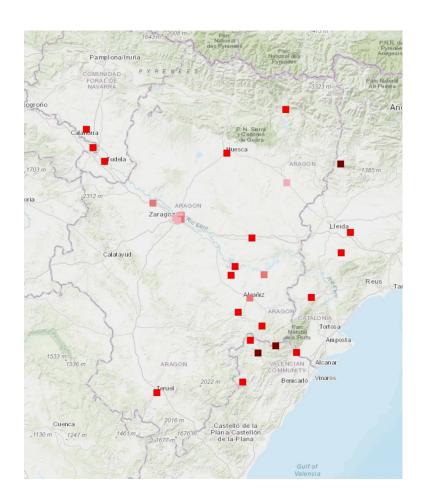
## ANÁLISIS DE SERIES TEMPORALES DE LOS CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS (NO, NO<sub>2</sub> Y O<sub>3</sub> EN LA COMUNIDAD AUTÓNOMA DE ARAGÓN. VARIABILIDAD TEMPORAL



Informe para la Dirección General de Cambio Climático y Educación Ambiental de Gobierno de Aragón



Diciembre 2021

## **Autores**

**Miguel Escudero Tellechea** (Departamento de Física Aplicada, Universidad de Zaragoza) mescu@unizar.es

**Jordi Massagué Obradors** (IDAEA-CSIC) *jordi.massague@idaea.csic.es* **Xavier Querol Carceller** (IDAEA-CSIC) *xavier.querol@idaea.csic.es* 

## Índice general

## Capítulo 1

## IINTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

## 1.1. Introducción

El ozono  $(O_3)$  en la troposfera es un contaminante secundario y un importante gas de efecto invernadero originado a partir de reacciones químicas entre sus precursores. Su producción, asociada a procesos de fotoxidación de compuestos orgánicos volátiles (COVs) en presencia de óxidos de nitrógeno (NO + NO2 = NOx), se ve reforzada en condiciones de fuerte radiación solar y altas temperaturas (Figura  $\ref{eq:totaleq:to$ 

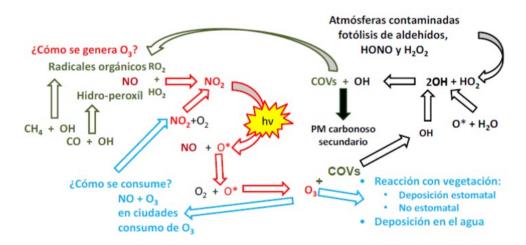


Figura 1.1: Procesos de generación y consumo de O<sub>3</sub>.

A escala global, aproximadamente el 90 % del  $O_3$  troposférico se produce foto-químicamente en la troposfera. El sumidero de  $O_3$  más importante a escala local y regional la titración de  $O_3$  por NO (NO +  $O_3 \rightarrow$  NO<sub>2</sub> +  $O_2$ ) y la ozonólisis de COVs pueden reducir marcada y temporalmente los niveles de  $O_3$ .

Los niveles de  $O_3$  varían significativamente dependiendo de los diferentes ambientes químicos atmosféricos y de los escenarios de transporte atmosférico y de transferencia vertical troposférica. En áreas contaminadas con  $NO_x$ , el NO favorece la destrucción de  $O_3$  y su producción está gobernada por los niveles de  $COV_s$  presentes. Estas condiciones son comúnmente referidas como COV-limitadas. En áreas rurales, la formación de  $O_3$  está normalmente gobernada por los niveles

de hidrocarburos presentes, especialmente COVs biogénicos (BCOVs) emitidos por la vegetación, por lo que ésta aumenta con el incremento de los niveles de  $NO_x$  (condiciones  $NO_x$ -limitadas).

Los niveles de O<sub>3</sub> tienden a ser bajos o moderados en áreas urbanas o industrializadas y más elevados en áreas rurales, hacia donde las masas de aire contaminadas son transportadas, y en donde las posibilidades de reacción con otros compuestos se reducen y el tiempo de residencia en la atmósfera aumenta. Las variaciones horarias, diarias y anuales de niveles de O<sub>3</sub> en un lugar determinado están determinadas pues por múltiples factores, incluyendo las características geográficas, las condiciones meteorológicas predominantes y la proximidad a grandes fuentes de precursores.

Debido a su naturaleza altamente oxidante, el O<sub>3</sub> produce efectos negativos sobre la salud humana, la vegetación y el medio construido. Los estudios epidemiológicos demuestran un impacto sobre la morbilidad y la mortalidad humanas con afectaciones en los aparatos respiratorio y cardiovascular. El O<sub>3</sub> provoca afectaciones tanto en exposiciones episódicas (altas concentraciones en periodos cortos de tiempo) como crónicas (niveles moderados a lo largo de periodos de tiempo prolongados). Por el momento, no se ha establecido un umbral de niveles de O<sub>3</sub> por debajo del cual no exista impacto negativo sobre la salud en la exposición a largo plazo.

Debido a los citados efectos sobre la salud, la Organización Mundial de la Salud (OMS) estableció en 2005 valores guía equivalentes a niveles máximos recomendados de  $O_3$  (100  $\mu$ g m<sup>-3</sup> como media móvil 8h). En Europa la Directiva 2008/50/CE, relativa a la calidad del aire ambiente y a una atmósfera más limpia en Europa, establece valores límite para un conjunto de contaminantes, y valores objetivo y objetivos a largo plazo para el  $O_3$  en particular (Tabla ??). Esta directiva ha sido transpuesta a la legislación española en el Real Decreto 102/2011, relativo a la mejora de la calidad del aire.

**Tabla 1.1:** Resumen de valores objetivo y umbrales definidos en la legislación para la protección a la salud humana.

Objetivos para la protección de la salud humana	Periodo promediado	Concentración O <sub>3</sub> (µg m <sup>-3</sup> )		
valor objetivo (VO)	Máximo diario de las medias octohorarias (8h) del día	120		
valor objetivo a largo plazo (VO)	Maximo diario de las medias octonorarias (811) del dia	120		
umbral de información (UI)	1 h	180		
umbral de alerta (UA)	1 h	240		

Las regiones del sur de Europa, especialmente la cuenca del Mediterráneo, son las más expuestas a la contaminación por O<sub>3</sub> en Europa, donde las condiciones meteorológicas predominantes en épocas cálidas del año, las características de su orografía y su vegetación, junto a una mayor incidencia solar, son favorables para la producción y acumulación de O<sub>3</sub>. Generalizadamente en España, se supera el objetivo a largo plazo para la protección de la salud. Una de las zonas donde esto sucede es en el valle del Ebro.

## 1.2. Objetivos

Los objetivos del presente estudio son:

1) Recopilación y análisis de calidad de datos de medidas en superficie de NO, NO<sub>2</sub> y O<sub>3</sub> de estaciones automáticas de calidad del aire en Aragón para un periodo de 12 años (2008-2019).

- II) Recopilación y análisis de calidad de datos de datos meteorológicos en la misma zona y periodo.
- III) Análisis de vientos dominantes en la zona de estudio.
- IV) Análisis de la variabilidad espacial de NO, NO<sub>2</sub> y O<sub>3</sub> en Aragón.
- v) Análisis detallado de series temporales históricas de medidas en superficie de NO, NO<sub>2</sub> y O<sub>3</sub> de estaciones automáticas de calidad del aire en Aragón y otras regiones lindantes para un periodo de 12 años (2008-2019).

Los principales hitos que se quieren conseguir con este trabajo son:

- Identificar las zonas con niveles de O<sub>3</sub> más elevados y de los patrones atmosféricos de circulación principales en las citadas zonas.
- II) Profundizar sobre la fenomenología de episodios de O<sub>3</sub> en las diferentes zonas de Aragón y en particular en valle del Ebro.
- III) Diferenciar, si fuera posible, aportes locales/regionales de los externos a la zona de estudio.
- Iv) Identificar episodios y parámetros clave para validar modelos que en un futuro permitan analizar los efectos de reducciones de precursores en los niveles de  $O_3$  de la zona de estudio con una incertidumbre aceptable.
- v) Obtener información para el diseño futuro de una campaña experimental de medida de ozono y otros compuestos fotoquímicos en Aragón.

## Capítulo 2

# METODOLOGÍA Y SELECCIÓN DE ESTACIONES

Para la selección de las estaciones para la evaluación se centra en el periodo de 12 años (2008-2019). Se pretende hacer una selección de estaciones automáticas de calidad del aire (CA) con datos en superficie de NO, NO<sub>2</sub> y O<sub>3</sub>, completada con otra selección de estaciones meteorológicas en el mismo periodo. Las estaciones de CA se seleccionan de las redes autonómicas de Gobierno de Aragón, Navarra, Catalunya y de la Comunidad Valenciana, de la red del Ayuntamiento de Zaragoza, de la red EMEP y de las redes privadas de las centrales térmicas de Teruel-Andorra, Escatrón, Castelnou y Global3. Para complementar el estudio se ha realizado una selección de estaciones meteorológicas pertenecientes a la red de AEMET en Aragón.

## 2.1. Área de estudio

la Comunidad Autónoma (CA) de Aragón se encuentra situada en el Noreste de la Peninsula Ibérica (PIB) ocupando una extensión de más de 47700 km² y una población que no alcanza el 1330000 de habitantes lo que le confiere una baja densidad demográfica (<28 hab/km²). La población, además, está desigualmente distribuída con una conurbación principal, Zaragoza, que se encuentra en el centro geográfico de la CA y cuenta con más de 750000 habitantes y extensas zonas rurales/naturales con pocos habitantes.

Aragón cuenta con una gran variabilidad orográfica y, en consecuencia, climática. Se distinguen tres zonas principales de norte a sur: Pirineos, Depresión del Ebro y Sistema Ibérico. En la parte norte se encuentra el macizo pirenaico, en el que existen diversos picos que superan los 3000 m s.n.m. En esta zona se registra un clima típico de alpino húmedo y suave.

Descendiendo hacia el sur nos encontramos con la depresión del Ebro cuyo curso recorre de oeste a este la parte central de Aragón. Se trata de un valle amplio y eminentemente llano que corresponde con el curso central del río. El clima del valle del Ebro (VdE) es de tipo Mediterráneo con características continentales semiáridas por las escasas precipitaciones que se registran a nivel anual (en el entorno de 320 mm/año). Las temperaturas son extremas con fríos inviernos en los que se producen frecuentemente inversiones térmicas y veranos muy calurosos con temperaturas superando los 35° C muchos días. Las escasas y desiguales lluvias se centran en otoño y primavera.

En el sur se encuentra el Sistema Ibérico, una zona que marca el comienzo de la meseta central

de la PIB. Por ello, la altimetría promedio de esta zona es elevada (superando los 1000 m s.n.m.) y aparecen sierras sin unidad estructural clara en las que hay picos que superan los 2000 m s.n.m. El clima en esta zona es continental con inviernos considerablemente fríos y veranos calurosos aunque, por efecto de la altitud, no tan extremos con en el VdE.

Las fuentes principales de contaminantes atmosféricos son:

- I) Las emisiones residenciales y, especialmente, de tráfico de la conurbación de Zaragoza y de las vías de comunicación que cruzan longitudinalmente Aragón y que son densamente empleadas (autovías y autopistas A-2, AP-2 A-68, AP-68 y AP-15). También hay una autovía que cruza de norte a sur Aragón algo menos masificada en términos de tráfico (A-23). El transporte por carretera es, en parte, tan elevado por el hecho de que Zaragoza es una destacada conexión logística internacional.
- II) Las fuerte actividad agrícola y ganadera en toda la CA, que convierten Aragón, por ejemplo, en un punto caliente de emisiones de amoniaco (NH<sub>3</sub>).
- III) Una zona de aglomeración de centrales de ciclo combinado en la zona del bajo Ebro: Escatrón, Castelnou y Global3.
- IV) Núcleos de industria química en ubicaciones como Monzón o Sabinánigo.
- v) Emisiones biogénicas por las grandes extensiones de zonas naturales.

También es necesario tener en consideración que Aragón tiene regiones limítrofes con altas densidades de población y en las que se ubican zonas industriales como Catalunya, la Comunidad Valenciana, Navarra y, algo más alejadas, Madrid o el País Vasco. Las emisiones de estas zonas deben tenerse en cuanta especialmente de cara a la formación y acumulación de contaminantes como el O<sub>3</sub> que, por sus características físico-químicas, puede verse transportado largas distancias desde las zonas fuente.

## 2.2. Bases de datos utilizadas

#### 2.2.1. Estaciones de calidad del aire

La evaluación de la CA se realiza, como herramienta principal, con los datos proporcionados por estaciones automáticas de medición distribuidas en el territorio. Las redes de estaciones son gestionadas generalmente por Comunidades Autónomas y determinadas Entidades Locales aunque también hay algunas de ámbito estatal (la más destacada es la red EMEP), de orientación científica o de ámbito privado. En España hay en la actualidad más de 600 estaciones de medición fija, distribuidas por toda la geografía del país.

