo de entre 10 y 15 m² de zona verde por habitante. No obstante, según estudios realizados sobre los espacios verdes en la ciudad de Granada, la dotación de zonas verdes no se encuentra equitativamente

distribuida, existiendo grandes contrastes entre, por ejemplo, la zona Norte y el distrito Genil, que constan de una superficie de 273.458 y 217.070 m² respectivamente, y los barrios Albaicín y Beiro, que apenas disponen de 54.314 y 42.194 m² de zonas verdes, respectivamente (Cerrada Pérez, 2020). También se observó una amplia variedad en la densidad arbórea, cuantificado en un total de 46.472 árboles entre espacios verdes y alineaciones en zonas pavimentadas. Algunas de las especies presentes en la mayoría de espacios son el arce (*Acer negundo*), el cinamomo (*Melia azederach*), el ciprés (*Cupressus spp.*), el granado (*Punica granatum*), la morera (*Morus nigra*), el olivo (*Olea europaea*), el plátano de sombra (*Platanus × hispanica*) o el tilo (*Tilia spp.*) (Cerrada Pérez, 2020).

El instrumento DL empleado para la toma de datos del coeficiente de retrodispersión atenuada, se sitúa en la cubierta del Instituto Interuniversitario de Investigación del Sistema Tierra en Andalucía (37° 9'49.60"N 3°36'18.67"O) (Fig. 8), como parte de la estación ACTRIS (Aerosol, Clouds and Trace Gases Research Infrastructure; Laj et al., 2024) denominada ÁGORA (Andalusian Global ObseRvatory of the Atmosphere). Los datos referentes a la concentración de CO, SO₂, NO, NO₂ y PM₁₀ se toman en estaciones de calidad del aire, pertenecientes a la Red Automática de Calidad del Aire (Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio [CMAOT], s. f.-a). Estas estaciones se sitúan en puntos representativos (Fig. 8) y, cada una de ellas, se dota con distintos equipos de medida de contaminantes. Las estaciones existentes en el Área Metropolitana de Granada se nombran a continuación en la Tabla 3. Además, en la Figura 9 se grafían los entornos en los que las tres estaciones de medición se ubican, con el fin de estudiar con mayor detalle a qué tipo de contaminante se encuentran expuestas cada una de ellas. En el Anexo I se muestran los mismos planos con mayor definición.

| MUNICIPIO | ESTACIÓN | ÁMBITO LOCAL-PRÓXIMO | UBICACIÓN |
|-----------|--------------------------|----------------------|-------------------------------------|
| Armillá | Ciudad Deportiva | Suburbana-Fondo | 37° 8' 7.96" N 3° 37' 9.28" O |
| Granada | Granada Norte | Urbana-Tráfico | 37° 9' 56.46" N 3° 36' 0.37" O |
| Granada | Palacio Congresos | Urbana-Fondo | 37° 11' 45.98" N 3° 36' 45.59" O |

Tabla 3. Estaciones de medida de calidad del aire en el Área Metropolitana de Granada. Información obtenida del Portal Rediam (CMAOT, s. f.-b).

La estación Ciudad Deportiva (Fig. 9-a), ubicada en el municipio de Armilla, se sitúa en un corazón de un gran complejo deportivo al aire libre, el cual funciona como zona de transición entre la ciudad y las tierras agrícolas de la

Vega, dando así lugar a un entorno que combina edificios de diversos usos con zonas no urbanizadas. En las inmediaciones del complejo deportivo encontramos el Polígono Tecnológico de San Nicolás; no obstante, éste no afecta de sobremanera a la calidad del aire, pues las actividades allí realizadas están relacionadas con procesos industriales de altas temperaturas, que resultan ser los que más contaminantes desprenden al aire. Sin embargo, sí hay que tener en cuenta su proximidad a la Vega y a las tierras de cultivo, pues la quema de residuos agrícolas al aire libre es una de las técnicas de eliminación de residuos más extendida, principalmente desde finales de otoño hasta principios de primavera (Casquero-Vera, 2021), lo cual es reseñable pues la quema de biomasa representa una importante fuente de emisión de partículas de aerosol en el área urbana de Granada (Titos et al., 2017). Los equipamientos educativos son los predominantes en el entorno de esta estación, y no presentan grandes alturas que puedan influir



Figura 8. Ubicación de los diferentes aparatos de medición dentro del núcleo urbano.

negativamente en la dispersión de los contaminantes. El arbolado urbano es abundante en los parques y edificios cercanos, siendo una fuente de OA que podría disparar los niveles de material particulado del aire. En definitiva, podremos clasificar esta estación como una de fondo suburbano, en una zona de fondo no influenciada ni por el tráfico ni por la industria, por lo que resulta ideal para representar el nivel de contaminación al que se exponen los ciudadanos de manera genérica.

De igual manera, la estación de Palacio de Congresos (Fig. 9-b) también es una estación de fondo, esta vez urbana, pues se ubica en el pequeño Parque Infantil Violón, en los Jardines del Violón, y se separa cerca de 50 m de la mayoría de vías rodadas que lo circundan. Es por ello que no se ve influenciada por el tráfico y por tanto, al igual que la estación de Ciudad Deportiva, resulta ideal para representar de manera genérica el nivel de contaminación al que se exponen los ciudadanos. Los Jardines del Violón se componen de dos ejes perpendiculares. Uno de ellos es la calle Ribera del Genil, la cual hace de colchón entre el parque y el Río Genil. Esta calle se desarrolla paralela al río y se compone de un pequeño paseo terroso bordeado de palmeras (*Phoenix canariensis*) y tilos (*Tilia x vulgaris*) a los laterales, todo esto rodeado a su vez por hileras de plátanos de sombra (*Platanus x hispánica*). El eje perpendicular al río, donde se ubica el parque infantil, se compone de parterres de rosales y arbustos aromáticos que delimitan zonas de estancia rodeadas de palmeras. En los alcorques del parque también podemos encontrar cinamomos (*Melia azedarach*), además de un camino de naranjos (*Citrus aurantium*) que conduce hacia la Ermita de San Sebastián (Ayuntamiento de Granada, 2004). La explanada del Palacio de Congresos, en la que se realizan numerosos eventos sociales, limita en su parte sur con el Paseo del Violón, calle de gran importancia pues, junto a la calle Domingo Puente Martín y a la avenida Fernando de los Ríos, conforman un eje vertebrador a lo largo del barrio del Zaidín, llegando a conectar, incluso, el centro de Granada con el municipio de Armilla.

La estación de Granada Norte (Fig. 9-c) se sitúa en mitad del boulevard arbolado de la avenida Luis Miranda Dávalos, rodeada tanto por carreteras que reciben una gran afluencia de tráfico rodado, como por grandes ejes arbolados capaces de liberar OA a la atmósfera durante sus períodos de floración. Esta calle, junto con la calles Tete Montoliú y Periodista Luis de Vicente, conforman un eje rodado de kilómetro y medio de longitud que comunican el Camino de Alfacar con la avenida de Francisco Ayala. Al localizarse en el corazón de una vía rodada de gran tránsito dentro del núcleo urbano, esta estación se emplea para medir la contaminación directa del tráfico, al igual que el de la ciudad en general, incluyendo esta estación en una de tráfico urbano dentro de la clasificación que propone la Red

Automática de Calidad del Aire. Los edificios ubicados en su entorno cercano son la gran mayoría residenciales unifamiliares y plurifamiliares, aunque también podemos encontrar edificios con usos de oficinas y públicos, como lo es la Cámara de Comercio de Granada. La altura de estos oscila entre un par de plantas hasta 6 plantas de altura aquellos más altos. La línea de metro Armilla-Albolote discurre por el eje conformado por la calle Luis Amador y la avenida de la Argentinita, perpendicular a la avenida Luis Miranda Dávalos. El arbolado urbano situado en la calle se compone de hileras paralelas de cinamomos (*Melia azedarach*); durante su etapa de floración, que abarca desde abril hasta mayo, el cinamomo es un gran emisor de bioaerosoles a la atmósfera.

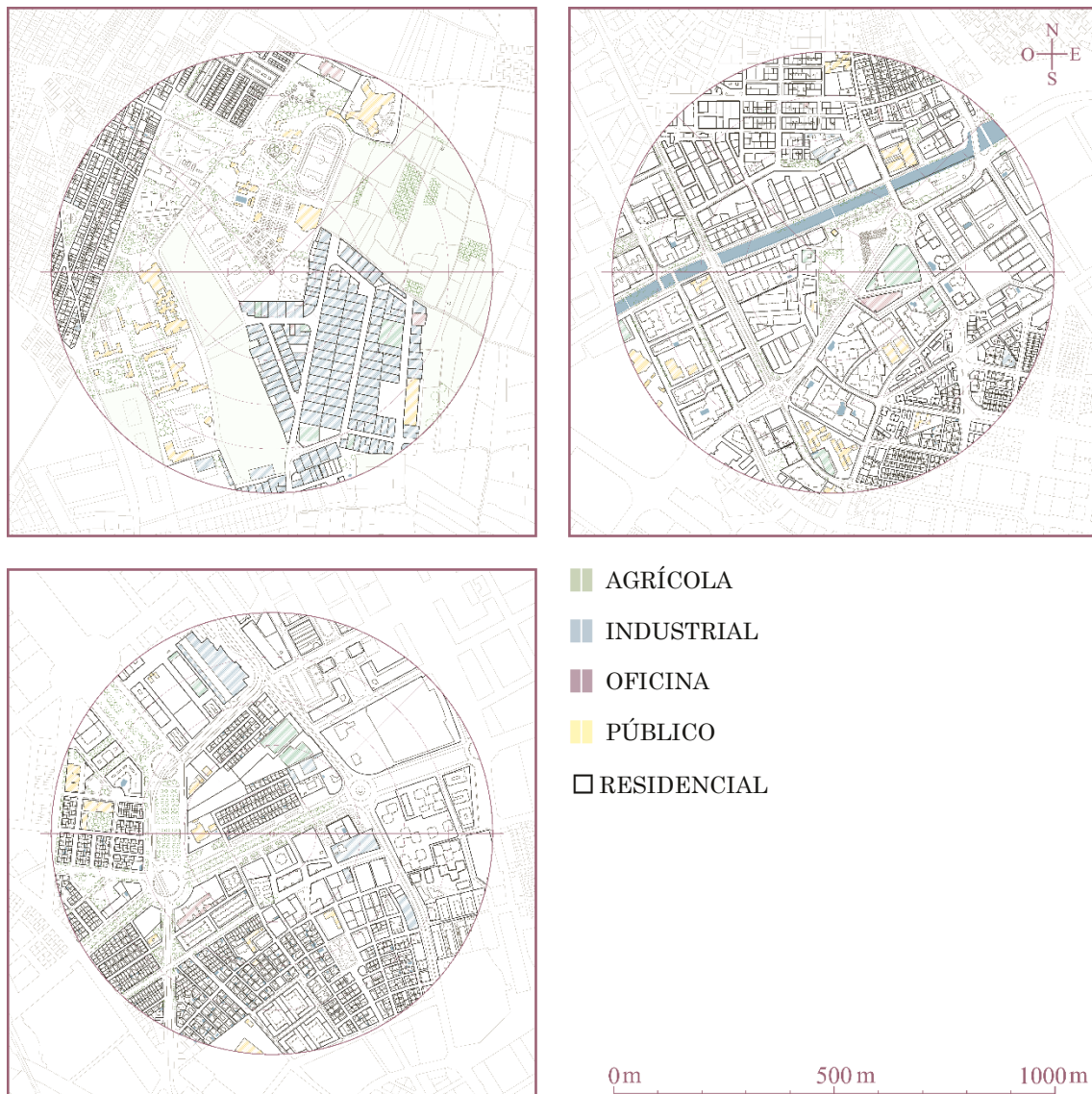


Figura 9. Entorno de las tres estaciones de calidad del aire del Área Metropolitana de Granada. Éstas son (a) Ciudad Deportiva, (b) Palacio de Congresos y (c) Granada Norte. En verde aparecen usos agrícolas; en azul, industriales; en rosa, de oficinas; y en amarillo, públicos. Elaboración propia a partir de datos catastrales.

4.2. INSTRUMENTACIÓN Y OBTENCIÓN DE DATOS

4.2.1. SISTEMA LIDAR DOPPLER

El aparato DL empleado proporciona perfiles de intensidad de la radiación retrodispersada en términos de SNR y de la velocidad radial del viento (obtenida a partir del desplazamiento Doppler de la radiación retrodispersada). Sin embargo, para poder calcular correctamente los perfiles SNR es necesario un postprocesamiento adicional (Manninen et al., 2016), el cual proporciona una SNR corregida mediante la que es posible calcular la retrodispersión atenuada (β_{att}) (Ortiz-Amezcu, 2019).

La obtención del coeficiente de retrodispersión atenuada se fundamenta en el proceso de dispersión, que consiste en un cambio en la dirección de la radiación electromagnética dispersada con respecto a la dirección de la radiación incidente sobre la partícula o molécula atmosférica, medido a través del coeficiente de dispersión. El coeficiente referido a la dispersión dada a 180° (con respecto a la incidencia del haz de radiación sobre el elemento dispersor, en este caso partículas y moléculas atmosféricas) se conoce como coeficiente de retrodispersión. A partir del coeficiente de retrodispersión se puede definir el coeficiente de retrodispersión atenuada, que contabiliza la retrodispersión de las partículas de aerosol modificada por la atenuación de la radiación debido a la presencia de componentes atmosféricos en la porción atmosférica contenida entre el sistema DL y las partículas de aerosol contenidas en el volumen atmosférico a estudiar (Andújar-Maqueda, 2020).

β_{att} no se puede obtener en cielos con alta presencia de nubes ya que las nubes pueden atenuar totalmente los pulsos de radiación láser, impidiendo obtener información de las zonas que se encuentren por encima de ellas y, por ende, de las partículas de aerosol que se encuentran en dicha sección de la atmósfera (Andújar-Maqueda, 2020). Así, este coeficiente puede emplearse para proporcionar además información sobre la ubicación de nubes. En este estudio se han tomado como rango para visualización de datos los valores entre 10^{-6} y $5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^{-1} \text{ sr}^{-1}$, por lo que es muy probable que varios de los escaneos se vean alterados debido a la presencia de nubes, pues su valor umbral se fija, según numerosos estudios, en valores de β_{att} mayores a $10^{-5} \text{ m}^{-1} \text{ sr}^{-1}$ (Harvey et al., 2013; Westbrook et al., 2010). En definitiva, para el propósito de este estudio es necesario identificar y eliminar aquellos escaneos influenciados por la presencia de nubosidades, pues interfieren e intensifican los valores registrados de β_{att} .