Las estaciones de vigilancia de la contaminación del aire pueden clasificarse, según el tipo de área en la que se localizan, como urbanas, suburbanas y rurales; y según la tipología de la principal fuente de emisión que las influye (que determina unos contaminantes predominantes), como de tráfico, industriales o de fondo. Estas tipologías se pueden definir:

1) Según el tipo de área en la que se localizan:

- Urbanas: las ubicadas en zonas edificadas de forma continua.
- Suburbanas: las que se encuentran en zonas con presencia continuada de edificios, separadas por zonas no urbanizadas (pequeños lagos, bosques, tierras agrícolas...).
- Rurales: entendidas como las situadas en aquellas zonas que no satisfacen los criterios de las dos categorías anteriores.
- п) Según la tipología de la principal fuente de emisión influyente:
  - De tráfico: las situadas de tal manera que su nivel de contaminación está determinado principalmente por las emisiones procedentes de los vehículos de una calle o carretera próximas.
  - Industriales: las ubicadas de tal manera que su nivel de contaminación se debe fundamentalmente a la contribución de fuentes industriales.
  - De fondo: aquellas en las que no se manifiesta ninguna fuente de emisión como predominante.

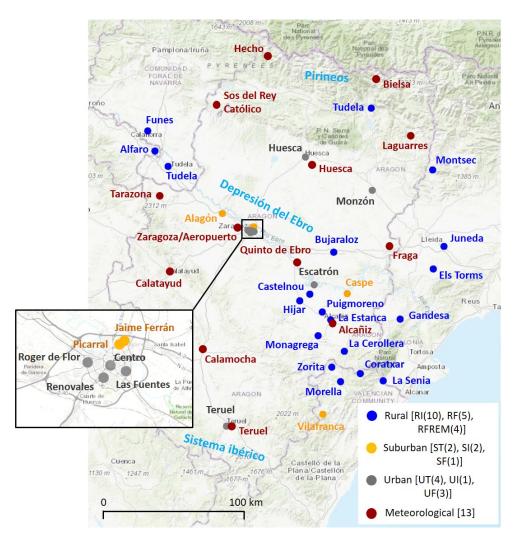
Aunque hay sistemas de medición manuales para determinados contaminantes (principalmente para material particulado atmosférico), las estaciones de CA suelen contar con equipos automáticos que registran a tiempo real las concentraciones de contaminantes recogidos en la legislación como ozono (O<sub>3</sub>), óxidos de nitrógeno (NO y NO<sub>2</sub>), dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO), entre otros. El Ministerio para la Transición Ecológica (MITECO) es el responsable de unificar la información relativa a la evaluación de la calidad del aire en España para cada año y comunicarla a la Comisión Europea (Decisión 2011/850/UE).

En este estudio se han seleccionado las estaciones de CA de las distintas redes existentes en Aragón así como de otras regiones limítrofes con las que realizar un estudio de análisis de series temporales de óxidos de nitrógeno y ozono. Se ha establecido un periodo de estudio de 12 años (2008-2019) que. se considera suficientemente amplio para tener una buena representatividad temporal de un número considerable de estaciones. Los criterios de selección de estaciones establecidos son los siguientes:

- 1) Que midan concentración de O<sub>3</sub>.
- $\Pi$ ) Disponibilidad de un 75 % de datos válidos de  $O_3$  entre abril y septiembre durante un mínimo de 6 años dentro del periodo 2008-2019.
- III) Operatividad de la estación al menos un año entre 2017 y 2019.

Las estaciones elegidas se presentan en la Figura ?? y en las Tablas ?? (estaciones de Aragón) y ?? (estaciones de fuera de Aragón). Se han incorporado excepcionalmente dos estaciones que no disponen de datos suficientes de O<sub>3</sub> pero que sí disponen de datos de NO y NO<sub>2</sub> en el periodo de estudio. Estas dos estaciones son Hijar y Puigmoreno y se han seleccionado para la evaluación de óxidos de nitrógeno por encontrarse en una zona (bajo Ebro) en la que se han registrado puntualmente niveles elevados de O<sub>3</sub>.

El número total de estaciones de CA seleccionadas es de 32. De ellas, 20 están dentro del territorio aragonés y pertenecen a las distintas redes existentes en la CA: red de calidad del Gobierno de Aragón (RCGA), Red Automática de Calidad del Aire del Ayuntamiento de Zaragoza y



**Figura 2.1:** Estaciones de CA (32) y meteorológicas de la AEMET (13) seleccionadas (59) en el área de estudio distinguiendo su tipología. Tipología CA urbana (de fondo: UB, industrial: UIN y de tráfico: UT), suburbana (de fondo: SB industrial: SI y de tráfico: ST) y rural (de fondo: RF, industrial: RI y de fondo regional: RFREM).

redes privadas de centrales térmicas (CT) o de ciclo combinado (CTCC) (CT Teruel, CTCC Escatrón, CTCC Castelnou y CTCC Global3). El resto de emplazamientos están ubicados en regiones limítrofes a Aragón y se han considerado de interés para realizar una descripción adecuada de los niveles de O<sub>3</sub> en la zona. Se han seleccionado estaciones de las siguientes redes: 4 de la Red de Vigilancia y Previsión de la Contaminación Atmosférica (XVPCA) de Catalunya, 4 de la Red Valenciana de Vigilancia y Control de la Contaminación Atmosférica (RVVCCA), 2 de la Red de Estaciones de Control de Calidad del Aire de Navarra y sendas estaciones de red de vigilancia de calidad del aire de La Rioja y de la red EMEP (European Monitoring and Evaluation Programme). Las Tablas ?? y ?? muestran las características principales de las estaciones de CA, así como los porcentajes de disponibilidad de datos de O<sub>3</sub>, NO y NO<sub>2</sub> en los meses de primavera y verano durante el periodo 2008–2019.

Tal y como sucede en la selección de estaciones disponibles en la actualidad para la evaluación de los niveles de O<sub>3</sub> en Aragón, en el estudio de Diéguez et al., de 2009<sup>1</sup> ya se destacaba que la

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>Estudio y evaluación de la contaminación atmosférica por ozono troposférico en España, INF. FIN/O3/2009

**Tabla 2.1:** Características de las estaciones de CA de Aragón usadas en el estudio: provincia, nombre, código, tipo: urbanas (tráfico, industrial o fondo: UT, UIN, UB), suburbanas (tráfico, industrial o fondo: ST, SI, SB), rurales (industrial, de fondo o de fondo regional: RI, RB, RFREM), coordenadas en grados decimales, altitud en m s.n.m. y disponibilidad anual de datos en % de O<sub>3</sub>, NO y NO<sub>2</sub> durante el periodo abril a septiembre en 2008-2019.

HUSCA	PROVINCIA	NOMBRE	CÓDIGO	TIPO	LONG.	LAT.	ALT.	CONT.	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	#Years>75
HUESCA  MONZON  ES20HA  UF  0.19  41.02  0.03  NO  NO  NO  NO  NO  NO  NO  NO  NO  N																					
HUESCA  MONZON  ESZOHIA  UF  OLD  ALSO  ALSO  OLD  ALSO  ALSO  OLD  ALSO  ALSO		HUESCA	ES141/A	UT	-0.40	42.14	488														
TORRELISA  ES1885A  REFEM  OLB  OLB  OLB  OLB  OLB  OLB  OLB  OL									77.2	75.1	00.0	72.0	77	75.0							
TORRELISA BS1885A RFREM 0.18	HUESCA	MONZON	ES2041A	UF	0.19	41.92	308														
TORRELISA ES183A RFREM 0.18 42.6 105 NO									98.9	93.6	97.1	99.7	96.4	99.2							
LA ESTANCA   ES0324A   RI   -0.18   41.05   395   NO   902   1010   88.0   998   96.6   988   929   913   972   98.0   94.1   97.2   12   12   12   12   12   12   12		TORRELISA	ES1883A	RFREM	0.18	42.46	1005	_													
LA ESTANCA   ES0324A   RI   -0.18   41.05   395   NO   100   1010   10																00.2					
PUIGMORENO   ESISSIA   RI   -0.25   Al.11   320   NO   10.0   1		I A ESTANCA	ES0324A	DI	0.18	41.05	205														
PUIGMORENO ESI8SIA RI -0.25 41.11 320 NO -770 973 973 964 965 987 910 917 918 907 918 918 918 917 918 918 918 918 918 918 918 918 918 918		LA ESTANCA	L30324A	Ki	-0.10																
REVIEW   Part								O <sub>3</sub>		95.0		94.6	98.7	98.6							
MONAGREGA   ES0316A   RFREM   -0.29   40.95   570   NO   99.4   99.4   97.8   96.2   88.8   80.00   97.8   93.4   66.6   98.8   97.8   98.8   12		PUIGMORENO	ES1881A	RI	-0.25	41.11	320														
MONAGREGA ES0316A RFREM -0.29 40.95 570 NO 94. 99.5 97.8 96.2 96.3 100.0 99.7 93.4 96.5 98.8 97.8 96.8 12  TERUEL ES18TOU ES1879A RI -0.36 41.23 201 NO 95.0 98.2 98.9 91.0 1																					
TERUEL   CASTELNOU   ES1879A   RI   -0.36   41.23   201   NO   93.7   93.8   93.0   91.0		MONAGREGA	ES0316A	RFREM	-0.29	40.95	570	_		99.4	97.3	96.2	96.3	100.0	99.7	93.4	96.5	98.8	97.8	96.8	12
TERUEL CASTELNOU ES1879A RI -0.36 41.23 201 NO -0.87 98.8 90.3 98.6													96.4	100.0	99.7						
RACEROLLERA   ES0813A   RI   -0.06   40.84   80.0   NO.2   98.7   95.4   99.3   98.6   NO.2   99.0	TERUEL	CASTELNOU	ES1879A	RI	-0.36	41.23	201									96.7	99.2	98.9	99.0	97.2	
LA CEROLLERA   ES0813A   RI   -0.06   40.84   830   NO   97.7   98.2   99.9   96.9   95.0   99.9   98.4					-0.50	1.1.25															
HIJAR   ES1880A   RI   -0.45   41.18   291   NO   54.2   29.3   41.6   10.0   37.3   1   1   1   1   1   1   1   1   1																99.1	97.0	98.9	96.7	98.5	
HIJAR ES1880A RI -0.45 41.18 291 NO 84.2 2.3 40.46 0.16 23 45.2 79.8 98.2 99.3 96.4 95.8 90.8 11  TERUEL ES1421A UF -1.11 40.34 915 NO 93.8 91.0 93.6 91.6 98.2 97.4 94.6 95.8 96.9 93.9 96.5 98.8 91.5 99.2 99.5 12  TERUEL ES1421A UF -1.11 40.34 915 NO 93.8 91.0 93.6 91.6 98.2 97.4 94.6 97.8 86.9 98.8 91.5 99.2 99.5 12  ALAGON ES1418A ST -1.14 41.76 235 NO 92.0 95.7 25.2 87.8 91.1 97.3 90.2 90.6 86.8 99.3 96.5 99.1 99.6 11  BUJARALOZ ES1400A RF -0.15 41.51 327 NO 92.0 97.5 98.8 98.7 99.4 98.7 98.4 95.2 96.5 98.4 91.1 98.8 97.1 12  CASPE ES1848A SI -0.03 41.23 152 NO 89.2 90.7 90.2 90.7 90.3 91.2 95.9 82.5 80.8 95.3 97.4 99.6 98.0 99.7 97.8 12  ESCATRON ES1130A UI -0.33 41.29 175 NO 89.9 89.8 89.4 87.5 92.4 86.5 44.6 93.3 80.2 85.4 80.3 88.2 98.0 99.7 97.8 12  ELPICARRAL ES1044A ST -0.87 41.67 195 NO 89.9 99.1 99.1 99.1 99.1 99.1 98.8 99.1 99.1		LA CEROLLERA	ES0813A	RI	-0.06	40.84	830														
TERUEL   ES1421A   UF   -1.11   40.34   91.0   91																					
TERUEL ES1421A UF -1.11 40.34 915 NO 93.8 249 87.8 91.1 97.3 90.2 90.6 86.8 99.3 96.5 99.1 99.6 11  ALAGON ES1418A ST -1.14 41.76 235 NO 92.0 97.1 98.7 99.4 98.7 98.4 95.2 96.5 98.4 91.1 98.8 97.1 12  BUJARALOZ ES1400A RF -0.15 41.51 327 NO 89.2 90.0 98.8 88.7 99.4 98.7 98.4 95.2 96.5 98.4 91.1 98.8 97.1 12  CASPE ES1848A SI -0.03 41.23 152 NO 88.8 80.8 83.8 80.0 84.3 94.1 98.4 95.2 96.5 98.6 97.4 99.6 99.7 97.8 12  ESCATRON ES1130A UI -0.33 41.29 175 NO 89.9 78.0 12  EARAGOZA ROGER DE FLOR ES1047A UT -0.92 41.65 212 NO NO 2 99.4 99.0 99.0 99.0 98.8 96.1 99.0 99.1 98.8 97.7 99.6 99.0 99.0 98.8 97.7 99.0 99.0 98.8 98.8 97.7 99.0 99.0 98.8 98.8 87.7 99.4 98.7 99.8 98.8 88.7 99.8 99.0 99.2 98.8 97.8 99.0 99.2 98.8 97.8 99.0 99.2 98.8 97.8 99.0 99.2 98.8 97.8 99.0 99.2 98.8 97.8 99.0 99.2 98.8 97.8 99.0 99.2 98.8 97.8 99.0 99.2 98.8 97.8 99.0 99.2 98.8 99.0 99.2 99.2 99.0 99.2 98.8 99.0 99.2 99.2 99.0 99.2 99.2 99.2 99.2		HIJAR	ES1880A	RI	-0.45	41.18	291														
TERUEL ES1421A UF -1.11 40.34 915 NO 93.8 249 87.8 91.1 97.3 90.2 90.6 86.8 99.3 96.5 99.1 99.6 11  ALAGON ES1418A ST -1.14 41.76 235 NO 92.0 97.1 98.7 99.4 98.7 98.4 95.2 96.5 98.4 91.1 98.8 97.1 12  BUJARALOZ ES1400A RF -0.15 41.51 327 NO 89.2 90.6 84.3 80.3 90.0 91.2 95.9 88.8 98.7 98.4 95.2 96.5 98.4 91.1 98.8 97.1 12  CASPE ES1848A SI -0.03 41.23 152 NO 88.8 80.0 87.7 92.4 86.5 44.6 93.3 80.2 85.4 80.3 88.2 98.0 11  ESCATRON ES1130A UI -0.33 41.29 175 NO 89.9 98.0 98.7 88.4 95.2 96.6 58.4 80.3 88.2 98.0 11  ESCATRON ES1130A UI -0.33 41.29 175 NO 89.9 98.0 98.7 88.8 99.0 88.4 21.7 73.2																70.2					
ALAGON ES1418A ST -1.14 41.76 235 NO 92.0 92.0 92.0 92.0 92.0 92.0 92.0 92.0		TERUEL ES1421	ES1421A	UF	-1.11	40.34	915	_													
ALAGON ES1418A ST -1.14 41.76 235 NO 92.0 97.1 98.7 99.4 98.7 98.4 95.2 96.5 98.4 91.1 98.8 97.1 12  BUJARALOZ ES1400A RF -0.15 41.51 327 NO 89.2 90.0 91.2 95.9 82.5 80.8 95.3 97.4 99.6 98.0 99.7 97.8 12  CASPE ES1848A SI -0.03 41.23 152 NO 88.8 80.0 87.7 92.4 96.5 46.5 46.5 93.8 91.1 98.8 97.1 11  ESCATRON ES1130A UI -0.33 41.29 175 NO 89.9 78.0 88.8 80.0 87.7 92.4 86.5 44.6 93.3 80.2 85.4 80.3 88.2 98.0 11  ESCATRON ES1130A UI -0.33 41.29 175 NO 89.9 78.0 88.8 80.0 87.7 92.4 86.5 44.6 93.3 80.2 85.4 80.3 88.2 98.0 11  ELPICARRAL ES1044A ST -0.87 41.67 195 NO 89.9 78.0 88.8 80.0 88.4 21.7 73.2								NO <sub>2</sub>		25.2			97.3	90.2	90.6	86.8	99.3	96.5	99.1	99.6	
No		ALAGON ES141	F014104	om		41.76	225	_													
BUJARALOZ ES1400A RF -0.15 41.51 327 NO 82.2 90.3 93.5 87.2 94.3 99.0 99.2 96.4 97.4 99.6 86.2 99.8 97.8 12 NO 89.2 90.7 96.3 91.2 95.9 82.5 80.8 95.3 97.4 99.6 98.0 99.7 97.8 12 NO 89.2 90.7 96.3 91.2 95.9 82.5 80.8 95.3 97.4 99.6 98.0 99.7 97.8 12 NO 89.2 90.7 96.3 91.2 95.9 82.5 80.8 95.3 97.4 99.6 98.0 99.7 97.8 12 NO 89.2 90.7 96.3 91.2 95.9 82.5 80.8 95.3 97.4 99.6 98.0 99.7 97.8 12 NO 89.2 90.7 96.3 91.2 95.9 82.5 80.8 95.3 97.4 99.6 98.0 99.7 97.8 12 NO 89.2 91.2 91.2 91.2 91.2 91.2 91.2 91.2 9			ES1418A	51	-1.14	41.76	233													77	
CASPE   ES1848A   SI   -0.03   41.23   122   NO   88.8   80.0   87.7   92.4   86.5   44.6   93.3   80.2   85.4   80.3   87.6   96.0   99.7   97.8   12		BUJARALOZ E				41.51			88.5	93.5		94.3	99.0	99.2	96.4	97.4	99.6	86.2	99.8	97.8	
CASPE ES1848A SI -0.03 41.23 152 NO 88.8 80.0 87.7 92.4 86.5 44.6 93.3 80.2 85.4 80.3 88.2 98.0 11  ESCATRON ES1130A UI -0.33 41.29 175 NO 89.9 78.0 85.8 89.0 88.4 21.7 73.2			ES1400A	RF	-0.15		327	_													
CASPE ES1848A SI -0.03 41.23 152 NO 88.8 80.0 87.7 92.4 86.5 44.6 93.3 80.2 85.4 80.3 88.2 98.0 11  ESCATRON ES1130A UI -0.33 41.29 175 NO 89.9 78.0 85.8 80.0 88.4 21.7 73.2																					
ESCATRON ES1130A UI -0.33 41.29 175 NO 89.9 78.0 85.8 89.0 88.4 21.7 73.2		CASPE	CASPE ES1848A	SI	-0.03	41.23	152		88.8	80.0		92.4				80.2	85.4		88.2	98.0	
$ \begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$																					
ZARAGOZA  ROGER DE FLOR  ES1047A  UT  -0.92  41.65  212  NO2  8.90  8.44  8.55  8.90  8.44  8.55  8.90  8.84  8.17  8.05  8.84  8.17		ESCATRON	E E 1120A	111	-0.33	41.29	175	_								98.6	87.6	96.0	99.5	97.3	
ZARAGOZA EL PICARRAL ES1044A ST -0.87 41.67 195 NO 99.1 98.3 93.6 86.1 98.7 89.2 94.8 98.4 100.0 97.2 10  NO2 96.7 99.2 97.5 97.6 93.6 95.2 98.8 87 97.7 98.6 100.0 97.2 12  NO3 99.1 98.3 99.4 99.7 98.6 100.0 97.2 12  NO4 10.0 11  NO5 10.0 10.0 10.0 10.0 10.0 10.0 10.0 10.		ESCATRON	Lorroon	01	-0.33																
ZARAGOZA ROGER DE FLOR ES1047A UT -0.92 41.65 212 NO 2 99.4 99.9 99.0 99.0 98.8 96.1 98.8 96.7 99.2 98.8 88.7 97.7 98.6 100.0 97.2 12    NO   NO   NO   NO   P.   NO   P.   NO   P.   P.   P.   P.   P.   P.   P.   P									96.7		97.6										
ARAGOZA ROGER DE FLOR ES1047A UT -0.92 41.65 212 NO 99, 99, 99, 99, 99, 99, 99, 99, 99, 99		EL PICARRAL	ES1044A	ST	-0.87	41.67	195		06.7		07.5										
NO <sub>2</sub> 99.4 99.9 99.0 99.0 98.8 96.4 98.9 99.9 99.3 99.1 94.3 99.8 12	ZARAGOZA																				
		ROGER DE FLOR	ES1047A	UT	-0.92	41.65	212														
									99.4 98.4	99.9 96.8	99.0 92.0	99.0	98.8	96.4	98.9	99.9	99.3	99.1 93.0	94.3 99.4	99.8 89.2	6
JAIME FERRAN ES1090A SI -0.86 41.67 196 NO 93.0 99.4 89.2 6		JAIME FERRAN	ES1090A	SI	-0.86	41.67	196	_	98.4	90.8	92.0										
NO <sub>2</sub> 94.4 99.8 79.9 3																		94.4	99.8		
O <sub>3</sub> 61.9 99.0 98.3 98.1 98.0 95.7 96.2 98.4 99.1 99.7 96.9 94.7 11		DENIONAL E-	POLCH:				220		61.9	99.0	98.3										
RENOVALES ES1641A UF -0.89 41.64 220 NO 98.1 98.9 99.8 95.7 97.7 99.8 97.4 98.4 90.1 9 NO NO 99.1 98.2 98.1 98.7 99.7 96.2 99.0 99.8 97.4 98.1 97.5 11		RENOVALES	ES1641A	UF	-0.89	41.64	220		61.9	99.1	98.2										
03 95.9 93.9 95.5 98.0 99.9 95.8 6												90.1	70.7	99.1	90.2	77.0	77.0				
LAS FUENTES ES1836A UT -0.86 41.64 198 NO 963 999 88.9 3		LAS FUENTES	ES1836A	UT	-0.86	41.64	198														
NO <sub>2</sub> 98.8 97.6 98.5 98.2 93.7 94.6 6									00.8	07.6	08.5										
CENTRO ES1837A UT -0.88 41.65 210 NO 98.5 98.5 98.2 93.7 94.6 6		CENTRO	ES1837A	UT	-0.88	41.65	210	_	99.8	97.6	98.5										
NO <sub>2</sub> 96.3 91.3 88.6 3																		96.3			

distribución de estaciones era extensa en el territorio pero desigualmente distribuidas. En la zona del bajo Aragón y, en general en el flanco este de Aragón este hay muchas estaciones pero hay zonas mal cubiertas como el este de la CA (sólo Alagón se encuentra en esta zona). Además la mayoría de las estaciones son de tipo rural y puede haber cierto déficit de estaciones suburbanas donde, en muchas ocasiones, se registran episodios intensos de O<sub>3</sub>.

**Tabla 2.2:** Características de las estaciones de CA de fuera de Aragón usadas en el estudio: provincia, nombre, código, tipo: urbanas (tráfico, industrial o fondo: UT, UIN, UB), suburbanas (tráfico, industrial o fondo: ST, SI, SB), rurales (industrial, de fondo o de fondo regional: RI, RB, RFREM), coordenadas en grados decimales, altitud en m s.n.m. y disponibilidad anual de datos en % de O<sub>3</sub>, NO y NO<sub>2</sub> durante el periodo abril a septiembre en 2008-2019.

PROVINCIA	NOMBRE	CÓDIGO	TIPO	LONG.	LAT.	ALT.	CONT.	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	#>75
							O <sub>3</sub>	99.6	95.9	94.9	97.7	98.0	87.9	95.7	88.4	99.5	99.7	99.1	99.5	12
	MORELLA	ES1441A	RI	-0.09	40.64	1150	NO	86.0	90.1	92.9	75.2	17.1	87.8	58.2	71.2	99.5	99.7	99.3	99.0	9
							NO <sub>2</sub>	86.0	90.1	92.9	75.2	17.1	87.8	58.2	71.2	99.5	99.7	99.3	99.0	9
						1200	O <sub>3</sub>	78.8	87.2	79.8	89.0	95.8	38.6	92.0	98.0	97.1	99.4	93.9	95.9	11
	CORATXAR	ES1437A	RI	0.08	40.69		NO	82.0	96.1	75.5	94.8	98.4	79.7	67.7	97.8	98.9	99.5	94.5	96.0	11
CASTELLÓN							NO <sub>2</sub>	82.0	96.1	75.5	94.8	98.4	79.7	67.7	97.8	98.9	99.5	94.5	96.0	11
CASTELLON							O <sub>3</sub>	89.6	83.8	92.3	85.2	88.2	95.9	93.7	99.3	94.6	93.6	97.4	87.0	12
	VILAFRANCA	ES1435A	SF	-0.25	40.42	1125	NO	89.7	82.1	82.9	80.3	57.7	45.4	70.2	99.3	95.2	94.4	93.0	98.4	9
							NO <sub>2</sub>	89.7	82.1	82.9	80.3	57.7	44.7	70.2	99.3	95.2	94.4	93.0	98.4	9
							O <sub>3</sub>	96.0	99.6	99.7	97.2	96.0	99.8	99.8	94.5	99.8	97.6	91.3	80.5	12
	ZORITA	ES1543A	RF	-0.17	40.74	619	NO	92.6	86.4	87.8	94.5	96.8	96.2	94.9	94.3	98.6	98.5	93.6	96.0	12
							NO <sub>2</sub>	92.6	86.4	87.8	94.5	96.8	96.2	94.9	94.3	98.6	98.5	93.6	96.0	12
							O <sub>3</sub>							99.7	99.0	99.7	99.2	98.4	99.7	6
	JUNEDA	ES2034A	RF	0.83	41.54	255	NO							98.4	89.3	78.5	98.8	99.4	99.6	6
LLEIDA MONTSEC ES1982A						NO <sub>2</sub>							98.4	89.3	78.5	98.8	99.4	99.4	6	
						O <sub>3</sub>				96.2	94.4	94.6	94.4	98.3	97.2	94.7	97.7	97.0	9	
	MONTSEC	ES1982A	RFREM	0.73	42.05	1570	NO				95.4	95.1	96.0	93.6	96.8	97.5	95.2	97.6	97.1	9
							$NO_2$				95.4	95.1	95.6	93.6	96.8	97.5	95.2	97.6	97.1	9
					0.73 41.39	470	O <sub>3</sub>	99.0	99.2	98.6	99.6	99.3	97.4	98.0	97.7	98.5	99.1	99.1	98.3	12
	ELS TORMS	ES0014R	RFREM	0.73			NO	97.2	99.0	98.5	99.3	98.3	94.4	98.3	97.2	98.3	99.0	98.9	98.2	12
							NO <sub>2</sub>	97.2	99.0	98.8	99.3	98.3	94.4	98.3	97.2	98.3	99.0	98.9	98.2	12
							O <sub>3</sub>	98.5	99.7	99.6	99.7	98.8	99.7	99.6	99.5	96.4	98.1	99.2	98.5	12
LA RIOJA	ALFARO	ES1649A	RI	-1.74	42.18	350	NO	95.1	96.3	98.9	99.6	99.4	99.6	99.6	99.4	97.6	97.6	99.1	98.4	12
							NO <sub>2</sub>	95.8	99.0	99.5	99.6	99.5	99.6	99.6	99.4	97.6	97.6	99.1	98.6	12
							O <sub>3</sub>	99.4	99.5	97.0	99.4	99.7	98.5	99.0	98.8	98.5	93.2	99.0	98.5	12
	FUNES	ES1662A	RI	-1.81	42.31	460	NO	99.7	99.5	94.6	96.6	99.8	99.5	97.1	98.8	98.5	94.7	99.0	98.5	12
NAVARRA							NO <sub>2</sub>	99.7	99.5	95.7	96.6	99.8	99.5	97.1	98.8	98.5	94.7	99.0	98.5	12
Turnidar							O <sub>3</sub>	99.3	99.7	99.2	99.8	99.6	98.5	99.1	99.3	97.5	99.1	86.5	95.2	12
	TUDELA	ES1661A	RI	-1.63	42.07	383	NO	99.6	99.2	98.6	96.3	99.5	98.4	96.4	98.6	99.2	96.4	92.2	96.8	12
							NO <sub>2</sub>	99.6	99.4	98.7	96.3	99.5	98.4	96.4	98.6	99.2	96.4	92.2	96.8	12
							O <sub>3</sub>	99.6	99.5	99.3	99.3	99.0	99.7	99.7	96.8	99.6	99.4	99.0	96.2	12
	LA SENIA	ES1754A	RF	0.29	40.64	428	NO													0
TARRAGONA							NO <sub>2</sub>													0
I IIII I I I I I I I I I I I I I I I I							O <sub>3</sub>	95.6	98.9	98.2	98.5	98.4	99.9	99.1	98.0	99.1	97.1	94.8	99.0	12
	GANDESA	ES1379A	RF	0.44	41.06	368	NO													0
							NO <sub>2</sub>													0