Durante la toma de datos, se tomaron medidas con un protocolo de geometría de observación específico para realizar escaneos quasi-horizontales. El ángulo de barrido horizontal (ángulo azimutal) varió entre 0° y 360° , estando los 0°

situados a norte y los 90° a este. El radio de alcance es 6 kilómetros, con un ángulo de elevación de 10°; sin embargo, en este estudio se tomarán los datos hasta una distancia máxima de 4 km. La resolución espacial fue de 30 m. La longitud de onda del DL empleado es 1560 nm, con una energía de pulso de menos de 100 μJ y una duración de pulso de 200 ns. Los escaneos se realizaron cada 3 horas (comenzando a las 00 h UTC) con una duración aproximada de 6 minutos. La radiación emitida por el instrumento se ve afectada por las construcciones colindantes, por ello se ha de situar en el punto más alto y despejado posible (Yuang et al., 2020); es por ello que se aprecia la existencia de una zona ciega en la que no se pudo recoger información, entre los 95° y los 105° del barrido horizontal, por la interferencia de la señal con un núcleo de comunicación vertical empleado como montacargas para facilitar la subida de instrumentos a la azotea del edificio (Fig. 10-a). En la Figura 10-b se comprueba que la medición realizada con el sistema DL (a 4 km de distancia y con una elevación de escaneo de 10°) no rebasan el límite de la ABL, puesto que es en esta sección de la atmósfera donde se llevan a cabo procesos de transporte de partículas que se pretenden estudiar.

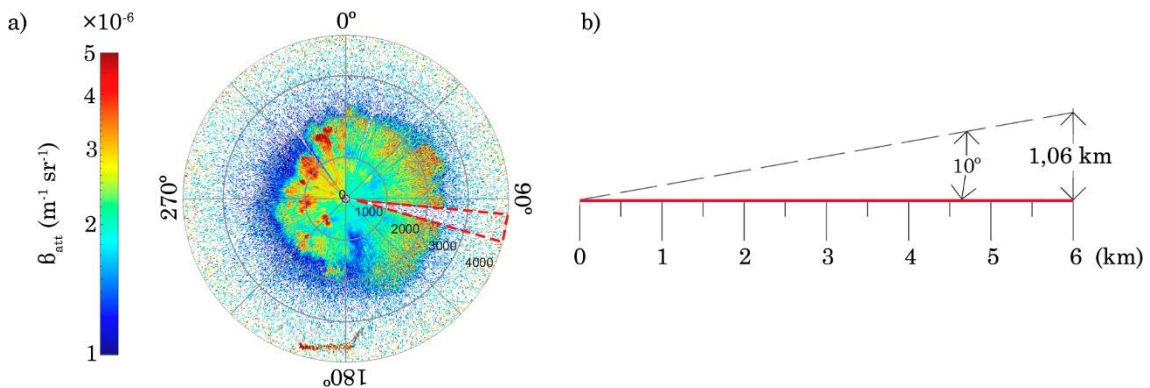


Figura 10. Izquierda – Ejemplo de un escaneo horizontal el día 01/04/2023 a las 9:00 UTC, marcando la zona ciega (línea roja discontinua) presente en los escaneos debido a la interferencia de la señal con un núcleo de comunicación vertical. Derecha - Comprobación del alcance de la medición realizada con el sistema DL en altura.

4.2.2. CONCENTRACIÓN DE CONTAMINANTES NO BIOGÉNICOS

Desde la Conserjería de Sostenibilidad, Medio Ambiente y Economía Azul de la Junta de Andalucía se garantiza el acceso a la información ambiental a través de la Red de Información Ambiental de Andalucía (Rediam). Forman parte de la Red de Vigilancia y Control todos aquellos medios susceptibles de ser empleados para la determinación de la calidad del aire en el territorio andaluz. En la mayor parte de las ubicaciones existe un sistema de recolección de datos, que reúne y envía la información de todos los sensores al Centro de Datos de Calidad del Aire. Estos datos se recogen en tiempo real, actualizando continuamente la información del comportamiento de los diferentes contaminantes en todas las provincias. Tras la recepción de la información en

el Centro de Datos, ésta se trata, se controla y se valida. Las subredes que conforman la Red de Vigilancia y Control son tres: la Red Automática de Calidad del Aire, la Red Automática de Emisiones a la Atmósfera y la Red de captadores manuales; sin embargo, para nuestro estudio nos interesa solo los datos obtenidos por la primera.

Las concentraciones atmosféricas de los contaminantes se toman de manera automática y continua, en intervalos de 10 minutos las 24 horas del día. Los diferentes instrumentos de medición de cada estación se ubican en el interior de su respectiva cabina de muestreo, normalmente sitiado a unos 4 metros por encima del nivel de calle. Los contaminantes medidos son, entre otros, CO, O₃, SO₂, NO, NO₂, NO_x y PM₁₀. Cada uno de ellos se miden con diferentes instrumentos y técnicas (Casquero-Vera et al. 2016), que se comentan a continuación y que se vuelven a recopilar en la Tabla 4.

Las moléculas de CO son capaces de absorber la radiación infrarroja con una longitud de onda de 4,7 μm ; esta absorción de la radiación produce un aumento de la temperatura proporcional al CO presente. Éste es el principio de operación en el que se basa la medición de la concentración de este gas. El instrumento *Thermo Environmental Instruments Inc.*, Modelo 48 cuenta con un filamento calentado capaz de producir la radiación infrarroja precisada. Esta radiación incide de forma alterna sobre dos celdas, la primera de ellas rellena de un gas inerte que no absorbe radiación infrarroja, y la segunda de ellas rellena del aire a analizar. La diferencia de temperatura entre ambas muestras determina la concentración de CO del aire.

Para la toma de datos de O₃ se emplea el analizador *Thermo Environmental Instruments Inc.*, Modelo 49, aplicando el método de fotometría UV. Este instrumento basa su funcionamiento en el principio de que las moléculas de O₃ absorben la radiación UV a una longitud de onda de 254 nm. Por ello, se transmiten secuencialmente haces de radiación a dos muestras, una de ellas contiene aire ambiental filtrado (un catalizador elimina el O₃ del aire) y la otra, aire ambiental sin filtrar. La diferencia entre intensidad de la radiación que pasa a través de ambas muestras se calcula puesto que, aplicando la ley de Beer-Bouguer-Lambert, concluimos que el grado de absorción de la radiación UV está directamente relacionado con la concentración de ozono.

La medición de SO₂ se realiza de manera muy similar a la del O₃, con el *Thermo Environmental Instruments Inc.*, Modelo 43i. Su funcionamiento, al igual que el del Modelo 49, se fundamenta en la absorción de radiación UV por parte de las moléculas de SO₂, las cuales se excitan a una determinada longitud de onda para, posteriormente, decaer a un estado de menor energía emitiendo radiación UV con una longitud de onda diferente. La muestra de aire a examinar entra al aparato a través de un *kicker* de hidrocarburo,

encargado de eliminar los hidrocarburos que se encuentren en la porción de aire a analizar, para después pasar a la cámara de fluorescencia, donde la radiación UV pulsante excita las moléculas de SO₂. Estas moléculas excitadas pasan a estados energéticos más bajos, emitiendo radiación UV proporcional a la concentración de SO₂ presente.

Para medición de NO y NO₂ se emplea el analizador por quimioluminiscencia *Thermo Environmental Instruments Inc.*, Modelo 42. Por un lado, la interacción, en fase gaseosa, del NO con el O₃ (en exceso) produce la emisión de radiación característica (quimioluminiscencia) cuya intensidad es linealmente proporcional a la concentración de NO de la muestra. Esta emisión de radiación $h\nu$ se produce debido al descenso de las moléculas excitadas de NO₂ hacia estados de menor energía ($\text{NO} + \text{O}_3 \rightarrow \text{NO}_2 + \text{O}_2 + h\nu$). El NO₂, por otra parte, debe transformarse primero en NO antes de que pueda medirse mediante la reacción quimioluminiscente. El aire ambiental entra al aparato a través de un capilar que desemboca en una válvula selenoide de dos vías: (1) modo NO, la muestra se dirige directamente a la cámara de reacción y (2) modo NO_x, la muestra se dirige a la cámara de reacción tras pasar por un convertidor NO₂-to-NO. El aire que pasa a través del modo 1 determinará, a partir de la luminiscencia emitida, la concentración de NO; el que pasa a través del modo 2, la concentración de NO_x (NO y NO₂ reducido). La concentración de NO₂ será, entonces, la diferencia entre NO y NO_x.

La medición de PM₁₀ se realiza mediante un analizador de partículas de absorción de radiación beta. El aire es absorbido, con un flujo constante, al interior del equipo a través de la unidad de toma, que cuenta con un cabezal capaz de tamizar las partículas con diámetro inferior a 10 μm del resto de partículas del aire. Estas partículas se depositan sobre un filtro continuo en forma de cinta, sobre el que se emite radiación beta. Tras haber traspasado la muestra situada sobre la cinta continua, la intensidad de dicha radiación se registra por medio de una cámara ionizada que funciona como detector. La masa de partículas depositadas sobre el filtro está directamente relacionada con la atenuación de la radiación beta, de esta manera se puede medir la concentración de PM₁₀.

| CONTAMINANTE | INSTRUMENTO | MODELO |
|---------------------------------------|---------------------------------------|------------|
| CO | Thermo Environmental Instruments Inc. | Modelo 48 |
| O ₃ | | Modelo 49 |
| SO ₂ | | Modelo 43i |
| NO, NO ₂ , NO _x | | Modelo 42 |
| PM ₁₀ | - | - |

Tabla 4. Aparatos de medición empleados para la obtención de las concentraciones de los contaminantes no biogénicos.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. CONTAMINACIÓN NO BIOGÉNICA

En la Figura 11 se muestran las concentraciones de CO, NO, NO₂, SO₂ y PM₁₀ en las tres estaciones de medida de calidad del aire: Ciudad Deportiva, Palacio de Congresos y Granada Norte. La concentración de contaminantes, medida en mg/m³ para el CO y en µg/m³ para el resto de partículas, se representa por horas; el resultado son cinco gráficas, una por contaminante, en las que los datos proporcionados por la Red Automática de Calidad del Aire y comprendidos entre primeros de enero hasta finales de julio del año 2023 se promedian, obteniendo así un patrón medio de concentraciones a lo largo del día. Además, se realiza una distinción entre los niveles de polución captados durante los días laborales (de lunes a viernes, L-V) y los días de fin de semana (sábados y domingos, S-D), pues resulta de gran interés conocer cómo esto afecta a la emisión de los contaminantes a la atmósfera. En el Anexo II, además, se incluyen cinco gráficas, una por contaminante, donde se muestra la desviación estándar de cada uno de los puntos en función de la hora. De esta manera podemos comprobar la variabilidad en las diferentes concentraciones de los contaminantes.

La concentración de CO (Fig. 11-a), gas procedente en gran medida del transporte por carretera, se mantiene relativamente constante a lo largo del día en las estaciones de Ciudad Deportiva y Palacio de Congresos, sin presentar grandes variaciones entre las mediciones L-V y S-D. Las concentraciones oscilan entre 0,25-0,35 mg/m³ para Ciudad Deportiva y entre 0,10-0,20 mg/m³ para Palacio de Congresos, produciéndose los picos máximos entre las 8:00 y 10:00 horas de la mañana (UTC), y volviendo a alcanzar dichos picos en las horas cercanas a la madrugada. Este pequeño aumento de la concentración solo es notable en el periodo L-V, ya que en el periodo S-D los niveles se mantienen constantes en torno a 0,30 mg/m³ y 0,15 mg/m³, respectivamente. Es en la estación de Granada Norte donde la concentración sufre mayores variaciones, apareciendo una diferencia de más de 0,40 mg/m³ entre los valores cumbre y los valle, siendo la concentración mínima de 0,43 mg/m³ y la máxima, de 0,86 mg/m³. Esta estación, al igual que las dos anteriores, encuentra sus valores pico en el horario comprendido entre las 8:00 y las 9:00 de la mañana, volviendo a tener un pico en las horas cercanas a la madrugada, aunque éste mucho menor que el anterior. Se observa, además, que la concentración mínima de esta estación es mucho mayor que las máximas de Ciudad Deportiva y Palacio de Congresos; esto se podría deber a que el CO es resultante de, entre otros, el tráfico rodado, por lo que es normal que se registren mayores concentraciones en Granada Norte, pues es una estación que tiene el tráfico como ámbito próximo.

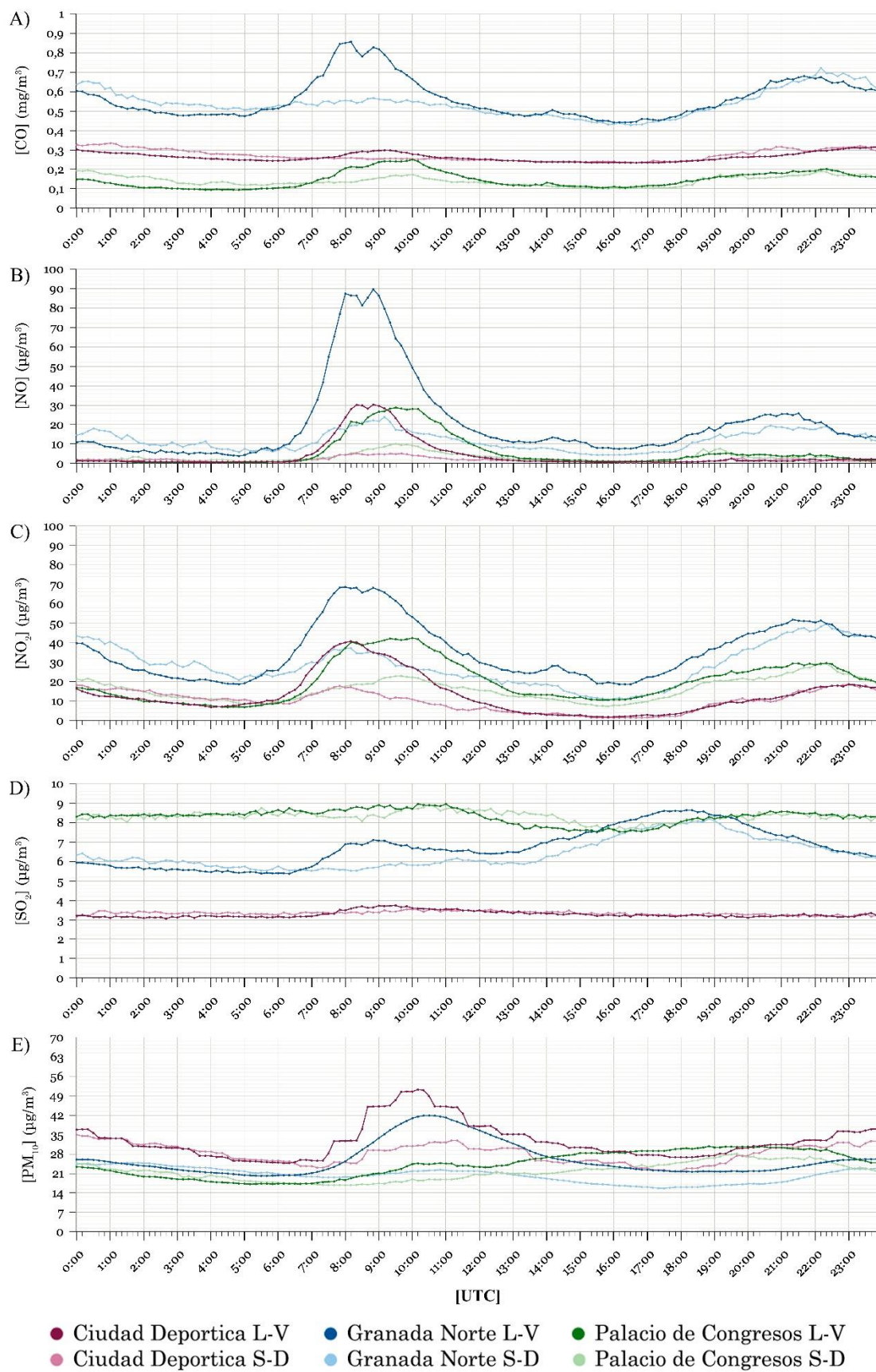


Figura 11. Promedio horario de las concentraciones de CO (A), NO (B), NO₂ (C), SO₂ (D) y PM₁₀ (E) entre 01/01/2023 y 31/07/2023.