## 2.2.2. Estaciones meteorológicas

La Agencia Española de METeorología (AEMET) dispone de una red de observación en superficie de casi 800 estaciones que incluye tanto observatorios convencionales como sistemas de teledetección que genera información a tiempo real sobre distintas variables meteorológicas en todo el territorio.

En combinación con la selección de estaciones de CA realizada, se ha realizado una selección de estaciones meteorológicas automáticas distribuídas por el territorio de la CA de Aragón y que permitirán estudiar la dinámica de transporte de contaminantes en la región. Esto se hará usando principalmente datos de intensidad y dirección del viento que, eventualmente pueden verse completados con datos de otras variables meteorológicas (temperatura, humedad relativa, radiación solar...). La Figura ?? muestra la ubicación de las 13 estaciones meteorológicas seleccionadas y que, en todos los casos, muestran una buena cobertura temporal a lo largo del periodo 2008-2019 (Tabla ??).

## 2.3. Análisis de variabilidad espacial de vientos, NO, NO<sub>2</sub> y O<sub>3</sub>

Se ha llevado a cabo un estudio preliminar de la variabilidad espacial de la dirección e intensidad de viento en diferentes regiones de la zona de estudio para valorar la influencia de dichos

**Tabla 2.3:** Estaciones meteorológicas usadas en el estudio: provincia, nombre, coordenadas en grados decimales, altitud en m s.n.m. y disponibilidad anual de datos en % durante el periodo abril a septiembre en 2008-2019.

	LONG.	LAT.	ALT.	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	#Years>80
ALCAÑIZ	-0.14	41.03	334	98.9	94.4	91.6	94.2	77.0	68.9	55.7	100.0	97.8	99.5	98.4	100.0	9
BIELSA	0.22	42.37	992	78.1	87.8	96.3	92.2	78.4	96.7	88.0	80.3	100.0	98.9	100.0	100.0	10
CALAMOCHA	-1.29	40.55	890		97.0	94.9	33.2	99.8	99.8	99.9	99.7	100.0	100.0	100.0	100.0	10
CALATAYUD	-1.65	41.20	582	92.3			92.4	84.3	90.6	94.9	99.5	98.9	92.9	99.4	99.8	10
FRAGA	0.36	41.31	170			100.0	100.0	100.0	100.0	99.9	94.5	100.0	100.0	100.0	100.0	10
НЕСНО	-0.75	42.44	860		47.0	96.1	68.2	89.4	98.4	98.0	86.3	100.0	100.0	98.9	100.0	9
HUESCA	-0.33	42.05	546	100.0	100.0	99.8	99.8	99.7	96.0	99.6	99.4	99.7	100.0	100.0	100.0	12
LAGUARRES	0.47	42.12	600		99.4	98.3	100.0	100.0	96.1	98.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	11
QUINTO	-0.50	41.25	205		49.1	98.9	99.9	99.8	98.8	99.9	92.9	100.0	100.0	100.0	100.0	10
SOS DEL REY CATOLICO	-1.21	42.29	626	88.2	88.2	96.7	81.9		97.7	77.0	100.0	92.3	100.0	79.7	94.5	9
TARAZONA	-1.72	41.55	475		49.6	98.9	67.2	100.0	100.0	99.9	100.0	98.2	100.0	100.0	98.9	9
TERUEL	-1.12	40.21	900	100.0	27.7	27.7	13.9	99.9	99.6	98.6	99.9	99.8	100.0	100.0	100.0	9
ZARAGOZA/AEROPUERTO	-1.00	41.39	249	100.0	99.5	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	12

patrones en la variabilidad espacial de contaminantes atmosféricos.

## 2.4. Análisis de series temporales de CA

Tras una evaluación inicial de calidad de los datos de las series de O<sub>3</sub>, NO, NO<sub>2</sub> y variables meteorológicas, se ha realizado un análisis estadístico de los datos que ha contemplado:

- La variabilidad espacio-temporal de contaminantes incluyendo patrones diarios y semanales y patrones de los promedios 8h diarios máximos de O<sub>3</sub>.
- п) Tendencias inter-anuales de observaciones de NO, NO<sub>2</sub> y O<sub>3</sub>.
- III) Estudio de episodios de altas concentraciones de O<sub>3</sub> incluyendo una evaluación de posibles contribuciones de O<sub>3</sub> y de potenciales márgenes de reducción.

## 2.5. Convenios

#### 2.5.1. Abreviaciones

En este informe, las abreviaciones utilizadas para clasificar las estaciones de CA son, según tipología y área: Tipología urbana (U; de fondo: UB, industrial: UIN y de tráfico: UT), suburbana (S; de tráfico: ST, de fondo: SB, industrial: SI) y rural (R; de fondo: RB, industrial: RI y de fondo regional: RFREM).

La abreviación 8h, se refiere a las medias octohorarias de los niveles de O3; VO, a valor objetivo; UI, umbral de información, VdE, a Valle del Ebro; CA, a calidad del aire.

Las abreviaciones utilizadas para referirse a direcciones son de acuerdo a los ocho rumbos colaterales:

■ Norte: N

■ Norte-noreste: NNE

Noreste : NE

## Capítulo 2. METODOLOGÍA Y SELECCIÓN DE ESTACIONES

■ Este-noreste : ENE

■ Este : E

■ Este-sureste : ESE

■ Sureste : SE

■ Sur-suroeste : SSE

■ Sur : S

■ Sur-suroeste : SSO

■ Suroeste : SO

■ Oeste-suroeste : OSO

Oeste: O

■ Oeste-noroeste : ONO

■ Noroeste : NO

■ Norte-noroeste : NNO

#### 2.5.2. Convenios horarios

En este informe la hora de referencia de los datos es UTC. En España, la hora local en horario de invierno es UTC +1h y UTC +2h en horario de verano.

## Capítulo 3

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

## 3.1. Vientos dominantes

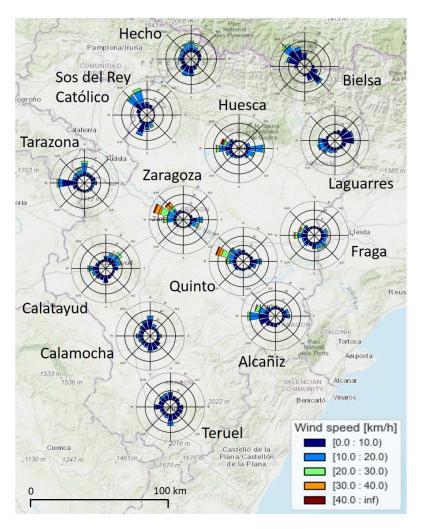
La variabilidad espacial y temporal del O<sub>3</sub> viene condicionada por los patrones de circulación dominantes en la zona de estudio. Por ello es importante caracterizar los vientos conocer el transporte atmosférico de los contaminantes tanto primarios como secundarios (caso del O<sub>3</sub>). Se han empleado datos de dirección y velocidad de viento en superficie de 13 estaciones meteorológicas de la AEMET distribuidas por Aragón (Figura ??).

En las Figura ?? se pueden observar las rosas de viento de cada estación meteorológica para el periodo 2008-2019 en el periodo abril-septiembre. En general se observan vientos dominantes en los periodos cálidos con componentes principal que oeste pero que, según la ubicación se canaliza como O o NO en la mayoría de la ubicaciones pero también puede canalizan de acuerdo a la topografía local (por ejemplo la de un valle de montaña) en dirección N o SW. Las zonas centrales como el VdE y las zonas de topografía suave al sur y al norte del mismo muestran velocidades más elevadas, especialmente en las ubicaciones anejas al curso del río. También hay una componente secundaria opuesta a la mencionada que da cuenta de los vientos más débiles de levante asociados a periodos anticiclónicos de verano.

También se han confeccionado las rosas de viento desagregadas en periodo diurno y nocturno para cada año con disponibilidad de datos superior al 75 % de datos horarios entre abril y septiembre (Figuras ??-??, en el Anexo). Los patrones se repiten anualmente con leves variaciones. Las principales diferencias entre los periodos diurnos y nocturnos tienen que ver con una mayor frecuencia de vientos E, SE o S (según la dirección de la dirección de canalización particular en cada emplazamiento) durante el día. Esto se debe a un reforzamiento térmico de las circulaciones de levante durante el periodo diurno.

## 3.2. Niveles de contaminantes

En la Figura ?? se presentan los niveles promedio de NO y NO<sub>2</sub> en abril-septiembre de 2008-2019. Los niveles más altos de NO se registran en las estaciones de tráfico de Zaragoza capital (Picarral, Roger de Flor y Centro) (7-9  $\mu$ g m<sup>-3</sup>) y en la suburbana de tráfico de Alagón (9  $\mu$ g m<sup>-3</sup>) ubicada esta cercana a un tramo de autovía. Los niveles más reducidos de NO se registran en estaciones de tipo RF como Els Torms o Montsec en la zona limítrofe a Aragón (<1  $\mu$ g m<sup>-3</sup>)

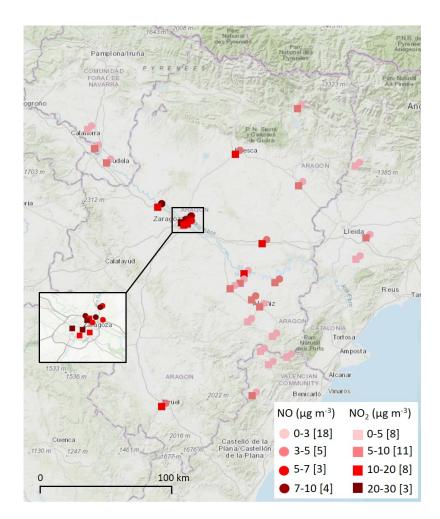


**Figura 3.1:** Rosas de viento de años representativos (promedios de abril a septiembre) calculadas a partir de medidas horarias de dirección y velocidad en 13 estaciones meteorológicas de la AEMET en Aragón.

o, dentro de Aragón, también en estaciones RF como Monagrega o IF como La Cerollera o La Estanca (1-2  $\mu$ g m<sup>-3</sup>).

Respecto a los niveles de  $NO_2$  en el periodo cálido, destacan en la parte alta estaciones de tráfico de la ciudad de Zaragoza como El Picarral, Roger de Flor y Centro (24-25  $\mu$ g m<sup>-3</sup>) seguidas de otras estaciones de Zaragoza capital como Renovales (UF:  $20~\mu$ g m<sup>-3</sup>), Las Fuentes (UT:  $19~\mu$ g m<sup>-3</sup>) o Jaime Ferrán (ST:  $18~\mu$ g m<sup>-3</sup>) y, fuera de la capital, Alagón (ST:  $20~\mu$ g m<sup>-3</sup>). Los niveles más bajos vuelven a observarse en estaciones RF (Montsec, Els Torms con  $2~\mu$ g m<sup>-3</sup> y Monagrega con  $4~\mu$ g m<sup>-3</sup>) o RI (La Cerollera, Funes o Morella con  $4~\mu$ g m<sup>-3</sup>).