Los óxidos de nitrógeno (Fig. 11-b. y Fig. 11-c) muestran una tendencia similar a la del monóxido de carbono, presentando valores máximos en las primeras horas de la mañana, coincidentes posiblemente con el desplazamiento por carretera, principal fuente de emisión de estos gases en urbes, de la población a trabajos o centros de estudio. Por su parte, la concentración de NO no resulta significativa en las estaciones de Ciudad Deportiva y Palacio de Congresos, ambas estaciones de fondo, donde se registran valores que van desde poco más 0,00 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ hasta los 30,00 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, alcanzando su valor máximo a las 8:50 y a las 10:00 respectivamente. Ambas estaciones no vuelven a presentar ningún otro pico de concentración, manteniendo sus valores por debajo de los 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ todo el resto del día. Además, como es de esperar, las mediciones pertenecientes a los días S-D presentan máximos más suaves con respecto a los que presentan los días L-V. La concentración de NO registrada en Granada Norte en el período L-V es la que mayores valores presenta, con un máximo de 89,59 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 8:50 horas, con una desviación estándar de 69,30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, lo que supondría una concentración que prácticamente triplica las experimentadas en el resto de estaciones a la misma hora. Por otra parte, el patrón que presenta el NO₂ es bastante similar al presentado por el NO, aunque las concentraciones observadas varían.

La concentración de NO₂ en las estaciones de Ciudad Deportiva y Palacio de Congresos presentan los mismos valores durante las horas de la madrugada. Alcanzan su pico máximo también a primeras horas de la mañana, rozando valores ligeramente superiores a los 40,00 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Vuelve a aparecer un segundo pico, con unos valores algo menores, en torno a las 21:00-22:00 horas. Este segundo pico se hace más notorio en Palacio de Congresos que en Ciudad Deportiva, con valores cercanos a 30,00 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente. En Granada Norte la concentración máxima registrada se produce entre las 7:50 y las 8:50 y roza los 70,00 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. En las tres estaciones, las líneas S-D se acompañan con sus respectivas líneas L-V a lo largo de la mayoría del día, a excepción de las primeras horas de la mañana, donde en los días entre semana las concentraciones de NO₂ son visiblemente mayores. Este es, además, el primero de los gases estudiados cuyas líneas correspondientes a datos S-D presentan sus valores máximos al final del día y no al principio del mismo.

Para los óxidos de nitrógeno NO_x, el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (s. f.) fija unos valores límites anuales de 40,00 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 30,00 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para la protección de la salud humana y para la protección de los ecosistemas, respectivamente. Para este estudio no se cuenta con los valores de NO_x registrados a lo largo de todo el año civil 2023, aunque sí se cuenta con los comprendidos entre enero y julio de ese mismo año (214 días de 365). Se promedian dichos valores para las tres estaciones, obteniendo una

media de $16,83 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en Ciudad Deportiva, $25,03 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en Palacio de Congresos y $51,89 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en Granada Norte, a expensas de los datos medidos en los 151 días restantes. Podemos concluir, entonces, que la tendencia de la concentración en Ciudad Deportiva es aceptable, tanto para humanos como para -los ecosistemas; mientras, en Palacio de Congresos se registran medias altas, aunque permitidas por la normativa; sin embargo, el valor medio de la concentración obtenido en Granada Norte resulta perjudicial, tanto para seres humanos como para las especies vegetales que allí habitan. Este hecho es remarcable, pues la alta presencia de partículas de aerosol atmosférico en el aire urbano produce que el ambiente resulte hostil para las plantas, que se ven obligadas a producir proteínas de estrés, haciendo que su polen tenga una mayor agresividad y, por ende, alergenicidad (SEAIC, 2017).

La gráfica correspondiente a la concentración de SO_2 (Fig. 11-d) es algo más constante que las anteriores. Este gas procede de procesos industriales de alta temperatura, hogares de combustión y tráfico; aunque, para este estudio, los procesos industriales quedan descartados de las posibles fuentes de emisión de SO_2 , pues ninguna de las estaciones se encuentra bajo la influencia de grandes industrias. En la estación de Ciudad Deportiva se registran valores prácticamente constantes a lo largo de todo el día. Estos se encuentran entre $3,00$ y $4,00 \mu\text{g}/\text{m}^3$, tanto en el periodo L-V como en el S-D. De igual manera sucede en Palacio de Congresos, donde se registran los mayores valores de entre las tres estaciones, con concentraciones que oscilan entre los $7,50$ y $9,00 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a lo largo del día, y sin grandes diferencias entre días laborales y de fin de semana. Es en la estación de Granada Norte donde se observan las mayores variaciones en la concentración, siendo esta constante en torno a los $5,50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ durante las 7 primeras horas del día y, posteriormente, se produce un aumento de la misma hasta alcanzar un pico de $8,60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sobre las 18:00 horas. La diferencia entre este gas y los tres anteriores es: (1) la linealidad de los valores en las tres estaciones, en las cuales no se producen grandes picos como sí sucedía en las gráficas del CO , NO y NO_2 , y (2) la recogida de las mayores concentraciones de este contaminante en Palacio de Congresos. El SO_2 no supera, durante ninguno de los días comprendidos entre los meses de enero y julio de 2023, el valor máximo permitido para las emisiones de este gas, valor fijado en $125,00 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en 24 horas.

Para terminar, se estudia el caso del PM_{10} , que resulta de gran interés pues es el detectado mediante el sistema de teledetección DL. En la Figura 11e podemos observar que, de las tres estaciones, la que más partículas de aerosol registra es Ciudad Deportiva, seguida por Granada Norte y, por último, Palacio de Congresos. Ciudad Deportiva y Granada Norte presentan sus valores máximos en torno a las 10:00 horas, con concentraciones de $51,19 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $41,84 \mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente. El resto del tiempo, en Ciudad

Deportiva se registran valores de entre 38,00 y 22,00 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, y en Granada Norte, de entre 16,00 y 26,00 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. En Palacio de Congresos los valores máximos se registran entre las 14:00 y las 22:00, con un valor constante en torno a 30,00 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Durante las primeras siete horas del día, las líneas correspondientes a S-D se asemejan a sus correspondientes L-V, sin embargo, las líneas S-D quedan relativamente constantes a lo largo del día, mientras que las líneas L-V van aumentando su separación respecto a estas primeras. Según el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (s. f.), los niveles de PM_{10} diarios máximos permitidos son de 50,00 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, valor que, como podemos observar, en los 7 meses estudiados se supera en varias ocasiones (Fig. 12), llegando incluso a duplicar la tasa permitida ciertos días.

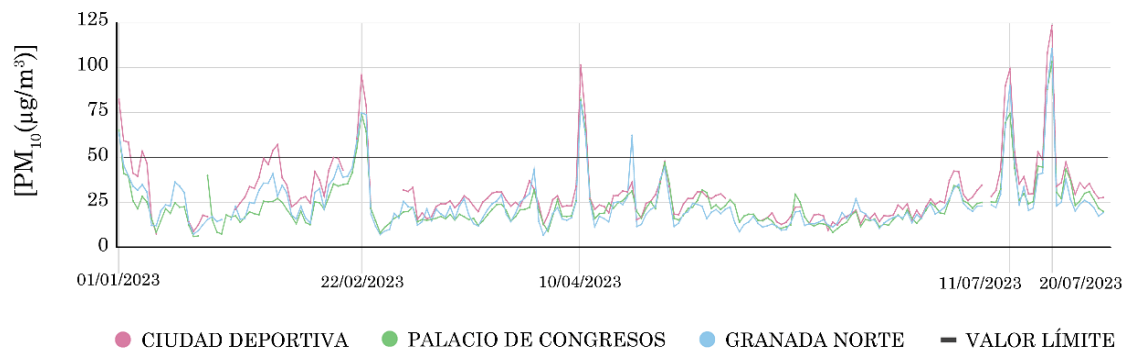


Figura 12. Medias diarias de la concentración de PM_{10} en las tres estaciones. Se comparan con el valor límite permitido por el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

5.2. DISTRIBUCIÓN HORIZONTAL DEL COEFICIENTE DE RETRODISPERSIÓN ATENUADA

Tal y como se menciona con anterioridad en las secciones 3.4 y 4.2.1, β_{att} es un indicador de la cantidad de material particulado presente en una determinada porción de la atmósfera, en nuestro caso en un área de radio 4 km en torno al IISTA-CEAMA, lugar donde se ubica el DL con el que se realizan las mediciones.

En este apartado se busca obtener resultados generales, capaces de darnos información sobre los patrones de comportamiento de las partículas de aerosol atmosférico tanto a lo largo de las diferentes horas de un mismo día, como a lo largo de los meses. Es por ello que, en esta sección, se presentan 20 mapas mensuales de distribución horizontal de β_{att} , divididos en cinco figuras diferentes en función de la hora a la que fueron realizados los escaneos. Para la producción de estas medias no todos los escaneos son válidos, pues muchos de ellos se ven afectados por la presencia de estructuras nubosas; esto se debe a que la presencia de nubes también es captada por el DL y ésta produce zonas de alto β_{att} en los mapas de distribución horizontal, saturando la figura

resultante. En Tabla 4 se pretende mostrar cuales han sido exactamente los escaneos empleados para la obtención de cada una de las medias de los mapas de β_{att} . En las dos últimas filas se indica el número de escaneos empleados y el porcentaje que estos suponen respecto al total de días del mes.

| | MARZO | | | | | ABRIL | | | | | MAYO | | | | | JUNIO | | | | |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 06:00 | 09:00 | 12:00 | 15:00 | 18:00 | 06:00 | 09:00 | 12:00 | 15:00 | 18:00 | 06:00 | 09:00 | 12:00 | 15:00 | 18:00 | 06:00 | 09:00 | 12:00 | 15:00 | 18:00 |
| 01 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 02 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 03 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 04 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 05 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 06 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 07 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 08 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 09 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 10 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 11 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 12 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 13 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 14 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 15 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 16 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 17 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 18 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 19 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 20 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 21 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 22 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 23 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 24 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 25 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 26 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 27 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 28 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 29 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 30 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 31 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 19 | 19 | 16 | 21 | 20 | 22 | 24 | 25 | 26 | 24 | 17 | 13 | 22 | 14 | 18 | 17 | 16 | 25 | 23 | 15 |
| % | 61 | 61 | 52 | 68 | 65 | 73 | 80 | 83 | 87 | 80 | 55 | 42 | 71 | 48 | 58 | 57 | 53 | 83 | 77 | 50 |

Tabla 4. Días seleccionados (en marrón) y descartados (en blanco) para la elaboración de mapas de presencia de contaminantes mensuales. Los escaneos descartados se corresponden con aquellas mediciones saturadas por la una alta presencia de nubes. En la penúltima y última fila se indica el número de escaneos y el porcentaje respecto al total de días del mes, respectivamente, empleados para la realización de cada figura.

Para que la selección de escaneos sin nubes fuera inequívoca, cada uno de ellos se complementa con un gráfico de serie temporal de perfiles verticales de señal corregida de rango (RCS, del inglés *range corrected signal*) tomada con un ceilómetro de manera automática 24 h al día. Esta magnitud, evaluada mediante el ceilómetro apenas en la dirección vertical, nos informa de la presencia de partículas de aerosol y nubes que hay en la atmosfera, por lo que las áreas blancas (señal saturada) que son visibles en algunas de las figuras nos informan de la presencia de nubes (muy alta capacidad de retrodispersión). Por ejemplo, del día 19 de abril de 2023 (Fig. 13-a) no se puede tomar ninguno de los escaneos DL para la obtención de los escaneos mensuales, pues se observa un día bastante nuboso; mientras que, del día 14 de mayo (Fig. 13-b) se podrían tomar los escaneos correspondientes a las 06:00 y 09:00 horas, pero no los correspondientes al resto de horas escaneadas (12:00, 15:00 y 18:00) de ese mismo día. Del día 26 de junio (Fig. 13-c), por otro lado, se podrían tomar los todos los escaneos. Han sido entre cinco y quince los escaneos desechados para cada una de las figuras realizadas, todos ellos por presentar grandes zonas nubosas que daría lugar a mal interpretaciones de los mapas mensuales generados.

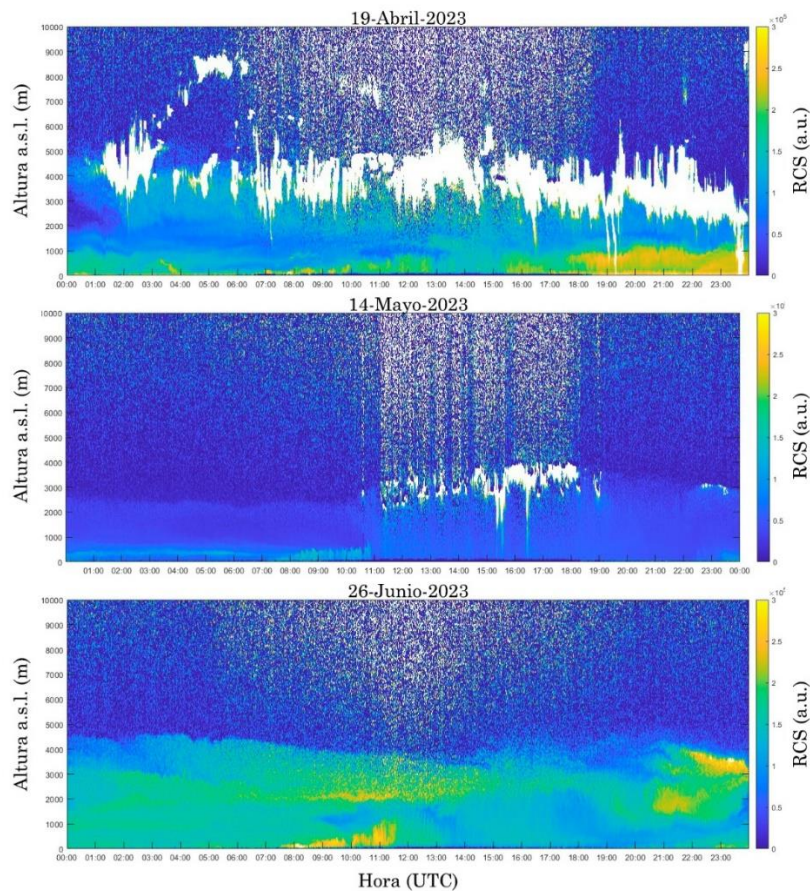


Figura 13. Ejemplo de series temporales de perfiles verticales de señal corregida de rango (obtenidos mediante un ceilómetro) con los que se comparan los escaneos para la comprobación de su validez en la realización de medias.

HORA 06:00 (UTC)

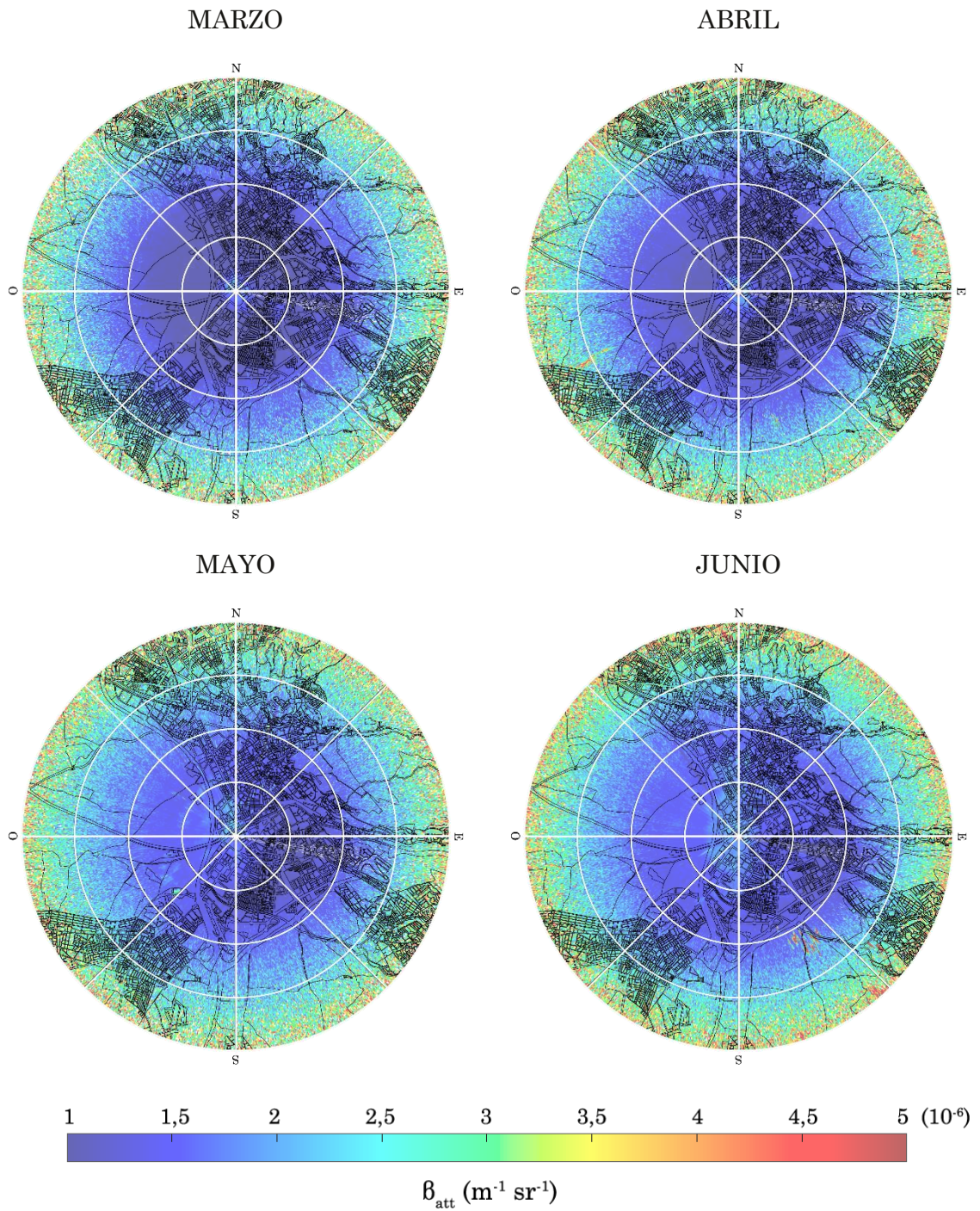


Figura 14. Mapas mensuales para las 06:00 (UTC) en las que se muestra la distribución horizontal de las partículas de aerosol atmosférico sobre la ciudad de Granada a través de β_{att} . En el centro de cada escaneo, de 8 km de diámetro, se sitúa el IISTA-CEAMA.

HORA 09:00 (UTC)

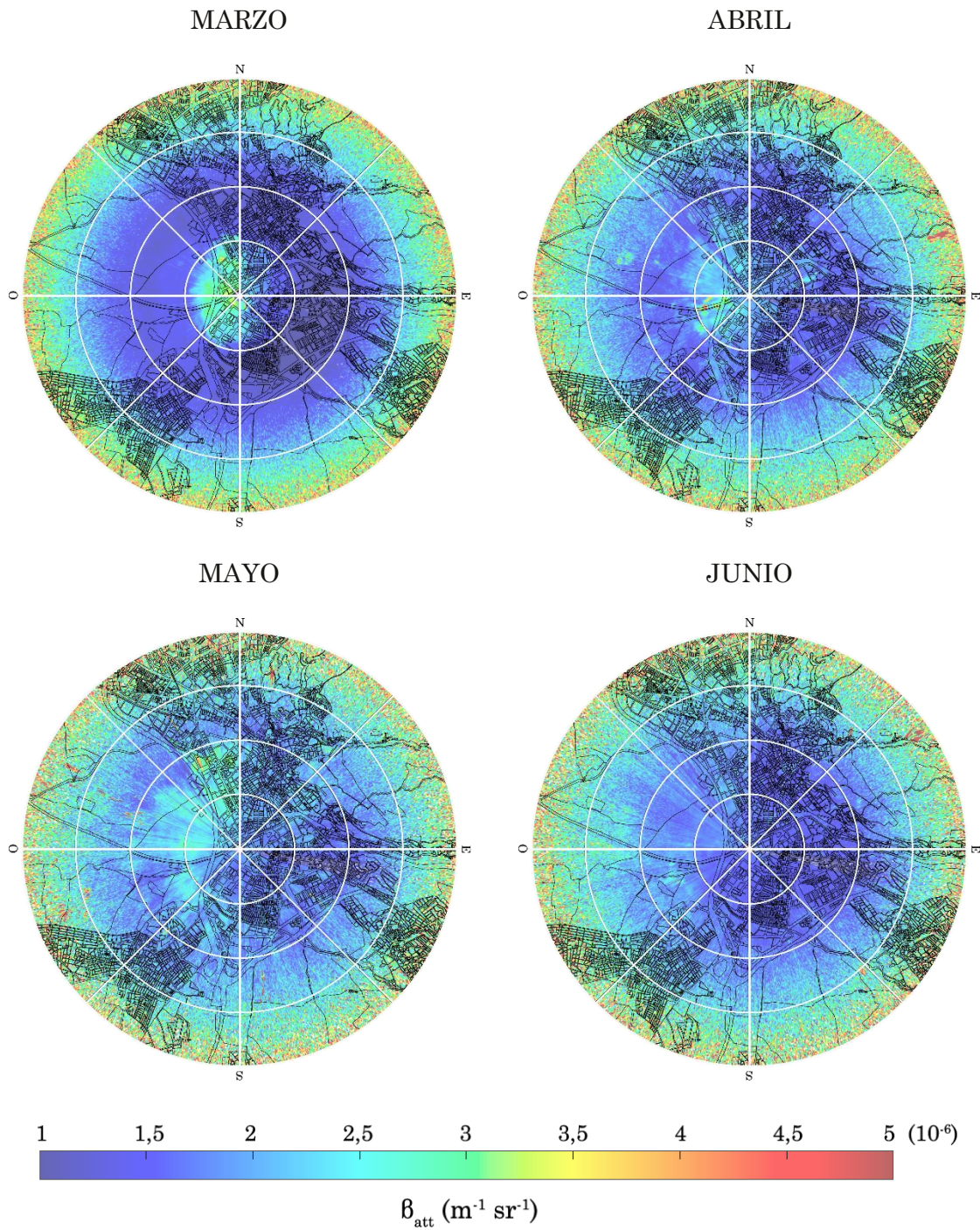


Figura 15. Mapas mensuales para las 09:00 (UTC) en las que se muestra la distribución horizontal de las partículas de aerosol atmosférico sobre la ciudad de Granada a través de β_{att} . En el centro de cada escaneo, de 8 km de diámetro, se sitúa el IISTA-CEAMA.

HORA 12:00 (UTC)

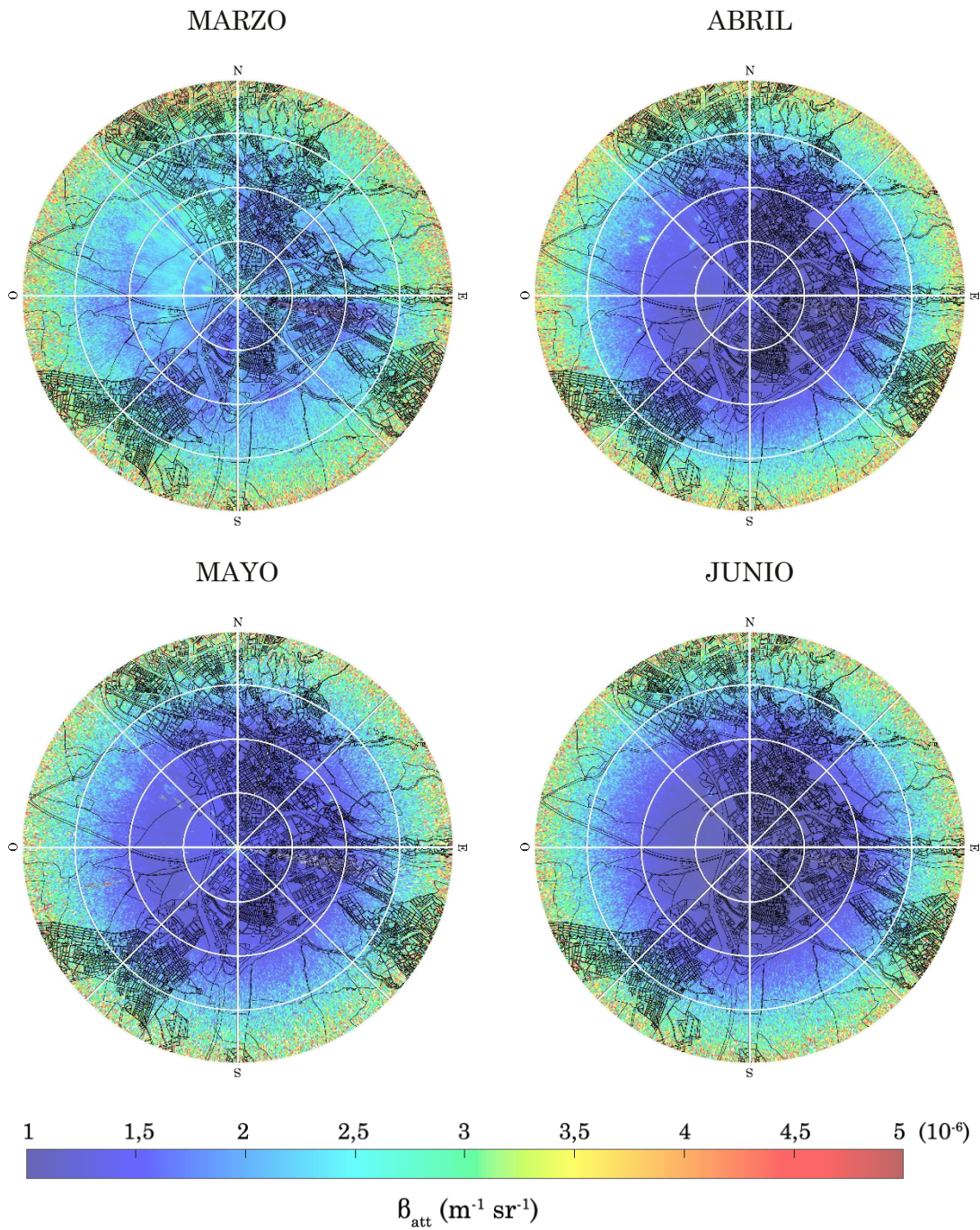


Figura 16. Mapas mensuales para las 12:00 (UTC) en las que se muestra la distribución horizontal de las partículas de aerosol atmosférico sobre la ciudad de Granada a través de β_{att} . En el centro de cada escaneo, de 8 km de diámetro, se sitúa el IISTA-CEAMA.