La Figura ?? muestra los percentiles 93,2 de las máximas diarias 8h de  $O_3$  medidas en las estaciones de CA. Los valores de percentil 93,2 superiores a 120  $\mu$ g m<sup>-3</sup> implican superación del valor objetivo a largo plazo para la protección de la salud. Las superaciones de los 120  $\mu$ g m<sup>-3</sup> o valores cercanos son generalizados en el área de estudio ya que 20 de las 30 estaciones estudiadas tienen un percentil 93,2 superior a 115  $\mu$ g m<sup>-3</sup>. Los valores más elevados se registran en estaciones rurales en zonas montañosas en el flanco este del área de estudio como Montsec, Morella y Coratxar (124-129  $\mu$ g m<sup>-3</sup>) o, en Aragón, La Cerollera (122  $\mu$ g m<sup>-3</sup>). Las estaciones de la banda oriental de la región a estudio a cotas más bajas como Zorita, Els Torms, La Senia,

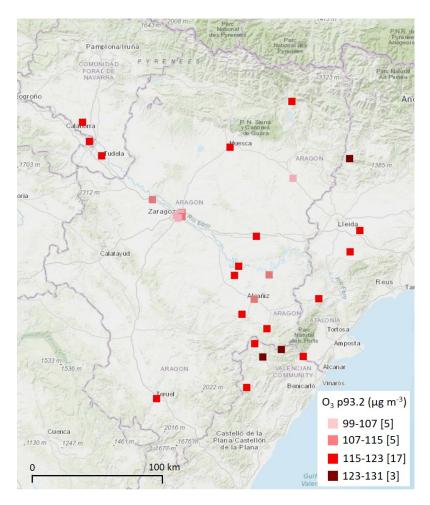


**Figura 3.2:** Distribución espacial de concentraciónes promedio entre abril y septiembre de NO y NO<sub>2</sub> en las estaciones de CA seleccionadas 2008-2019 con un mínimo de 6 años con una disponibilidad del 75 % de valores válidos entre abril y septiembre.

Juneda, Gandesa, Castelnou o Escatrón también registran valores elevados (119-123  $\mu$ g m<sup>-3</sup>) con Bujaraloz en 117  $\mu$ g m<sup>-3</sup>. Tudela y Funes, en el cauce del río Ebro en Navarra también muestran valores elevados (ambas 122  $\mu$ g m<sup>-3</sup>). En las estaciones ubicadas al norte de Aragón los valores del percentil 93,2 se aproximan al valor objetivo a largo plazo para la protección de la salud aunque sin superarlo (118 y 117  $\mu$ g m<sup>-3</sup> en Torrelisa y Huesca, respectivamente).

Para dar una descripción más completa de los niveles máximos diarios de  $O_3$  en la zona de estudio se ha confeccionado un diagrama de cajas (Figura ??). Las cajas están calculadas a partir de las concentraciones medias máximas 8h diarias ordenadas según el valor de la mediana. Las líneas discontinuas muestran el valor objetivo para la protección de la salud humana, VO (120  $\mu$ g m<sup>-3</sup> para el máximo diario del promedio de 8h) y el valor guía de la OMS (100  $\mu$ g m<sup>-3</sup> para cualquier promedio 8h diario). Las cifras indicadas en la línea superior del gráfico muestran el promedio del número de días al año en los cuales en cada estación se supera el VO.

Los valores más altos diarios de O<sub>3</sub> tienden a registrarse en las estaciones rurales que están alejadas, en general, de fuentes de compuestos que consumen O<sub>3</sub>, por ejemplo, de NO. Las estaciones que marcan los niveles más elevados son Morella y Montsec y, dentro de Aragón, Castelnou. Por el contrario, los niveles en las estaciones urbanas son generalmente más reducidos, siendo la estación



**Figura 3.3:** Distribución espacial del percentil 93,2 de las máximas diarias 8h de O<sub>3</sub> medidas en las estaciones de CA seleccionadas.

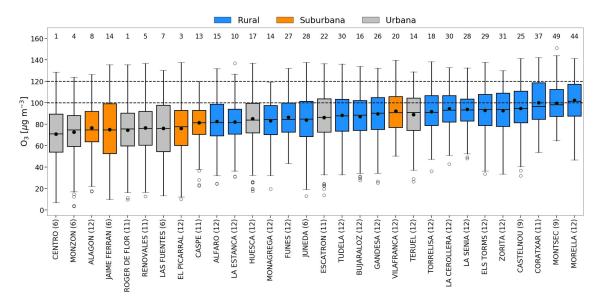
de Centro en Zaragoza capital (tipo UT) la que registra los menores niveles. Todas las estaciones registran anualmente, en promedio, superaciones diarias del VO aunque en distinta proporción. Destacan Montsec y Morella con 49 y 44 días al año, respectivamente. De las estaciones en territorio aragonés las que registran mayor número promedio anual de superaciones son La Cerollera (30) y Castelnou (25).

Si nos fijamos en los valores extremos, el percentil 99 de los máximos diarios de los promedios 8h, destacan Juneda y Montsec con 143 y 141  $\mu$ g m<sup>-3</sup>, respectivamente, seguidas por Funes, Tudela, Morella, La Cerollera, Coratxar y Caspe con entre 138 y 140  $\mu$ g m<sup>-3</sup> todas ellas. Algunas de estas estaciones no están entre las que tienen niveles promedio de O<sub>3</sub> más elevados por la caída de concentración nocturna debido a la titración pero registran con relativa frecuencia niveles diurnos más elevados que el resto de emplazamientos.

## 3.3. Patrones temporales

#### **3.3.1.** Patrones diarios y semanales

En las Figuras ??a y ??b se pueden observar los ciclos diarios promedio de los niveles de O<sub>3</sub> por mes del año. Los valores máximos diarios se registran sistemáticamente en las horas centrales

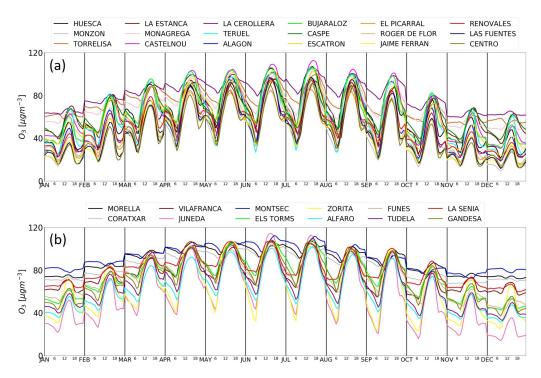


**Figura 3.4:** Diagrama de cajas que muestra los estadísticos representativos de los niveles máximos diarios de  $O_3$  registrados en las estaciones de CA a partir de las medias máximas 8h diarias medidas durante todo el año. En el eje x, entre paréntesis, se muestran los años con datos disponibles (con al menos un 75 % de disponibilidad entre abril y septiembre). Se muestran los estadísticos (Percentiles 25 y 75 delimitados por cada caja, valor promedio representado mediante un punto, mediana representada con una línea horizontal dentro de la caja y valores atípicos en círculos negros). Las líneas discontinuas muestran el valor objetivo para la protección de la salud humana, VO (120  $\mu$ g m<sup>-3</sup> para el máximo diario del promedio de 8 h) y el valor guía de la OMS (100  $\mu$ g m<sup>-3</sup> para cualquier promedio de 8h diario). Las cifras superiores muestran el promedio del número de días al año en los cuales en cada estación se supera el VO. Los distintos colores muestran la clasificación de las estaciones por tipo (rural, suburbana o urbana).

del día. Asimismo, la estacionalidad se muestra claramente con máximos en los meses cálidos del año. Este comportamiento es lógico de acuerdo a las condiciones que favorecen la formación de O<sub>3</sub> asociadas a alta insolación y altas temperaturas que se producen en los meses estivales a las horas centrales del día.

Dentro del territorio de la C.A. de Aragón los picos promedio más altos se detectan en Castelnou en los meses de Junio y Julio (valor máximo de la serie de ciclos de  $113 \mu g m^{-3}$ ) por encima de otras estaciones como Huesca o Bujaraloz (107 y  $106 \mu g m^{-3}$  de promedio máximo respectivamente). Fuera de Aragón hay estaciones que alcanzan valores máximos promedio más elevados que en las mencionadas anteriormente como Juneda, Montsec, Tudela, Els Torms, Zorita o Funes (entre  $108 \text{ y } 115 \mu g m^{-3}$ ). Los máximos se dan generalizadamente en los meses de Junio y Julio coherentemente con lo observado en otras zonas de la Península Ibérica (REFS).

Es reseñable que el perfil diario de las concentraciones se ve afectado por las condiciones de cada estación debido a su altitud, proximidad a fuentes de emisión de precursores y al tipo de fuentes. Así, estaciones ubicadas en cotas muy elevadas y alejadas de la influencia directa de fuentes de precursores muestran como Montsec, Morella, Coratxar o, en Aragón, La Cerollera y Torrelisa, en Aragón, muestran poca amplitud de concentraciones diarias, con niveles estivales nocturnos altos a causa de su posición en una cota elevada, generalmente por encima de la capa límite, probablemente bajo la influencia de capas de aire de reserva ricas en O<sub>3</sub>. Cuando hay estaciones en zonas elevadas pero con influencia directa de núcleos urbanos como en Teruel o Villafranca, la

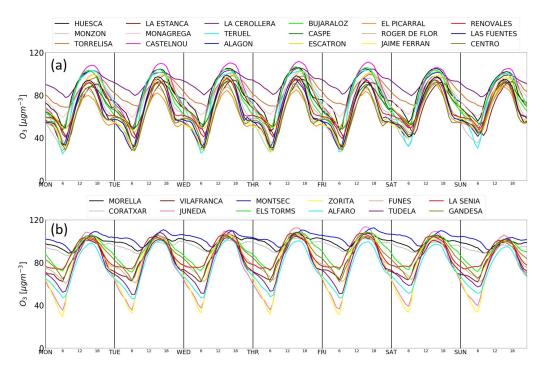


**Figura 3.5:** Ciclos diarios promedio de concentración de O<sub>3</sub> por mes de las estaciones de CA seleccionadas calculados en base a los datos horarios del periodo 2008-2019. La subfigura (a) muestra las estaciones ubicadas en la CA de Aragón mientras que la (b) muestra las estaciones de regiones limítrofes.

amplitud de concentraciones diarias aumenta por el efecto de la titración nocturna producida por el NO de las fuentes locales. Por otro lado, Juneda y Caltelnou, dos de las estaciones que registran niveles más altos en sus ciclos diarios en verano, sí muestran amplitud en sus concentraciones a lo largo del día debido a su ubicación en cotas bajas que permite que compuestos consumidores de O<sub>3</sub> alcancen con más facilidad dichas ubicaciones durante el periodo nocturno.

La Figura ?? muestra los ciclos semanales promedio de verano (Junio-Agosto) de las concentraciones de O<sub>3</sub> en las estaciones seleccionadas. En la mayor parte de los casos se observa que durante los fines de semana los niveles máximos se reducen ligeramente respecto a los de los días laborables mientras que los niveles mínimos nocturnos aumentan. La reducción propia de las emisiones de NO del tráfico asociadas al fin de semana dan lugar a una menor titración nocturna incrementando relativamente las concentraciones. La reducción de los niveles diurnos sugieren que una aportación significativa de O<sub>3</sub> en las mismas de transporte local-regional y/o una reducción de emisión de precursores durante sábado y domingo. Sin embargo las estaciones de la ciudad de Zaragoza muestran niveles máximos durante el fin de semana que aumentan ligeramente con respecto a los días laborables. En estos casos la influencia directa del tráfico puede ser más relevante y el aumento de los niveles máximos en el fin de semana también pueden explicarse por una disminución del efecto de titración.

Se han estudiado los ciclos diarios promedio del mes de Julio de  $O_x$  (Figura ??) para así reducir el efecto de interferencia de la titración producida por el NO. Se observan comportamientos análogos en todas las estaciones lo que revela fenomenologías muy parecidas en toda la zona de estudio. Ello tiene su razón en que Aragón y su entorno se trata de una zona principalmente receptora de ozono formado en otras regiones aunque también puede haber focos de emisión de



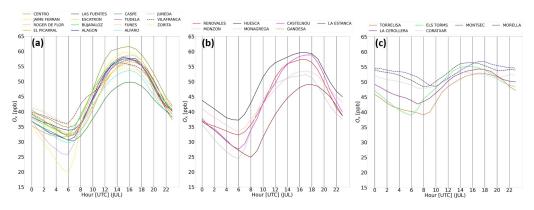
**Figura 3.6:** Ciclos diarios promedio de concentración de O<sub>3</sub> por día de la semana de las estaciones de CA seleccionadas calculados en base a los datos horarios del periodo 2008-2019. La subfigura (a) muestra las estaciones ubicadas en la CA de Aragón mientras que la (b) muestra las estaciones de regiones limítrofes.