HORA 15:00 (UTC)

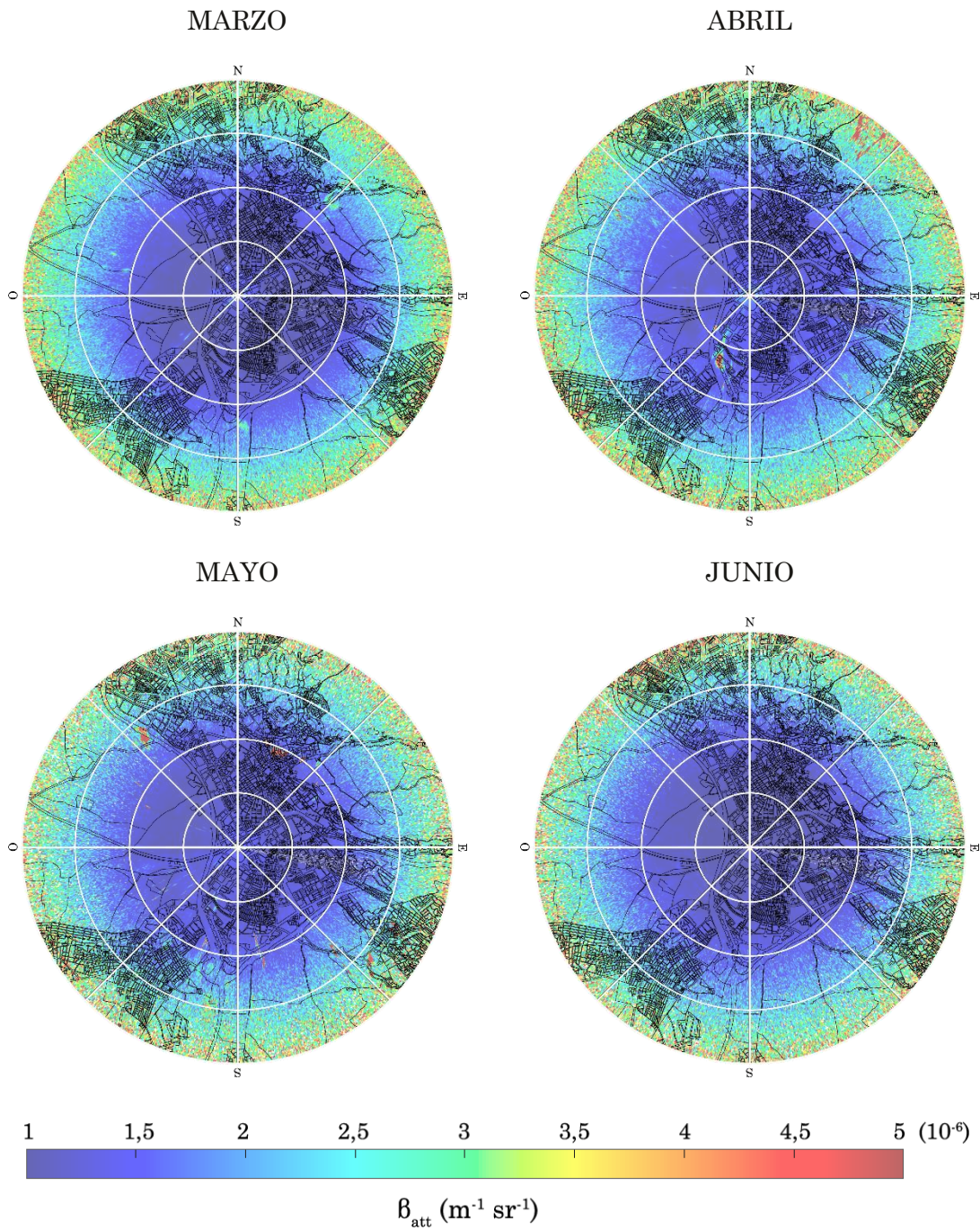


Figura 17. Mapas mensuales para las 15:00 (UTC) en las que se muestra la distribución horizontal de las partículas de aerosol atmosférico sobre la ciudad de Granada a través de β_{att} . En el centro de cada escaneo, de 8 km de diámetro, se sitúa el IISTA-CEAMA.

HORA 18:00 (UTC)

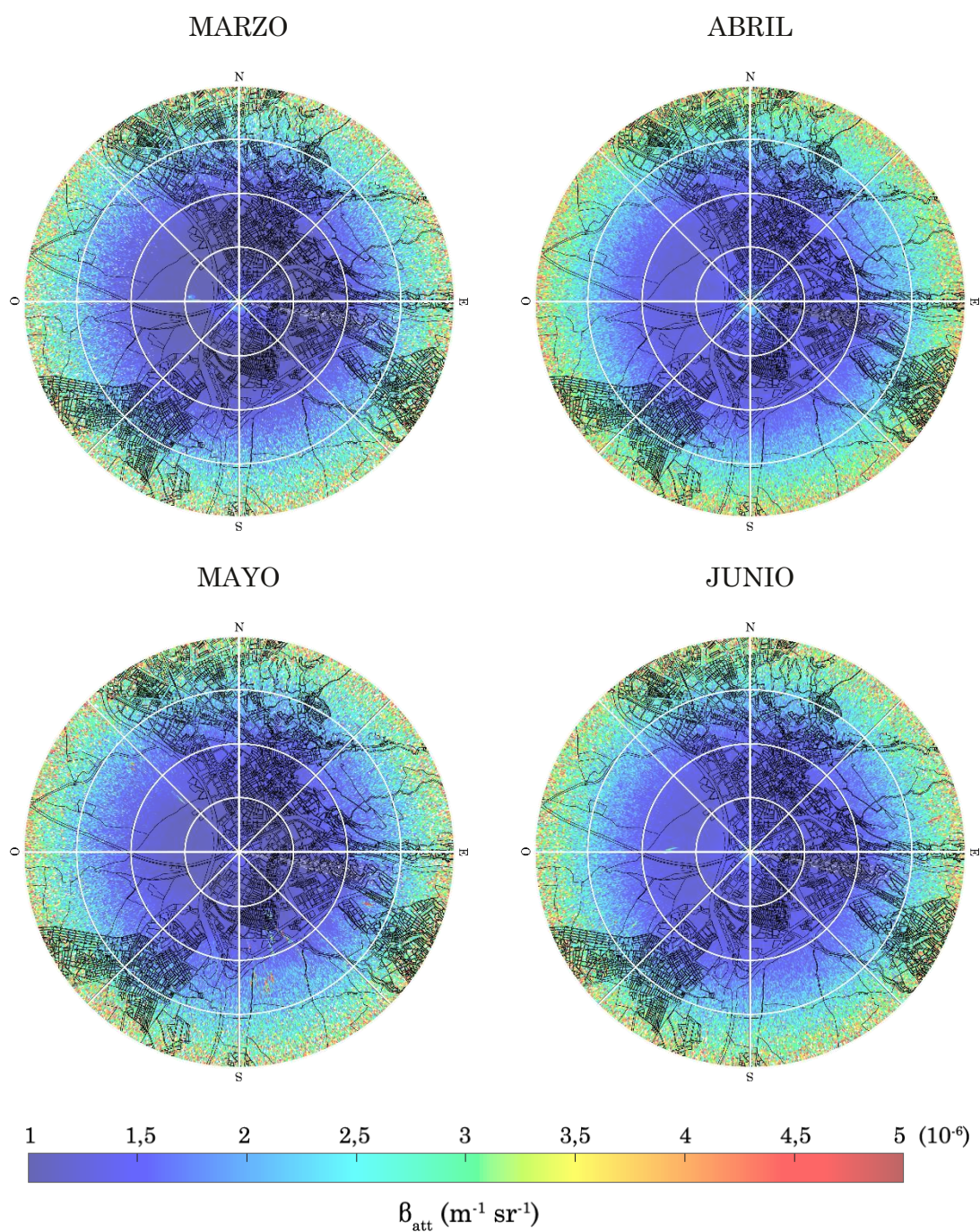


Figura 18. Mapas mensuales para las 18:00 (UTC) en las que se muestra la distribución horizontal de las partículas de aerosol atmosférico sobre la ciudad de Granada a través de β_{att} . En el centro de cada escaneo, de 8 km de diámetro, se sitúa el IISTA-CEAMA.

En las figuras 14, 15, 16, 17 y 18 se muestran los mapas medios mensuales de distribución de contaminantes. De éstas podemos extraer que la hora que presenta mayores concentraciones de partículas de aerosol atmosférico es a las 09:00 horas UTC, por regla general, en los cuatro meses estudiados. Eso concuerda con lo observado en las tres estaciones de calidad del aire, cuyas series temporales diarias presentaban picos entre las 09:00 y las 10:00 horas. También destaca, por encima de las medias realizadas a la misma hora en el resto de los meses, el mapa de color obtenido a las 12:00 horas del mes de marzo, que presenta una concentración relativamente homogénea de $2,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^{-1} \text{ sr}^{-1}$ en gran parte del área estudiada, mientras que en los demás meses no parece superar de $1,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^{-1} \text{ sr}^{-1}$. Las horas que muestran mapas con menor variabilidad horizontal son las 06:00 y las 18:00, en los que los valores son prácticamente los mismos a lo largo de los cuatro meses analizados, mientras que los mapas correspondientes a las 12:00 y a las 15:00 presentan zonas puntuales en las que los valores de β_{att} obtenidos llegan a superar los $3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^{-1} \text{ sr}^{-1}$. Es destacable que, mientras que en los mapas de las 09:00 se puede observar una mayor homogeneidad en la distribución del material particulado detectado, los mapas correspondientes a las 12:00 y a las 15:00 presentan un menor número de zonas contaminadas, pero éstas con un mayor valor de β_{att} . Por otro lado, si comparamos las mismas horas a través de los meses, podemos observar que las dos figuras que presentan mayores valores de β_{att} son las correspondientes a abril y mayo, en comparación con las de marzo y junio. Esto se podría deber, en parte, a la época de floración de ciertas especies vegetales que conforman el inventario del arbolado urbano de la ciudad, las cuales emiten a la atmósfera esporas y polen captados por el DL.

Retomando la Figura 1 presentada al inicio de este trabajo, se decide superponer todas las figuras obtenidas, esta vez las correspondientes a cada uno de los escaneos tomados por el DL, con el plano de la ciudad. De esta manera, en la Figura 19 se identifican todas aquellas zonas en las que los valores de β_{att} superan, en más de tres ocasiones, los $4 \cdot 10^{-6} \text{ m}^{-1} \text{ sr}^{-1}$, consiguiendo así un plano en el que se muestran los puntos más delicados del tejido urbano, aquellos con tendencia a registrar grandes cantidades de material particulado. Como podemos observar, estos *puntos calientes* suelen coincidir con salidas de la Circunvalación GR-30 hacia el núcleo urbano, como lo son la Salida 12, hacia Méndez Núñez, o la Salida 15, que conecta la Circunvalación con el núcleo urbano de Armilla, con el Parque Tecnológico de la Salud, con el Parque de las Ciencias y con el Palacio de Congresos. De igual manera también se identifican numerosos *puntos calientes* sobre parques urbanos: Parque de las Alquerías, Federico García Lorca, Tico Medina,

Rogelio Macías, Baden Powell, Jardines del Paseo del Salón y de la Bomba, entre otros. Esto refuerza la idea de que la vegetación situada en los parques y jardines pertenecientes al núcleo urbano consolidado también conforma una fuente activa de emisión de partículas de bioaerosol a la atmósfera nada despreciable.



Figura 19. Puntos calientes de material particulado obtenidos a partir de la superposición de los mapas horizontales de β_{att} con el plano de la ciudad. Se marca con cruces aquellos puntos en los que aparecen valores de β_{att} mayores de $4 \cdot 10^{-6} \text{ m}^{-1} \text{ sr}^{-1}$ en un mínimo de tres ocasiones.

5.3. RELACIÓN PM_{10} - β_{att}

En este estudio también se trató de obtener la relación existente entre la concentración de partículas de aerosol PM_{10} presente en una porción del aire atmosférico y β_{att} en puntos coincidentes, con el fin de generar un modelo para obtener mapas horizontales de PM_{10} a partir de escaneos de DL. Para el cruce de datos, las concentraciones de PM_{10} obtenidas in situ en las tres estaciones de calidad del aire (de las que se conoce su ubicación exacta) han de ser

relacionadas con los valores de β_{att} , obtenidos de los escaneos horizontales realizados con el sistema DL, en esos mismos puntos.

Estos valores de β_{att} se obtuvieron con ayuda de una plataforma de programación y cálculo numérico, conociendo la distancia y el azimut entre cada una de las estaciones con respecto al punto de toma de datos, el IISTA-CEAMA. El azimut nos da información sobre el ángulo que se forma entre la dirección de 0° del barrido horizontal del aparato DL, en nuestro caso la dirección norte, y el punto de interés previsto en el mismo plano que la dirección de referencia. Una vez conocidos estos datos, presentados en la Tabla 4, se puede calcular con facilidad los valores de β_{att} en los puntos en los que se ubican las estaciones de calidad del aire. Para realizar el cálculo nos ayudamos de una calculadora geodésica (Instituto Geográfico Nacional, s. f.), que es capaz de proporcionar la distancia y el azimut entre un punto A y otro punto B a partir de la latitud y la longitud de cada uno de los puntos, expresados en el sistema de coordenadas ETRS89. Tras la obtención de datos, se debe realizar un cribado de los mismos, pues hay que recordar que la concentración de PM_{10} viene expresada de manera diaria en intervalos de 10 minutos, mientras que los escaneos con DL se realizan cada 3 horas.

| | COORDENADAS ($^\circ$) | | DISTANCIA (m) | AZIMUT ($^\circ$) |
|--------------------------|--------------------------|------------|------------------|------------------------|
| | LATITUD | LONGITUD | | |
| IISTA-CEAMA | 37,1637628 | -3,6051971 | - | - |
| Ciudad Deportiva | 37,1356147 | -3,6191409 | 3.360,52 | 201,634150 |
| Palacio Congresos | 37,1655999 | -3,6000515 | 500,44 | 65,956570 |
| Granada Norte | 37,196189 | -3,6124778 | 3.656,31 | 349,817166 |

Tabla 5. Datos geodésicos para la obtención de β_{att} en las tres estaciones de calidad del aire. Elaboración propia.

Debido a la corrección del ruido de fondo, en las estaciones más alejadas al IISTA-CEAMA, como lo son Ciudad Deportiva y Granada Norte, se pierde parte de la información referente a β_{att} , obteniendo así un total de 241 datos para correlacionar en Ciudad Deportiva, 1001 en Palacio de Congresos y 209 en Granada Norte. Es por ello que se decide explorar también, en lugar del valor de β_{att} coincidente exactamente con las coordenadas de las estaciones, el valor medio de un área de 3×3 píxeles cuyo pixel central coincida con la ubicación de cada estación. De esa manera se obtienen, finalmente, un total de 849 datos para correlacionar en Ciudad Deportiva, 951 en Palacio de Congresos y 824 en Granada Norte.

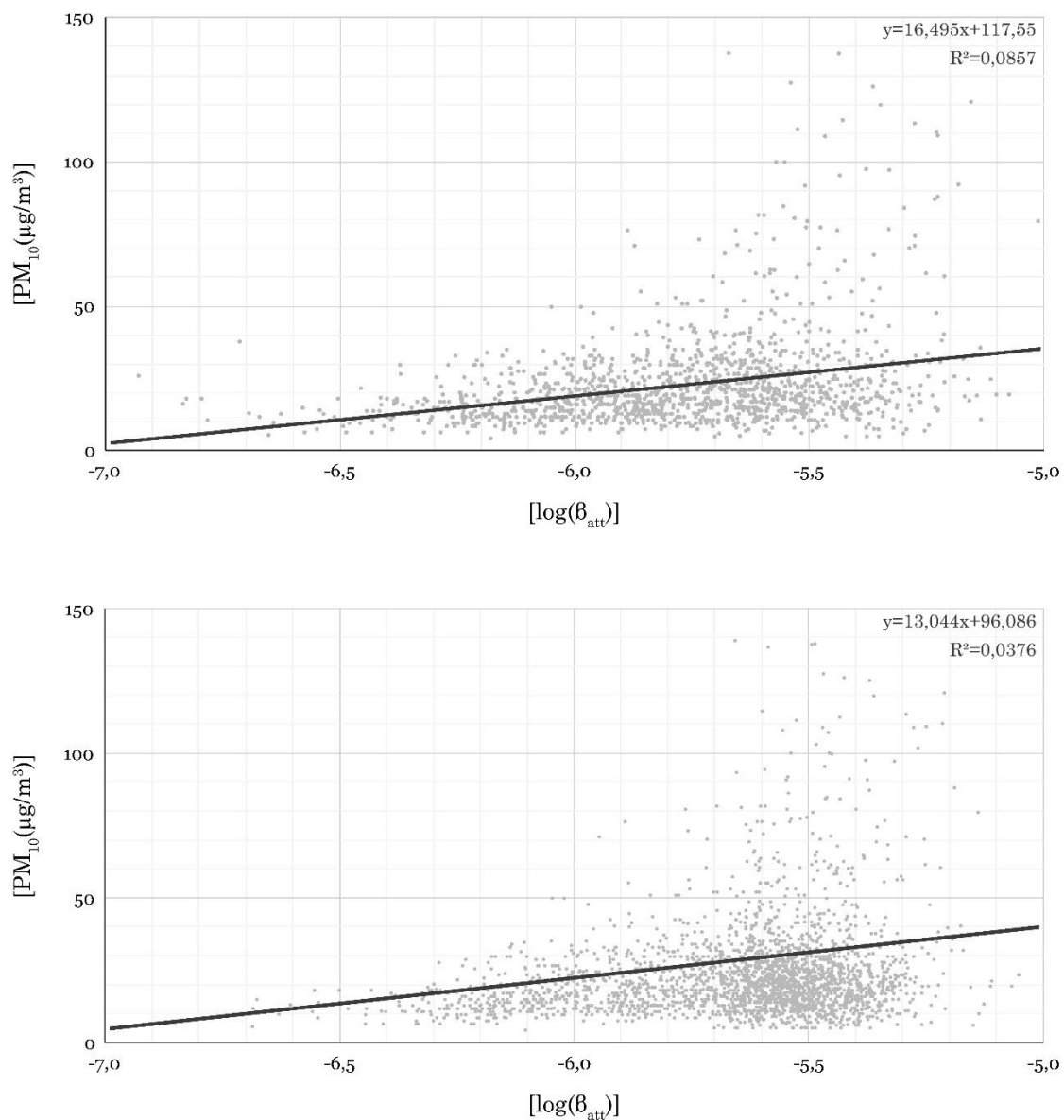


Figura 20. Arriba - Retrodispersión atenuada del DL frente a la concentración de PM_{10} medida in situ, tomando el valor de las coordenadas exactas del píxel donde se ubica cada estación. 1451 datos coincidentes entre el 1 de marzo y el 30 de junio del 2023. Abajo - Misma figura, pero tomando el valor medio de un área de 3×3 píxeles con centro en las coordenadas de cada estación. 2615 conjuntos de datos obtenidos entre el 1 de marzo y el 30 de junio del 2023.

La Figura 20 muestra los gráficos de dispersión $PM_{10}-\beta_{att}$ para la base de datos combinada de las tres estaciones de medida. La relación $PM_{10}-\beta_{att}$ presentan un coeficiente de correlación de Pearson de 0,0857 para la toma de datos en un solo píxel y de 0,0376 para el promedio de 3×3 píxeles. Ambos valores son prácticamente nulos, por lo que se concluye que no existe una relación lineal clara entre ambos. Sin embargo, sí se aprecia que a mayores valores de β_{att} , mayores son las concentraciones de PM_{10} que aparecen. En la

Tabla 6 se presentan las ecuaciones pertenecientes a las líneas de tendencia obtenidas y el valor R^2 tanto de cada estación por separado como todos los datos mezclados, que serían los correspondientes a las gráficas mostradas con anterioridad en la Figura 20.

| ESTACIÓN | DIST (m) | DATOS | ECUACIÓN | R^2 |
|--------------------------------|-----------|-------|---------------------------|--------|
| PÍXEL EXACTO | | | | |
| Palacio de Congresos | 500,443 | 1001 | $f(x) = 22,037x + 151,5$ | 0,1819 |
| Ciudad Deportiva | 3.360,523 | 241 | $f(x) = 9,3285x + 80,822$ | 0,0040 |
| Granada Norte | 3.656,309 | 209 | $f(x) = 2,2184x + 35,458$ | 0,0003 |
| Combinado | - | 1451 | $f(x) = 16,495x + 117,55$ | 0,0857 |
| PROMEDIO DE 3×3 PÍXELES | | | | |
| Palacio de Congresos | 500,443 | 951 | $f(x) = 24,34x + 164,37$ | 0,1886 |
| Ciudad Deportiva | 3.360,523 | 849 | $f(x) = 8,8125x + 73,066$ | 0,0033 |
| Granada Norte | 3.656,309 | 824 | $f(x) = 5,0782x + 49,459$ | 0,0016 |
| Combinado | - | 2615 | $f(x) = 13,044x + 96,086$ | 0,0376 |

Tabla 6. Ecuaciones pertenecientes a las líneas de tendencia obtenidas y el valor R^2 , tanto de cada estación por separado como todos los datos mezclados, para la toma de datos en el píxel exacto y en un área de 3×3 píxeles. La columna perteneciente a DATOS hace referencia a la cantidad de datos $PM_{10}-\beta_{att}$ que se han podido relacionar.

A partir de este análisis no se obtiene una correlación apropiada que nos permita generar valores de PM_{10} a partir de β_{att} para ninguno de los casos estudiados. El estudio previo de Münkler et al. (2006) ofrece una relación entre PM_{10} y β_{att} empleando medidas de un ceilómetro en lugar de DL. Se debe destacar que la geometría de medición es diferente de la planteada en este TFG, donde un ceilómetro estuvo apuntando en la vertical y se realizó el estudio de correlación con información muy cercana al instrumento (en un rango de, apenas, entre 0 y 30 m, por lo que en esas circunstancias β_{att} es muy parecido al coeficiente de retrodispersión sin atenuar), obteniendo un coeficiente de correlación de Pearson muy superior (valor de 0,8351). Gracias a ello pudieron obtener una línea de tendencia $f(x) = 2023 \cdot 10^7x - 1.6304$ que definía de manera bastante acertada la correlación $PM_{10}-\beta_{att}$. En nuestro caso, la distancia entre el instrumento y el píxel es mayor, tal y como se indica en la Tabla 6, por lo que el efecto de atenuación debido a la transmitancia atmosférica entre esos dos puntos juega un papel mucho más importante (no es despreciable) y es necesario descontarlo.

6. CONCLUSIONES

En este trabajo se han estudiado, de manera simultánea, la concentración de cinco contaminantes no biogénicos (CO, NO, NO₂, SO₂ y PM₁₀) en tres estaciones de calidad del aire situadas en los núcleos urbanos de Granada y Armilla, además de la distribución horizontal del material particulado del aire atmosférico, a través de β_{att} , obtenido con ayuda de un aparato DL situado en la azotea del IISTA-CEAMA. Las concentraciones de contaminantes no biogénicos con las que se trabaja fueron tomadas en el periodo comprendido entre enero y julio de 2023, mientras que los escaneos realizados con el DL empleados se corresponden al periodo comprendido entre marzo y junio de ese mismo año. Aparte de haber estudiado de manera individual tanto las concentraciones como la distribución horizontal de los contaminantes, ambos datos se han podido cruzar para el periodo comprendido entre marzo y junio. Por tanto, las conclusiones obtenidas con este estudio se exponen a continuación:

- Las técnicas de teledetección activa e in situ son útiles para el estudio de la variabilidad espacio-temporal de la presencia de partículas y para la caracterización de las mismas. De igual modo, la metodología empleada proporciona información para la mejora de la calidad del aire urbano y, por ende, sobre su impacto en la salud humana y de los ecosistemas, al identificar *puntos calientes* de contaminación en la zona analizada.
- La mala calidad del aire registrada, pese a encontrarse normalmente por debajo de los valores límite legislados, se postula en la ciudad de Granada como una de los principales riesgos para la salud de sus ciudadanos. Podemos catalogar entre los contaminantes más problemáticos a los óxidos de nitrógeno (NO y NO₂) y al material particulado (PM₁₀ únicamente, pues el PM_{2,5} no se trata en este estudio). El NO_x registra en la estación de calidad del aire de Granada Norte valores perjudiciales, tanto para la salud humana como para la protección de ecosistemas. El PM₁₀ registra valores críticos (promediados cada 24 h, tal y como indica la norma) en 18 ocasiones en la estación de Ciudad Deportiva, en 10 ocasiones en Palacio de Congresos y en 11 ocasiones en Granada Norte.
- El estudio de la distribución horizontal de los contaminantes a través de β_{att} nos indica que las zonas con mayor concentración de partículas de aerosol atmosférico coinciden con el flanco oeste de la ciudad, donde se produce el encuentro entre la ciudad consolidada y la vega granadina, ambas separadas por la Circunvalación GR-30, como consecuencia de que el tráfico rodado es una de las principales fuentes de emisión de material particulado a la atmósfera. Otras fuentes de partículas de aerosol son los suelos y las esporas y pólenes procedentes de la vegetación, lo que

refuerza el hecho de que también aparezcan *puntos calientes* de material particulado en torno a parques y jardines urbanos en la zona analizada.

- Mediante la metodología empleada, no se ha podido encontrar una clara relación PM_{10} - β_{att} . El cálculo del coeficiente de retrodispersión sin atenuar a partir de β_{att} es un asunto que aún hoy en día está investigando la comunidad científica y que cae fuera de los objetivos de este TFG. Por tanto, este TFG ha sido un avance importante para demostrar la necesidad de investigar más en esta línea para generar mapas de concentración de PM_{10} a partir de DL.

BIBLIOGRAFÍA

Álvarez Monedero, B. (2022). *Análisis de la distribución de polen en el sur de la Península Ibérica mediante técnicas in situ aerobiológicas, modelización y teledetección*. Universidad de Granada, 2022.

Andreae, M., & Rosenfeld, D. (2008). Aerosol–cloud–precipitation interactions. Part 1. The nature and sources of cloud-active aerosols. *Earth-science Reviews*, 89(1-2), 13-41. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2008.03.001>

Andújar Maqueda, J. (2020). *Estudio de la estructura de la capa límite atmosférica en un entorno rural mediante lidar Doppler*. Universidad de Granada, 2020.

Arya, S. P. (2001) *Introduction to Micrometeorology*. Academic Press, San Diego, 415 p.

Ayuntamiento de Granada (2004, 9 febrero). *Parques de Granada: Jardines del Violón*. <http://www.granada.org/inet/warboles.nsf/xtod/ECA89590076B3052C1256E35007B9CBF>

Baars, H., Ansmann, A., Ohneiser, K., Haarig, M., Engelmann, R., Althausen, D., Hanssen, I., Gausa, M., Pietruczuk, A., Szkop, A., Stachlewska, I. S., Wang, D., Reichardt, J., Skupin, A., Mattis, I., Trickl, T., Vogelmann, H., Navas-Guzmán, F., Haeefe, A., ... Pappalardo, G. (2019). The unprecedented 2017–2018 stratospheric smoke event: decay phase and aerosol properties observed with the EARLINET. *Atmospheric Chemistry And Physics*, 19(23), 15183-15198. <https://doi.org/10.5194/acp-19-15183-2019>

Cariñanos, P., Casares-Porcel, M., & Quesada-Rubio, J. (2014). Estimating the allergenic potential of urban green spaces: A case-study in Granada, Spain. *Landscape And Urban Planning*, 123, 134-144. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2013.12.009>

Cariñanos, P., Foyo-Moreno, I., Alados, I., Guerrero-Rascado, J. L., Ruiz-Peñuela, S., Titos, G., Cazorla, A., Alados-Arboledas, L., & De la Guardia, C. D. (2021). Bioaerosols in urban environments: Trends and interactions with pollutants and meteorological variables based on quasi-climatological series. *Journal Of Environmental Management*, 282, 111963. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.111963>

Cariñanos, P., Guerrero-Rascado, J. L., Valle, A. M., Cazorla, A., Titos, G., Foyo-Moreno, I., Alados-Arboledas, L., & De La Guardia, C. D. (2022). Assessing pollen extreme events over a Mediterranean site: Role of local surface meteorology. *Atmospheric Environment*, 272, 118928. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118928>

Casquero-Vera, J. A. (2021). *Black carbon and fine aerosol particles characterization at different environmental conditions in the Southeast of the Iberian Peninsula*. Universidad de Granada. <http://hdl.handle.net/10481/69643>

Casquero-Vera, J. A., Titos Vela, G., Alados Arboledas, L., (2016). *Diagnóstico de la Calidad del Aire del Área Metropolitana de Granada*. Granada, España.

Cazorla, A., Casquero-Vera, J. A., Román, R., Guerrero-Rascado, J. L., Toledano, C., Cachorro, V. E., Orza, J. A. G., Cancillo, M. L., Serrano, A., Titos, G., Pandolfi, M., Alastuey, A., Hanrieder, N., & Alados-Arboledas, L. (2017). Near-real-time processing of a ceilometer network assisted with sun-photometer data: monitoring a dust outbreak over the Iberian Peninsula. *Atmospheric Chemistry And Physics*, 17(19), 11861-11876. <https://doi.org/10.5194/acp-17-11861-2017>

Cerrada Pérez, B. (2020). *Los espacios verdes urbanos y su contribución a la composición y condiciones atmosféricas de la ciudad de Granada*. Universidad de Granada, 2020.