#### precursores.

La amplia mayoría de estaciones (Figura ??a) siguen un patrón en el ciclo diario de  $O_x$  marcado por máximos entre las 15 y las 16 UTC esencialmente principalmente por transporte de masas de aire cargadas con  $O_3$ , que luego descienden rápidamente llegando al mínimo diario hacia las 6 UTC. El máximo diario en algunas estaciones se produce algo más tarde aunque la fenomenología en estas cabinas no cambia esencialmente respecto a las anteriores (Figura ??b). En las estaciones de fondo situadas a más altitud (Figura ??c), los máximos son generalmente pasadas las 17-18 UTC pero apenas se produce descenso de los niveles hasta el mínimo diario de las 6 UTC. Esto refleja el reducido impacto de la titración en estas estaciones donde, por un lado hay muy pocas fuentes de NO (tráfico principalmente) y, además, su ubicación en cotas altas, dificulta que reciba aportes de especies destructoras de  $O_3$ . En los tres tipos de estaciones la formación local de  $O_3$  es reducida ya que no hay máximos de  $O_x$  en el entorno de las 12 UTC, hora de mayor insolación.

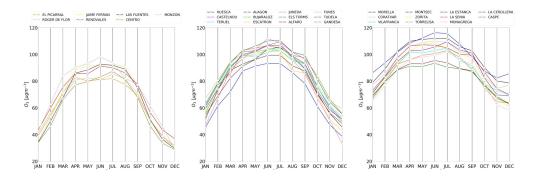
#### 3.3.2. Patrones de los promedios 8h diarios máximos de O<sub>3</sub>

Estudiando los promedios 8h se reduce el efecto nocturno de la titración de O<sub>3</sub> que reduce marcadamente los niveles medios de este contaminante en zonas urbanas e industriales. Se ha confeccionado la Figura ?? en la que aparecen los ciclos anuales de las estaciones de CA analizadas. Los perfiles de todas las estaciones tienen características semejantes. En general los promedios máximos se observan en Junio o Julio siguiendo el ciclo anual de radiación solar que maximiza a mediados de año. Se distinguen matices diferentes que vienen determinados más por el tipo de estación que por la ubicación geográfica. Por ejemplo en el grupo de estaciones cuyos ciclos están mostrados en la Figura ??a se muestran estaciones de tipo urbano o suburbano en las que el impac-



**Figura 3.7:** Ciclos diarios promedio de concentración de  $O_x$  de Julio de varias estaciones de CA calculados en base a los datos horarios de  $O_3$  y  $NO_2$  del periodo 2008-2019.

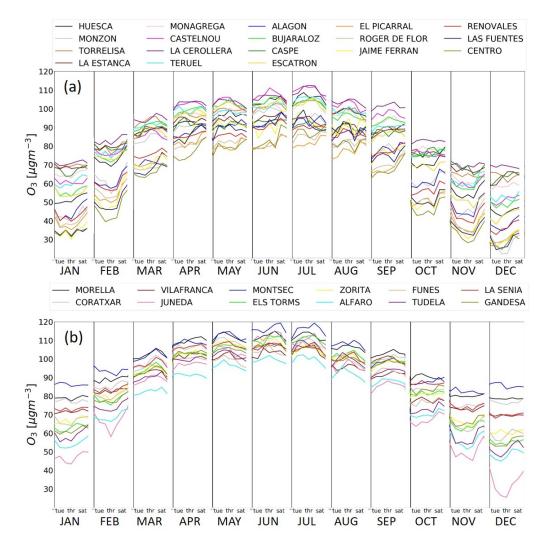
to del tráfico es importante. En ellas, los niveles promedio de la serie 8h en los meses de invierno caen por debajo de los  $40 \mu g$  m<sup>-3</sup> mientras que los máximos de verano promedio se mantienen moderados. En este grupo de estaciones el efecto de la titración que maximiza en invierno es evidente. En las estaciones cuyas medias mensuales de la serie 8h se muestran en la Figura ??c, hay estaciones rurales junto con algunas suburbanas con muy poco impacto de tráfico. Además, bastantes de ellas son estaciones ubicadas en cotas elevadas (Montsec, Coratxar, Morella, Vilafranca y Torrelisa son estaciones por encima de los 1000 m s.n.m.). Estas características hacen que los niveles sean más elevados en los meses de invierno por encontrarse en muchas ocasiones en zonas por encima de la capa de mezcla. De hecho, los niveles en este grupo de estaciones no bajan de 60  $\mu$ g m<sup>-3</sup> en ningún momento del año. En las estaciones recogidas en la Figura ??b en las que hay una situación intermedia. Son estaciones rurales situadas en general en cotas más bajas, urbanas de fondo ubicadas en poblaciones pequeñas o suburbanas con influencia de tráfico moderada.



**Figura 3.8:** Ciclos mensuales de las máximas diarias de las medias móviles 8h de  $O_3$  medidas en las estaciones del estudio. Las estaciones están agrupadas por similitud de perfil de los ciclos mensuales.

En los ciclos semanales promedio confeccionados con la serie de máximos 8h para cada mes en el periodo 2008-2019 (Figura ??), podemos observar que durante los meses menos cálidos las concentraciones durante los fines de semana son más elevadas que durante los días laborables. Esto constituye el conocido efecto fin de semana del O<sub>3</sub> por el que una bajada de las emisiones de NO en estaciones influenciadas por el tráfico urbano provoca un aumento de niveles de O<sub>3</sub>. En las estaciones de tipo rural, mucho menos influenciadas por el tráfico, las subidas relativas durante el fin de semana en los meses fríos es menos marcada o, incluso, en algunas estaciones,

apenas hay subidas. Si nos fijamos en las estaciones de ámbito urbano en los meses de verano, el comportamiento es inverso o, en las que más impacto directo del tráfico reciben (ej. El Picarral o Centro), las concentraciones días laborables/fin de semana son similares. Esta diferencia estacional es indicativa de la importancia de la formación y transporte local/regional. En las estaciones rurales los mínimos semanales se suelen registrar el fin de semana e incluso el lunes debido al aporte de O<sub>3</sub> generado a nivel regional ya que la reducción de O<sub>3</sub> producida debido a la reducción de emisiones de precursores el fin de semana se registra con un día de desfase respecto al domingo.



**Figura 3.9:** Ciclos semanales promedio de concentración de O<sub>3</sub> por mes de las estaciones de CA seleccionadas calculados en base a las máximas diarias 8h a partir de los datos horarios del periodo 2008-2019.

#### 3.3.3. Tendencias inter-anuales

Mediante el test no-paramétrico de Mann-Kendall se han analizado las tendencias inter-anuales de las concentraciones de NO, NO<sub>2</sub> y O<sub>3</sub> medidos en estaciones de CA de la zona de estudio junto con su significancia estadística. Para ello se ha empleado el paquete pyMannKendall<sup>1</sup> haciendo

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>Hussain et al., (2019). pyMannKendall: a python package for non parametric Mann Kendall family of trend tests.. Journal of Open Source Software, 4(39), 1556, https://doi.org/10.21105/joss.01556

uso de la estimación Theil<sup>2</sup>-Sen<sup>3</sup> de la magnitud de la tendencia.

Se han calculado las tendencias temporales de las concentraciones promedio de primaveraverano para NO, NO<sub>2</sub> y O<sub>3</sub> y de los percentiles 93,2 de las máximas diarias 8h de O<sub>3</sub> (Tabla ??) para el periodo 2008-2019.

Se observa un descenso generalizado de los niveles promedio de NO de primavera y verano en 9 estaciones con significación estadística y un promedio de reducción anual de las concentraciones de -4,9 % año<sup>-1</sup>, con desviación estándar de 3,3) aunque también dos estaciones (Funes y Renovales) que muestran tendencia de NO creciente significativamente. Es cierto que en la estación de Funes, a partir de 2014, hay una subida del nivel base a 2  $\mu$ g m<sup>-3</sup> lo que probablemente signifique un cambio de criterio en la política de comunicación de los datos por la que no se haya establecido en ese valor el límite de detección. Por ello la tendencia creciente en esta estación puede ponerse en cuestión. Sin embargo, el caso de Renovales es relevante ya que no se produce una situación como la mencionada en Funes y, además, es la estación de fondo urbano de referencia en Zaragoza capital.

Respecto a los niveles de NO<sub>2</sub>, hay 5 estaciones que muestran reducciones significativas estadisticamente (media -2,1 % NO<sub>2</sub> año<sup>-1</sup>, desviación estándar 0,9). Cuatro de estas 5 estaciones son urbanas y/o con clara influencia del tráfico aunque también hay descenso de NO<sub>2</sub> significativo en la estación rural de Alfaro.

Respecto a las tendencias en los niveles promedio de abril-septiembre de  $O_3$ , existen 8 estaciones que las que se observa un aumento estadísticamente significativo de este parámetro (1,3 % año<sup>-1</sup>, desviación estándar 0,7) y 3 estaciones se registran caídas (-1,4 % año<sup>-1</sup>, desviación estándar 0,3). De las 8 estaciones con aumentos, 4 son urbanas (Teruel, Picarral, Las Fuentes y Centro) aunque también hay estaciones rurales (Bujaraloz, Castelnou, Coratxar y Morella) con incrementos significativos de  $O_3$  lo que indicaría que también existen, en determinadas zonas, ascensos de los niveles de fondo promedio.

Las tendencias de los niveles extremos de  $O_3$ , evaluadas sobre el percentil 93,2 de las máximas diarias 8h, muestran descenso en 5 estaciones (media -1,0 % año<sup>-1</sup>, desviación estándar 0,4) e incremento en 3 (media 0,7 % año<sup>-1</sup>, desviación estándar 0,1).

En compendio, tanto los niveles promedio como los extremo de  $O_3$  en la zona de estudio no muestran unas tendencias significativas claras en el periodo 2008-2019. Sin embargo, se demuestra que los emplazamientos con subidas en los niveles medios dominan sobre los que presentan decrementos mientras que, con respecto a los niveles extremo, ocurre lo contrario. Además, el efecto de la disminución de titración no parece extremadamente relevante para los emplazamientos con subidas de  $O_3$  ya que la combinación de tendencias significativas decrecientes de NO o  $NO_2$  con subidas significativas de  $O_3$  sólo se produce en tres ubicaciones (Morella, Castelnou y El Picarral) e, incluso, en otras tres (Monzón, La Estanca y Monagrega) se producen bajadas de  $NO_x$  coincidentes con bajadas de  $O_3$ .

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>Theil, H. (1950), A rank-invariant method of linear and polynomial regression analysis. I, II, III", Nederl. Akad. Wetensch., Proc., 53: 386–392, 521–525, 1397–1412

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup>Sen, Pranab Kumar (1968), Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau, Journal of the American Statistical Association, 63 (324): 1379–1389, doi:10.2307/2285891

**Tabla 3.1:** Estimaciones de las tendencias temporales de los niveles de NO, NO<sub>2</sub> y O<sub>3</sub> calculadas mediante el método Theil-Sen para el periodo. Los símbolos mostrados valor-p muestran la significancia estadística de la tendencia estimada: p<0.001 = \*\*\* (significancia estadística superior), p<0.01 = \*\* (media), p<0.05 = \* (moderada), p<0.1 = + (baja). La clasificación de las estaciones de CA es: urbanas (tráfico, industrial o fondo: UT, UIN, UB), suburbanas (industrial o fondo: SI, SB), rurales (industrial, de fondo o de fondo regional: RI, RB, RFREM). Sólo se muestran las tendencias con significancia estadística de las estaciones que disponen de un mínimo del 75 % en el periodo abril–septiembre.