Comisión Europea, Dirección General de Medio Ambiente, (2014). *Construir una infraestructura verde para Europa*, Oficina de Publicaciones. <https://data.europa.eu/doi/10.2779/2738>

Conserjería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio (s. f.-a). *Red de Vigilancia y Control de la Calidad del Aire de Andalucía - Portal Ambiental de Andalucía*. Recuperado el 30 de abril del 2024 de <https://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/portal/areas-tematicas/atmosfera/la-calidad-del-aire/red-de-vigilancia-y-control-de-la-calidad-del-aire-de-andalucia>

Conserjería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio (s. f.-b). Localización de la *Red Automática de Calidad del Aire*. Recuperado el 30 de abril del 2024 de https://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/portal/landing-page-%C3%ADndice/-/asset_publisher/zX2ouZa4r1Rf/content/localizaci-c3-b3n-de-la-red-autom-c3-a1tica-de-calidad-del-aire/20151

da Silva, F. T., Reis Jr, N. C., Santos, J. M., Goulart, E. V., & de Alvarez, C. E. (2021). The impact of urban block typology on pollutant dispersion. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 210, 104524. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2021.104524>

Delgado-Capel, M., & Cariñanos, P. (2020). Towards a Standard Framework to Identify Green Infrastructure Key Elements in Dense Mediterranean Cities. *Forests*, 11(12), 1246. <https://doi.org/10.3390/f11121246>

Fernández, A. J., Sicard, M., Costa, M. J., Guerrero-Rascado, J. L., Gómez-Amo, J. L., Molero, F., Barragán, R., Basart, S., Bortoli, D., Bedoya-Velásquez, A. E., Utrillas, M. P., Salvador, P., Granados-Muñoz, M. J., Potes, M., Ortiz-Amezcu, P., Martínez-Lozano, J. A., Artíñano, B., Muñoz-Porcar, C., Salgado, R., . . . Pujadas, M. (2019). Extreme, wintertime Saharan dust intrusion in the Iberian Peninsula: Lidar monitoring and evaluation of dust forecast models during the February 2017 event. *Atmospheric Research*, 228, 223-241. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.06.007>

Finnigan, J. J. (2003). A Re-Evaluation of Long-Term Flux Measurement Techniques Part II: Coordinate Systems. *Boundary-layer Meteorology/Boundary - Layer Meteorology*, 113(1), 1-41. <https://doi.org/10.1023/b:boun.0000037348.64252.45>

Forster, P., Ramaswamy, V., Artaxo, P., Berntsen, T., Betts, R., Fahey, D. W., Haywood, J., Lean, J., Lowe, D. C., Myhre, G., Nganga, J., Prinn, R., Raga, G., Schulz, M., Van Dorland, R., Bodeker, G., Boucher, O., Collins, W., Conway, T., . . . Whorf, T. (2007). Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. En *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the 4th Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Vol. 141, pp. 129-234). <https://ci.nii.ac.jp/naid/20001245737>

Garratt, J. (1994). Review: the atmospheric boundary layer. *Earth-science Reviews*, 37(1-2), 89-134. [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(94\)90026-4](https://doi.org/10.1016/0012-8252(94)90026-4)

Gobierno de España, (2011). *Calidad del aire*. Efectos sobre la salud y los ecosistemas. Ministerio para la Transición ecológica y el reto demográfico. Recuperado el 21 de abril del 2020 de <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/calidad-del-aire/salud/>

Grindlay, A. L., Ochoa-Covarrubias, G., & Lizárraga, C. (2021). Sustainable Mobility and Urban Space Quality: The Case of Granada, Spain. *International Journal Of Transport Development And Integration*, 5(4), 309-326. <https://doi.org/10.2495/tdi-v5-n4-309-326>

Guerrero-Rascado, J. L., Olmo, F. J., Avilés-Rodríguez, I., Navas-Guzmán, F., Pérez-Ramírez, D., Lyamani, H., & Arboledas, L. A. (2009). Extreme Saharan dust event over the southern Iberian Peninsula in september 2007: active and passive remote sensing from surface and satellite. *Atmospheric Chemistry And Physics*, 9(21), 8453-8469. <https://doi.org/10.5194/acp-9-8453-2009>

Harvey, N. J., Hogan, R. J., & Dacre, H. F. (2013). A method to diagnose boundary-layer type using Doppler lidar. *Quarterly Journal Of The Royal Meteorological Society*, 139(676), 1681-1693. <https://doi.org/10.1002/qj.2068>

Instituto Geográfico Nacional (s. f.). Geoportal Oficial del Instituto Geográfico Nacional de España. <https://www.ign.es/web/ign/portal/calculadora-geodesica>

Kotthaus, S., Bravo-Aranda, J. A., Coen, M. C., Guerrero-Rascado, J. L., Costa, M. J., Cimini, D., O'Connor, E. J., Hervo, M., Alados-Arboledas, L., Jiménez-Portaz, M., Mona, L., Ruffieux, D., Illingworth, A., & Haefelin, M. (2023). Atmospheric boundary layer height from ground-based remote sensing: a review of capabilities and limitations. *Atmospheric Measurement Techniques*, 16(2), 433-479. <https://doi.org/10.5194/amt-16-433-2023>

Laj, P., Myhre, C. L., Riffault, V., Amiridis, V., Fuchs, H., Eleftheriadis, K., Petäjä, T., Salameh, T., Kivekäs, N., Juurola, E., Saponaro, G., Philippin, S., Cornacchia, C., Arboledas, L. A., Baars, H., Claude, A., De Mazière, M., Dils, B., Dufresne, M., . . . Vana, M. (2024). Aerosol, Clouds and Trace Gases Research Infrastructure – ACTRIS, the European research infrastructure supporting atmospheric science. *Bulletin Of The American Meteorological Society*. <https://doi.org/10.1175/bams-d-23-0064.1>

Lehner, M., & Rotach, M. (2018). Current Challenges in Understanding and Predicting Transport and Exchange in the Atmosphere over Mountainous Terrain. *Atmosphere*, 9(7), 276. <https://doi.org/10.3390/atmos9070276>

Lehning, M., Richner, H., & Kok, G. L. (1998). Transport of air pollutants from the boundary layer to the free troposphere over complex terrain. *Physics And Chemistry Of The Earth*, 23(5-6), 667-672. [https://doi.org/10.1016/s0079-1946\(98\)00108-6](https://doi.org/10.1016/s0079-1946(98)00108-6)

López-Cayuela, M., Córdoba-Jabonero, C., Bermejo-Pantaleón, D., Sicard, M., Salgueiro, V., Molero, F., Carvajal-Pérez, C. V., Granados-Muñoz, M. J., Comerón, A., Couto, F. T., Barragán, R., Zorzano, M. P., Bravo-Aranda, J. A., Muñoz-Porcar, C., Costa, M. J., Artíñano, B., Rodríguez-Gómez, A., Bortoli, D., Pujadas, M., ... Guerrero-Rascado, J. L. (2023). Vertical characterization of fine and coarse dust particles during an intense Saharan dust outbreak over the Iberian Peninsula in springtime 2021. *Atmospheric Chemistry And Physics*, 23(1), 143-161. <https://doi.org/10.5194/acp-23-143-2023>

Manninen, A. J., Marke, T., Tuononen, M., & O'Connor, E. J. (2018). Atmospheric boundary layer classification with Doppler LIDAR. *Journal Of Geophysical Research. Atmospheres*, 123(15), 8172-8189. <https://doi.org/10.1029/2017jd028169>

Manoli, G., Fatichi, S., Schlöpfer, M., Yu, K., Crowther, T. W., Meili, N., Burlando, P., Katul, G. G., & Bou-Zeid, E. (2019). Magnitude of urban heat islands largely explained by climate and population. *Nature*, 573(7772), 55-60. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1512-9>

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (s. f.). *Efectos en la salud y ecosistemas*. Recuperado el 22 de mayo del 2024 <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/calidad-del-aire/salud.html>

Münkel, C., Eresmaa, N., Räsänen, J., & Karppinen, A. (2006). Retrieval of mixing height and dust concentration with lidar ceilometer. *Boundary-layer Meteorology / Boundary - Layer Meteorology*, 124(1), 117-128. <https://doi.org/10.1007/s10546-006-9103-3>

Newsom, R., Shi, Y., & Krishnamurthy, R. Doppler (2010) Lidar (DLFPT). *Atmospheric Radiation Measurement (ARM) User Facility*. <https://doi.org/10.5439/1025185>

Observatorio de Sostenibilidad en España, (2011). Calidad del aire en las ciudades clave de sostenibilidad urbana, Observatorio de la Sostenibilidad en España. Universidad de Alcalá. Alcalá de Henares, Madrid, España.

Observatorio de Sostenibilidad. (2022, 23 enero). *Ciudades que más han mejorado su calidad del aire en España en 2021* [Resumen Ejecutivo].

Organización Mundial de la Salud. (2021a, 29 octubre). *Salud Urbana*. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/urban-health>

- Organización Mundial de la Salud. (2021b, septiembre 22). *Las nuevas Directrices mundiales de la OMS sobre la calidad del aire tienen como objetivo evitar millones de muertes debidas a la contaminación del aire*. <https://www.who.int/es/news/item/22-09-2021-new-who-global-air-quality-guidelines-aim-to-save-millions-of-lives-from-air-pollution>
- Ortiz-Amezcuca, P. (2019). *Atmospheric profiling based on aerosol and Doppler lidar*. Universidad de Granada, 2019. <http://hdl.handle.net/10481/57771>
- Ortiz-Amezcuca, P., Guerrero-Rascado, J. L., Granados-Muñoz, M. J., Benavent-Oltra, J. A., Böckmann, C., Samaras, S., Stachlewska, I. S., Janicka, L., Baars, H., Bohlmann, S., & Alados-Arboledas, L. (2017). Microphysical characterization of long-range transported biomass burning particles from North America at three EARLINET stations. *Atmospheric Chemistry And Physics*, 17(9), 5931-5946. <https://doi.org/10.5194/acp-17-5931-2017>
- Ouyang, X., Tang, L., Wei, X., & Li, Y. (2021). Spatial interaction between urbanization and ecosystem services in Chinese urban agglomerations. *Land Use Policy*, 109, 105587. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105587>
- Pope, C. A., III. (2002). Lung Cancer, Cardiopulmonary Mortality, and Long-term Exposure to Fine Particulate Air Pollution. *JAMA*, 287(9), 1132. <https://doi.org/10.1001/jama.287.9.1132>
- Ren, Y., Qu, Z., Du, Y., Xu, R., Ma, D., Yang, G., Shi, Y., Fan, X., Tani, A., Guo, P., Ge, Y., & Chang, J. (2017). Air quality and health effects of biogenic volatile organic compounds emissions from urban green spaces and the mitigation strategies. *Environmental Pollution*, 230, 849-861. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.06.049>
- Seibert, P. (2000). Review and intercomparison of operational methods for the determination of the mixing height. *Atmospheric Environment*, 34(7), 1001-1027. [https://doi.org/10.1016/s1352-2310\(99\)00349-0](https://doi.org/10.1016/s1352-2310(99)00349-0)
- Seinfeld, J. H., & Pandis, S. N. (2016). *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*. John Wiley & Sons.
- Sicard, M., Granados-Muñoz, M., Alados-Arboledas, L., Barragán, R., Bedoya-Velásquez, A., Benavent-Oltra, J., Bortoli, D., Comerón, A., Córdoba-Jabonero, C., Costa, M., Del Águila, A., Fernández, A., Guerrero-Rascado, J., Jorba, O., Molero, F., Muñoz-Porcar, C., Ortiz-Amezcuca, P., Papagiannopoulos, N., Potes, M., . . . Yela, M. (2019). Ground/space, passive/active remote sensing observations coupled with particle dispersion modelling to understand the inter-continental transport of wildfire smoke plumes. *Remote Sensing Of Environment*, 232, 111294. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111294>
- Sicard, M., Granados-Muñoz, M., Alados-Arboledas, L., Barragán, R., Bedoya-Velásquez, A., Benavent-Oltra, J., Bortoli, D., Comerón, A., Córdoba-Jabonero, C., Costa, M., Del Águila, A., Fernández, A., Guerrero-Rascado, J., Jorba, O., Molero, F., Muñoz-Porcar, C., Ortiz-Amezcuca, P., Papagiannopoulos, N., Potes, M., . . . Yela, M. (2019). Ground/space, passive/active remote sensing observations coupled with particle dispersion modelling to understand the inter-continental transport of wildfire smoke plumes. *Remote Sensing Of Environment*, 232, 111294. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111294>
- Sociedad Española de Alergología e Inmunología Clínica, SEAIC, (2017, 20 diciembre). *La contaminación es un factor clave en el aumento actual de las enfermedades alérgicas*. [Comunicado de prensa].
- Soldevilla, C. G. & Red Española de Aerobiología (2007). *Manual de calidad y gestión de la Red Española de Aerobiología*. Servicio de Publicaciones, Universidad de Córdoba. <https://books.google.es/books?id=bfGBXwAACAAJ>
- Stull, R. B. (1988). *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*. Springer Science & Business Media.

- Stull, R. B. (2006) *The Atmospheric Boundary Layer*. En J. M. Wallace (Ed.) *Atmospheric Science: An Introductory Survey* (pp. 375-376).
- Titos, G., Del Águila, A., Cazorla, A., Lyamani, H., Casquero-Vera, J., Colombi, C., Cuccia, E., Gianelle, V., Močnik, G., Alastuey, A., Olmo, F., & Alados-Arboledas, L. (2017). Spatial and temporal variability of carbonaceous aerosols: Assessing the impact of biomass burning in the urban environment. *Science Of The Total Environment*, 578, 613-625. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.11.007>
- Tudorie, C., Gielen, E., Vallés-Planells, M., & Galiana, F. (2019). Urban green indicators: a tool to estimate the sustainability of our cities. *International Journal Of Design & Nature And Ecodynamics*, 14(1), 19-29. <https://doi.org/10.2495/dne-v14-n1-19-29>
- Westbrook, C. D., Illingworth, A. J., O'Connor, E. J., & Hogan, R. J. (2010). Doppler lidar measurements of oriented planar ice crystals falling from supercooled and glaciated layer clouds. *Quarterly Journal Of The Royal Meteorological Society*, 136(646), 260-276. <https://doi.org/10.1002/qj.528>
- Yuan, J., Wu, Y., Shu, Z., Su, L., Tang, D., Yang, Y., Dong, J., Yu, S., Zhang, Z., & Xia, H. (2022). Real-Time Synchronous 3-D Detection of Air Pollution and Wind Using a Solo Coherent Doppler Wind Lidar. *Remote Sensing*, 14(12), 2809. <https://doi.org/10.3390/rs14122809>
- Zhang, X. Y., Wang, Y. Q., Lin, W. L., Zhang, Y. M., Zhang, X. C., Gong, S., Zhao, P., Yang, Y. Q., Wang, J. Z., Hou, Q., Zhang, X. L., Che, H. Z., Guo, J. P., & Li, Y. (2009). CHANGES OF ATMOSPHERIC COMPOSITION AND OPTICAL PROPERTIES OVER BEIJING—2008 Olympic Monitoring Campaign. *Bulletin Of The American Meteorological Society*, 90(11), 1633-1652. <https://doi.org/10.1175/2009bams2804.1>

ANEXO I. PLANO DE UBICACIÓN DE LAS TRES ESTACIONES DE CALIDAD DEL AIRE.

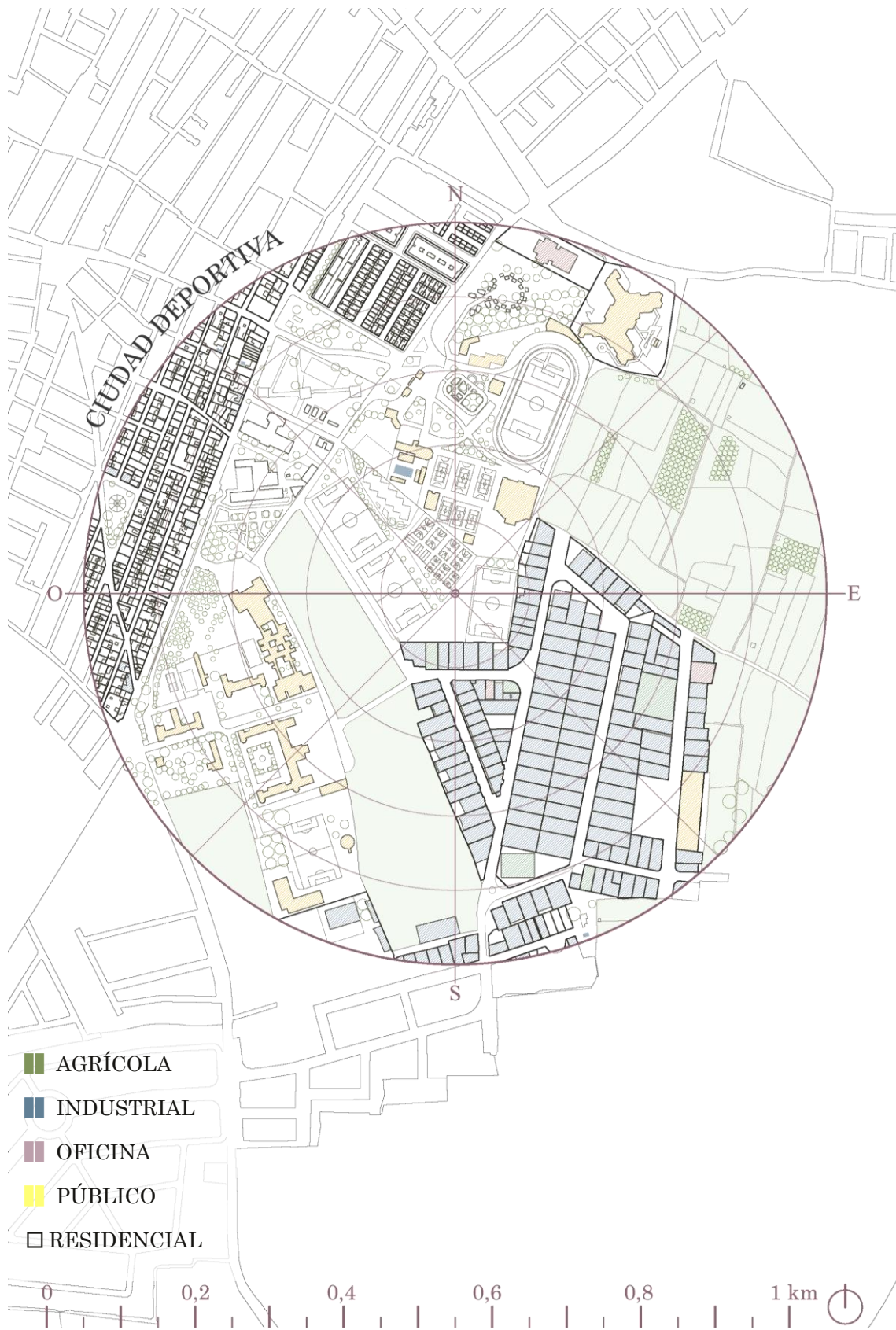


Figura A1.1. Entorno de la estación de calidad del aire de Ciudad Deportiva.

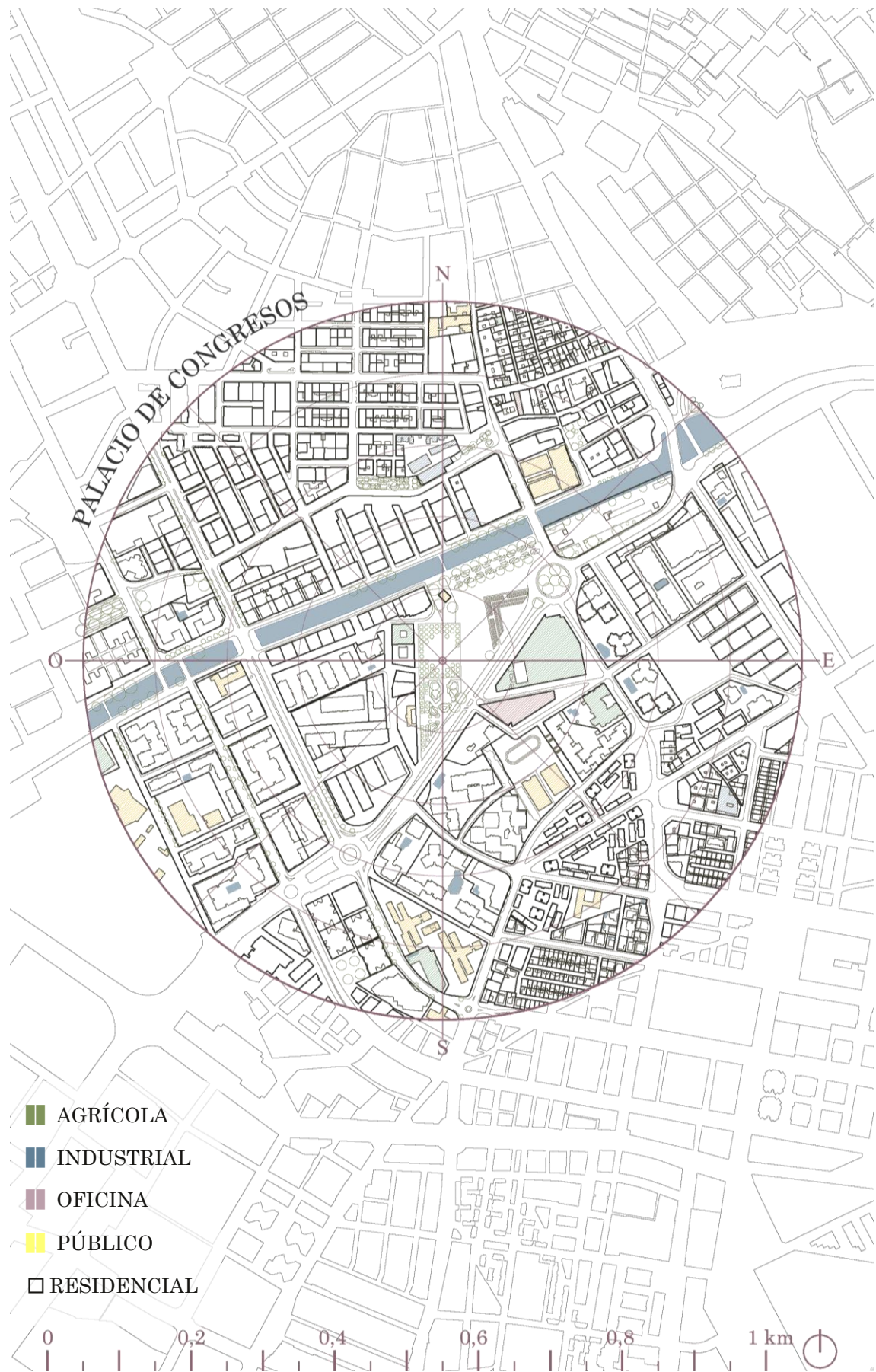


Figura A1.2. Plano del entorno de la estación de calidad del aire de Palacio de Congresos.

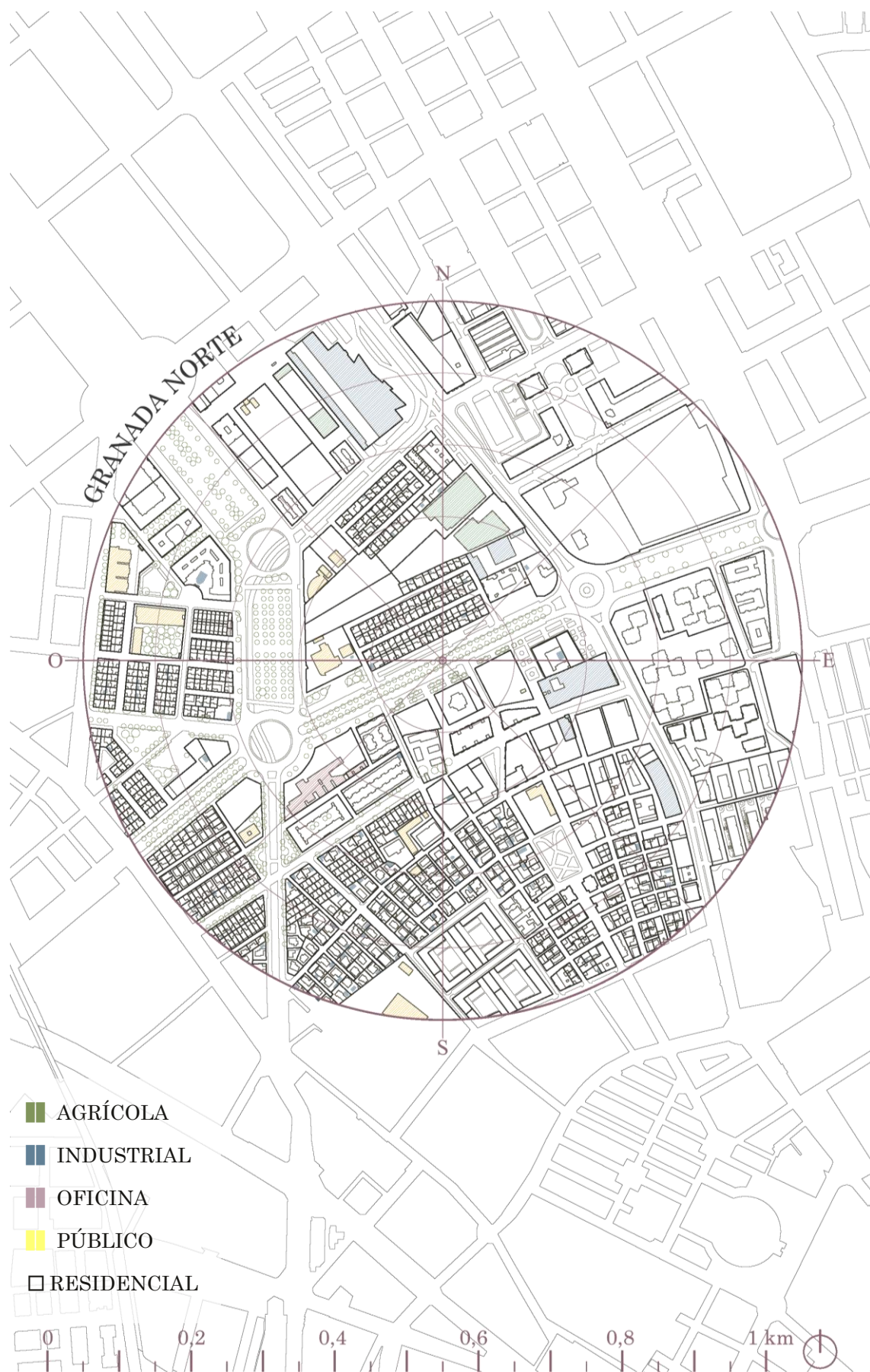


Figura A1.3. Plano del entorno de la estación de calidad del aire de Granada Norte.

ANEXO II. DESVIACIÓN ESTÁNDAR

En estadística descriptiva, la desviación estándar σ , también conocida como desviación típica, es una medida empleada para la cuantificación de la variación de un conjunto de datos numéricos. Su función principal es la de calcular la dispersión de los puntos de datos individuales respecto de la media.

Una baja desviación estándar indica que la mayor parte de los datos de la muestra tomada tienden a estar agrupados cerca de la media de los mismos; una desviación estándar alta implica que los datos se dilatan a lo largo de un mayor rango de valores.

La fórmula empleada para el cálculo de la desviación estándar es:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(X - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

Donde:

σ = Desviación estándar.

\bar{x} = Media aritmética.

El cálculo de la desviación estándar es especialmente útil si se quiere conocer la magnitud de la desigual repartición entre los valores del conjunto. Además, indica no sólo la dispersión de los datos, sino también su distribución desigual. Por ello, es útil para nuestro estudio debido a que nos da la posibilidad de conocer cómo de variables son los valores de las concentraciones de los contaminantes considerados cuando se investigan los patrones diarios de los mismos.

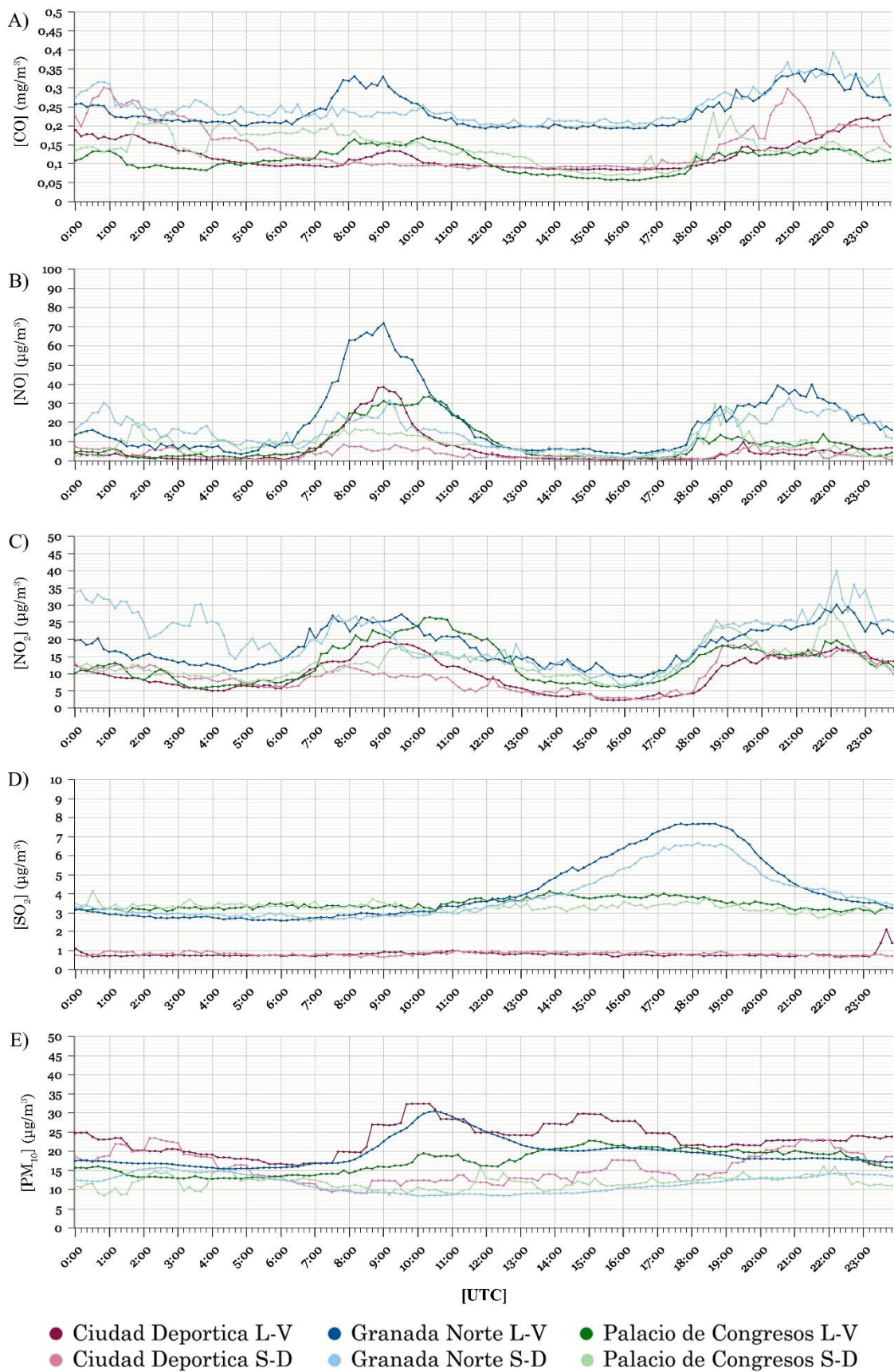


Figura A2. Desviación estándar de las concentraciones de CO (A), NO (B), NO₂ (C), SO₂ (D) y PM₁₀ (E).