ESTACIÓN	TIPO	PARÁMETRO	TENDENCIA	PEND.	PEND. %	SIGNIF.
		NO	<b>\</b>	-0.2	-5.2	**
MORELLA	RI	О3	1	0.8	0.8	*
		P93.2 O3 8h	1	0.7	0.5	*
CODATVAD	DI	О3	1	0.8	0.8	*
CORATXAR	RI	P93.2 O3 8h	1	0.9	0.7	*
VILAFRANCA	SF	NO	<b>\</b>	-0.3	-7.6	**
ZORITA	RF	NO	<b>\</b>	-0.2	-4.8	*
HUESCA	UT	NO2	<b>\</b>	-0.5	-2.4	*
MONZON	LIE	NO	<b>\</b>	-0.8	-7.0	+
MONZON	UF	О3	<b>\</b>	-1.6	-1.7	+
JUNEDA	RF	NO	<b>1</b>	-0.6	-6.7	+
ALFARO	RI	NO2	<b>1</b>	-0.2	-2.8	*
ELINIEC	DI	NO	1	0.1	5.5	*
FUNES	RI	P93.2 O3 8h	<b>↓</b>	-1.1	-0.8	+
LA SENIA	RF	P93.2 O3 8h	<u> </u>	-0.6	-0.4	+
LA ESTANCA		NO	<b>1</b>	0.0	-2.8	*
	RI	О3	<b>\</b>	-1.0	-1.3	**
		P93.2 O3 8h	<u> </u>	-1.7	-1.3	**
MONAGREGA	RFREM	NO	$\downarrow$	0.0	-2.0	**
MONAGREGA	KITKLIVI	P93.2 O3 8h	↓	-1.5	-1.1	*
CASTELNOU	RI	NO	$\downarrow$	-0.6	-13.3	+
CASTELNOU	KI	O3	1	0.7	0.9	*
HIJAR	RI	NO	$\downarrow$	-0.2	-5.2	*
TERUEL	UF	O3	1	0.9	1.1	*
TEROLL	O1*	P93.2 O3 8h	1	0.9	0.8	**
ALAGON	ST	NO2	<b>\</b>	-0.7	-2.8	**
BUJARALOZ	RF	O3	1	0.5	0.6	+
CASPE	SI	O3	<b>\</b>	-1.0	-1.2	*
CASIL	31	P93.2 O3 8h	$\downarrow$	-2.0	-1.5	*
EL PICARRAL	ST	NO2	<b>↓</b>	-0.2	-0.7	+
EL FICARRAL	31	O3	1	0.9	1.6	*
ROGER DE FLOR	UT	NO2	<b>\</b>	-0.6	-1.9	*
RENOVALES	UF	NO	1	0.2	3.2	*
LAS FUENTES	UT	O3	1	1.3	2.0	+
CENTRO	UT	O3	1	1.4	2.5	**

## 3.4. Episodios de $O_3$

Para definir lo que se entiende por episodios de altos niveles de  $O_3$  el primer nivel ha consistido en analizar las superaciones del umbral de información (promedio horario de 180  $\mu g$  m<sup>-3</sup> de  $O_3$ ). Cabe señalar que, aunque en la normativa se especifica superación de umbrales, en este estudio también se consideran también eventos donde las concentraciones son iguales a los umbrales para disponer de más número de ocurrencias y por ello, más estadística. En el periodo 2008-2019 y en las estaciones analizadas tanto en Aragón como en zonas limítrofes sólo se registraron 16 periodos horarios con superación del umbral de información. En concreto en 2013 se registraron 3 en Tudela, en 2015 se registraron 5 en Juneda y dos tanto en Coratxar como en Montsec y en 2019 una en Huesca y 3 en Torrelisa. Es evidente que la frecuencia de este tipo de episodios ha sido muy reducida en el periodo de estudio y, en particular en la CA de Aragón, casi anecdótica. Las superaciones en el norte de la CA del año 2019 se produjeron durante el 26 de Junio en el que se alcanzaron promedios horarios de 215, 214 y 180  $\mu$ g m<sup>-3</sup> en 3 horas seguidas (20-22 UTC) en Torrelisa y 187  $\mu$ g m<sup>-3</sup> a las 18 UTC en Huesca.

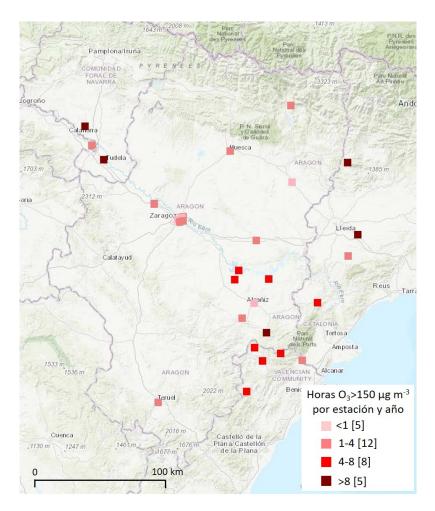
Debido al reducido conjunto de episodios de superación del umbral de información para  $O_3$  en la zona, se ha utilizado un umbral más bajo (promedio horario de  $O_3 \ge 150~\mu g~m^{-3}$ ) para capturar más cantidad de eventos de niveles altos y, así, poder realizar un estudio estadístico más representativo. Este umbral es arbitrario aunque representa bien las situaciones episódicas extremas.

## 3.4.1. Superaciones del umbral horario ( $O_3 \ge 150 \,\mu g \, m^{-3}$ )

La Figura ?? presenta la distribución geográfica del número de superaciones de este umbral por estación y año. Se puede ver que las estaciones con mayor número de superaciones se ubican fuera de Aragón marcando Juneda (22.8 sup. año<sup>-1</sup>) el máximo, seguida por Funes y Tudela (13.3 y 12 sup. año<sup>-1</sup>) y Montsec (9.8 sup. año<sup>-1</sup>). En Aragón, la que más superaciones registra es La Cerollera con 8.0 por año. La distribución espacial muestra claramente la zona este del área de estudio como aquella con mayor número de superaciones. En concreto, en Aragón, el Bajo Aragón es la parte más afectada por estos episodios extremo.

El número anual de superaciones del umbral 150 así como el promedio de de superaciones totales normalizadas al número de estaciones con datos válidos para cada año (en la línea punteada roja) se muestran en la Figura ??. Se observa una gran variabilidad del número de superaciones del umbral horario de 150  $\mu$ g m<sup>-3</sup> en función del año destacando 2010 (10.2 sup. por año y estación) y 2015 (11.2 sup. por año y estación). Estos años registraron fuertes olas de calor en verano y las superaciones aparecen por todas las estaciones de la región a estudio. Aunque sin una marcada significación estadística, se observa una tendencia a la disminución de superaciones a lo largo del periodo (-5.4 % año<sup>-1</sup>). Sería conveniente monitorizar si esta tendencia se consolida estadisticamente en los próximos años.

También se ha analizado la distribución promedio anual de superaciones del umbral 150  $\mu$ g m<sup>-3</sup> por mes del año y los resultados se muestran en la Figura ??. Se separan las estaciones en dos grupos según el perfil. Las estaciones consideradas en la Figura ??a se muestran las estaciones cuyos perfiles vienen marcados por una concentración prioritaria de las superaciones en los meses de Junio y Julio, siendo este último el mes con mayor frecuencia de superaciones. Por otro lado, en la Figura ??b aparecen estaciones con perfiles más planos que registran superaciones casi con

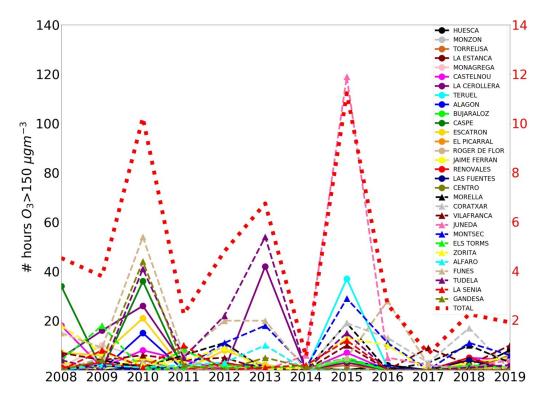


**Figura 3.10:** Distribución del número de superaciones del umbral 150  $\mu$ g m<sup>-3</sup> por estación y año con un mínimo de disponibilidad de datos de O<sub>3</sub> del 75 % en el periodo abril-septiembre.

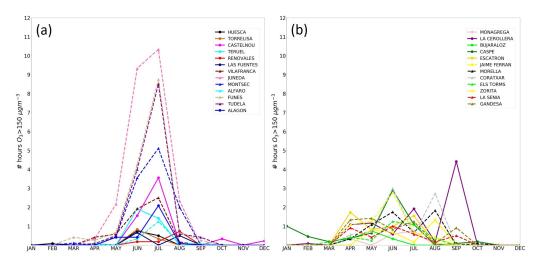
la misma frecuencia en todos los meses desde abril a septiembre. La mayoría de las estaciones con influencia industrial se encuentran en este segundo grupo y es posible que dicha influencia sea clave para explicar la aparición de superaciones en meses donde las condiciones climáticas no sean las más extremas.

En la Figura ?? muestra los patrones de superación del umbral de  $150 \,\mu g$  m<sup>-3</sup> de  $O_3$  por día de la semana y estación. El comportamiento de la mayoría de las estaciones vuelve a ser similar aunque se pueden distinguir dos grupos de estaciones. Por un lado están aquellas estaciones en las que el número de superaciones del fin de semana caen proporcionalmente respecto a las del resto de la semana (Figura ??a). Este constituye el grupo más abundante en el grupo de estaciones estudiadas. Las superaciones en estas estaciones parecen estar gobernadas por  $O_3$  transportado a nivel regional y las reducciones de  $O_3$  durante el fin de semana son debidas a la reducción de emisiones de precursores durante sábado y domingo.

Las estaciones en las que que el fin de semana se elevan los niveles (mayoritariamente se registra el aumento de superaciones los sábados) se infiere una mayor influencia del tráfico y, en consecuencia, del efecto de la titración. Así, la reducción de las emisiones de NO el sábado, ayudan a que aumenten las concentraciones de  $O_3$  y se generen más superaciones del umbral de  $150 \,\mu \mathrm{g} \,\mathrm{m}^{-3}$ .

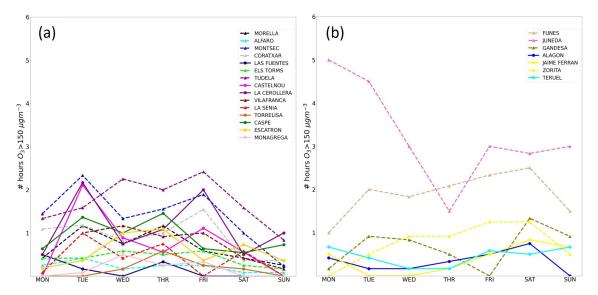


**Figura 3.11:** Superaciones horarias del umbral 150  $\mu$ g m<sup>-3</sup> de O<sub>3</sub> por estación y año en el periodo 2008-2019. La línea punteada roja (eje secundario) muestra las superaciones totales normalizadas (totales divididas por el número de estaciones con datos válidos, para cada año).



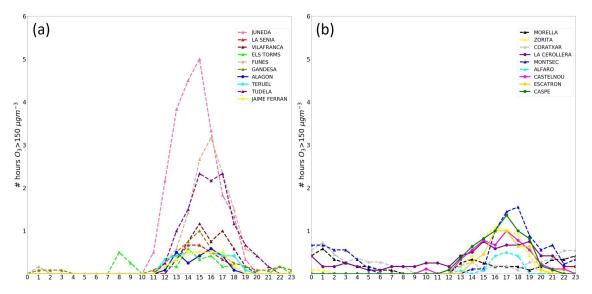
**Figura 3.12:** Patrones medios mensuales de superaciones horarias del umbral 150  $\mu$ g m<sup>-3</sup> de O<sub>3</sub> en el periodo 2008-2019. El número de superaciones de cada estación está dividido por el número de años de datos válidos de cada estación para facilitar la comparación entre distintas estaciones.

Los patrones diarios de superación del umbral de  $150 \,\mu g$  m<sup>-3</sup> de  $O_3$  para cada hora del día se presentan en la Figura  $\ref{eq:constraint}$ . Se distinguen en este caso dos grupos de estaciones. Por un lado hay estaciones que maximizan el número de superaciones entre las 14h y las 16h UTC (Figura  $\ref{eq:constraint}$ a). Estas estaciones rara vez registran superaciones pasadas las 19h UTC. Son estaciones de carácter rural que reciben las concentraciones más altas de  $O_3$  principalmente por fumigación por crecimiento de la capa de mezcla o por transporte de larga o media distancia y no tanto por formación local. Por otro lado, hay otras estaciones en las que los picos de superaciones se desplazan a las



**Figura 3.13:** Patrones semanales de superaciones horarias del umbral de 150  $\mu$ g m<sup>-3</sup> de O<sub>3</sub> en el periodo 2008-2019. El número de superaciones de cada estación está dividido por el número de años de datos válidos de cada estación para facilitar la comparación entre distintas estaciones.

17-19h UTC y, además a diferencia de las del primer grupo, aparecen superaciones en alguna estación en horas de madrugada (Figura  $\ref{igura}$ ). Las estaciones de este segundo conjunto son más remotas respecto a las fuentes de precursores y, una gran parte de ellas, ubicadas a cotas altas. Esto explicaría que apareciesen superaciones en horas nocturnas al alcanzar masas con altas concentraciones de  $O_3$  zonas elevadas de los valles y mesetas. Las estaciones con un mayor número de superaciones tienen un perfil correspondiente al primer grupo ya que están más expuestas a la llegada de masas de aire con altas concentraciones de  $O_3$  que las del segundo grupo.



**Figura 3.14:** Patrones horarios de superaciones horarias del umbral de 150  $\mu$ g m<sup>-3</sup> de O<sub>3</sub> en el periodo 2008-2019. El número de superaciones de cada estación está dividido por el número de años de datos válidos de cada estación para facilitar la comparación entre distintas estaciones.

#### 3.4.2. Relación de episodios de O<sub>3</sub> con viento en estaciones seleccionadas

Los niveles de O<sub>3</sub> en una zona determinada vienen determinados por la suma de contribuciones como (i) O<sub>3</sub> generado localmente/regionalmente y transportado en las horas inmediatas, (ii) fumigación en superficie de O<sub>3</sub> recirculado verticalmente (estratos de reserva) en la cuenca y acumulado a lo largo del episodio creando un fondo común alto al final del mismo, (iii) O<sub>3</sub> transportado de largas distancias; (iv) O<sub>3</sub> procedente de intrusiones estratosféricas. El aporte de cada componente en un punto concreto es variable en función de múltiples factores como el tipo y posición de fuentes de emisión predominantes, patrones de emisión, latitud, altitud, entorno, meteorología, entre otros.

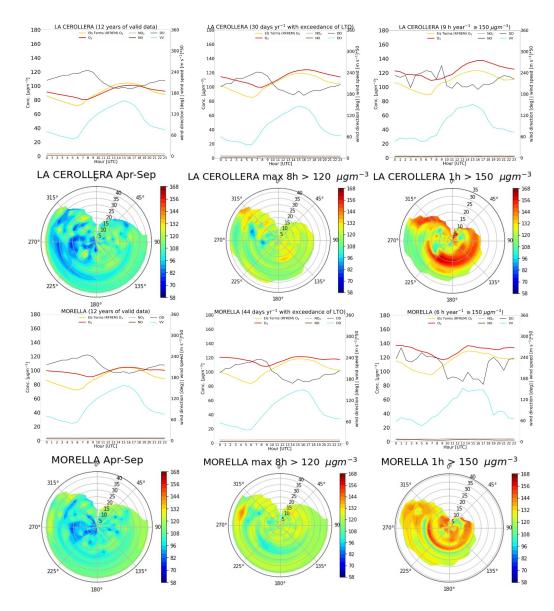
Debemos tener en cuenta que las contribuciones a larga distancia y estratosféricas no permiten margen de actuación sobre ellas por parte de los gestores de calidad del aire mediante planes de mejora de escala local/regional y solo podrían ser reducidas por planes de reducción hemisféricos y continentales. Sin embargo, las dos primeras contribuciones pueden ser gestionadas en base a medidas de reducción a de las fuentes de emisión de precursores que afectan a un área concreta. Por lo tanto, la proporción de contribución de cada componente en los niveles de O<sub>3</sub> en un punto determinará el posible margen de reducción de los mismos.

Se estudian los ciclos promedio diarios de concentración de  $O_3$ , NO y  $O_2$  y condiciones de viento en determinadas estaciones de CA del área de estudio y se comparan con los niveles de  $O_3$  de la estación EMEP de Els Torms. Las estaciones analizadas son una selección de las que registran un mayor número de eventos con altos niveles ( $O_3 \ge 150 \ \mu g \ m^{-3}$  y/o  $O_3 \ 8h \ge 120 \ \mu g \ m^{-3}$ ) en el periodo de estudio: La Cerollera, Escatrón, Juneda, Funes, Tudela, Morella y Montsec.

Para cada estación de CA (Figuras ??-??) se muestran ciclos diarios (i) en días de abrilseptiembre, (ii) en aquellos días en los que se supera el VO de protección de la salud (concentración media móvil 8h diaria máxima mayor de  $\geq 120~\mu g~m^{-3}$ ) y (iii) en aquellos días en los se alcanzan los el umbral de  $150~\mu g~m^{-3}$  de promedio horario. Asimismo, con el objetivo de estudiar las condiciones de viento dominante cuando se registran los máximos niveles de  $O_3$  en las distintas localizaciones, se muestran también diagramas polares de concentración de  $O_3$  con respecto a velocidad/dirección de viento.

La Cerollera y Morella (Figura ??), se encuentran ubicadas en el sector SE del dominio (Bajo Aragón y NW de Castellón). Debido a la ubicación de estas estaciones en cotas elevadas (830 m s.n.m. La Cerollera y 1150 m s.n.m. Morella), los niveles de O<sub>3</sub> se mantienen altos durante todo el día sin mostrar un marcado ciclo a lo largo de la jornada. En La Cerollera las máximas concentraciones se registran entre la 15-16 h UTC con componentes de viento S o SE (origen en el área mediterránea) aunque también del sector NW se origina transporte asociado a episodios elevados de O<sub>3</sub>. Este segundo patrón puede reflejar episodios originados en el VdE central (Zaragoza y su entorno). En Morella las horas promedio de máximos durante los días con superación del umbral 150 horario se adelanta a las 14 UTC mientras que en los días con superación del VO y en los días de abril-septiembre se alcanza el máximo a las 15 h UTC. En esta ubicación los niveles durante los episodios de contaminación se elevan homogéneamente aunque destaca una frecuencia superior de transporte S y SE.

En la zona E del área de estudio se ubican Montsec y Juneda. La ubicación de estas dos estaciones difiere en la altitud (1570 m s.n.m. Montsec y 255 m s.n.m. Juneda). Esto marca diferencias



**Figura 3.15:** Para las estaciones de La Cerollera y Morella: (superior) Ciclos diarios de  $O_3$ ,  $NO_2$ ,  $NO_3$ , velocidad del viento, dirección de viento,  $O_3$  en la estación EMEP de Els Torms) e (inferior) diagramas polares de concentración de  $O_3$  con respecto a condiciones de dirección y velocidad de viento. De izquierda a derecha: promedios de abril-septiembre, días donde se supera el VO (media móvil 8h diaria máxima  $\geq 120 \,\mu \mathrm{g \ m^{-3}}$ ) y días donde se alcanza un promedio horario  $\geq 150 \,\mu \mathrm{g \ m^{-3}}$ .

en el comportamiento diario durante los episodios de contaminación por ozono. En concreto, en Montsec no se observa casi variación de concentraciones de O<sub>3</sub> a lo largo del día con elevación del fondo durante los eventos con superación y máximos a las 17 h UTC lo que refleja la llegada de masas con O<sub>3</sub> elevado de transporte a media o larga distancia. Por su parte en Juneda hay un marcado ciclo con concentraciones que maximizan a las 14-15 h UTC y se mantienen más bajas durante las horas nocturnas y primeras de la mañana como efecto de la titración. En los días con episodios de contaminación el ciclo se hace más marcado. En ambas estaciones es común que los eventos de altos niveles de O<sub>3</sub> se registran con transporte del E y SE aunque en Juneda también se detectan episodios son transporte desde la zona del Ebro central.

En la zona oeste del área de estudio se encuentran las estaciones de Tudela y Funes, ambas en

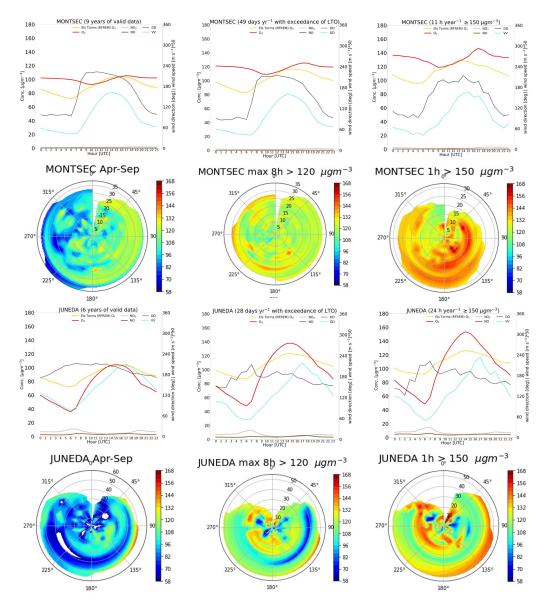
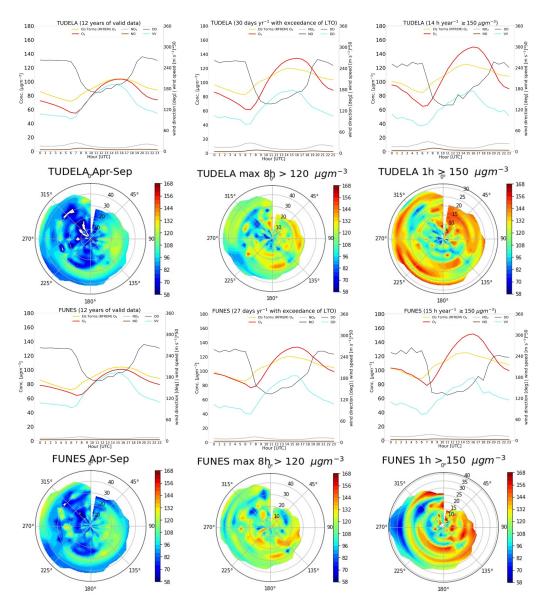


Figura 3.16: Para las estaciones de Montsec y Juneda: (superior) Ciclos diarios de  $O_3$ ,  $NO_2$ , NO, velocidad del viento, dirección de viento,  $O_3$  en la estación EMEP de Els Torms) e (inferior) diagramas polares de concentración de  $O_3$  con respecto a condiciones de dirección y velocidad de viento. De izquierda a derecha: promedios de abril-septiembre, días donde se supera el VO (media móvil 8h diaria máxima  $\geq 120 \ \mu g \ m^{-3}$ ) y días donde se alcanza un promedio horario  $\geq 150 \ \mu g \ m^{-3}$ .

el VdE, muy cercanas a la frontera de la CA de Aragón. A la vista de la frecuencia de episodios de contaminación por  $O_3$  de estas dos estaciones ubicadas en la CA de Navarra, a nivel de gestión sería aconsejable monitorizar la zona occidental del VdE en Aragón dado que sería plausible pensar que puede verse afectada por altas concentraciones de  $O_3$  como Tudela o Funes. Como se ha comentado en el caso de Juneda la altitud de la estación es clave para interpretar la variabilidad de los niveles a lo largo del día. En ambas estaciones se detectan los máximos de  $O_3$  a las 16 h UTC independientemente de si analizamos en general el periodo abril-septiembre o los días con superaciones del VO de 120 o del umbral horario de 150  $\mu$ g m<sup>-3</sup>. A la vista de ello debemos pensar que son estaciones receptoras de  $O_3$  transportado a nivel regional, especialmente desde la zona del SE, es decir, desde la zona del VdE central como se puede observar en los diagramas



**Figura 3.17:** Para las estaciones de Tudela y Funes: (superior) Ciclos diarios de  $O_3$ ,  $NO_2$ ,  $NO_3$ ,  $NO_4$ ,  $NO_5$ ,  $NO_5$ ,  $NO_6$ ,  $NO_7$ ,  $NO_8$ ,  $NO_9$ , NO

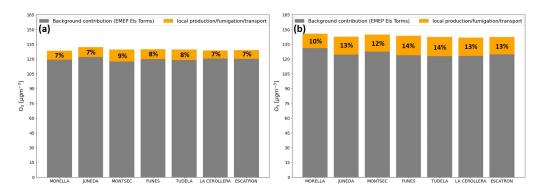
polares de concentración. Esto sería indicativo de aportes desde Zaragoza y las CT ubicadas en el curso del río. Otro aspecto importante análogo al de Juneda es el hay marcado ciclo diario con concentraciones más bajas durante la noche y primeras horas de la mañana como efecto de la titración.

## 3.4.3. Episodios de O<sub>3</sub> y márgenes de reducción

Tomando como referencia los niveles de  $O_3$  de fondo medidos en la estación EMEP de Els Torms, se han estimado los márgenes máximos de reducción de  $O_3$  durante los días de episodio. Estos márgenes se han estimado como la diferencia entre los niveles de  $O_3$  de fondo y los niveles máximos de  $O_3$  medidos en cada una de las estaciones seleccionadas. De esta forma se puede

evaluar preliminarmente sobre qué porcentaje de los niveles se podría actuar en base a la reducción de emisión de precursores a escala local/regional.

En particular, se cuantifican los márgenes haciendo la diferencia promedio entre los máximos 8h registrados en días de episodio en cada una de las estaciones y los niveles en Els Torms (estación EMEP de fondo regional). Se han realizado estos cálculos para los días de episodio: tanto los días con superación del VO (Figura ??a) como los días de superación del umbral de 150 μg m<sup>-3</sup> (Figura ??b). Como se ha mencionado, las distintas contribuciones a los niveles de O<sub>3</sub> totales en cada estación, están calculadas a partir de las medias 8h máximas diarias y representadas con diagramas de barras apiladas. Por un lado, en color naranja, se representa el O<sub>3</sub> aportado local o regionalmente el mismo día (formado por una combinación de producción, transporte y/o fumigación de estratos de reserva en altura). Por otro lado, en color gris, se muestra el O<sub>3</sub> procedente de las contribuciones de fondo (combinación de ozono transportado de largas distancias, procedente de intrusiones estratosféricas y/o procedente de procesos de recirculación/acumulación en un plazo temporal de días en el caso de haberse dado las condiciones meteorológicas adecuadas).



**Figura 3.18:** Cuantificación de contribuciones promedio a los niveles de  $O_3$  totales observados en las distintas estaciones de CA los días que se generan episodios de superación del VO (a) y los días en los cuales se supera el umbral de 150  $\mu$ g m<sup>-3</sup> (b) durante el periodo 2008-2019. Color naranja: combinación de  $O_3$  de producción local, transporte y/o fumigación de estratos de reserva en altura. Color gris: aportes de fondo (combinación de  $O_3$  de transporte de largas distancias, intrusiones estratosféricas y/o parte de recirculación/acumulación.

Tanto en días de superación del VO como en los de superación del umbral de  $150 \,\mu \mathrm{g} \,\mathrm{m}^{-3}$ , se vuelve a observar una homogeneidad en las contribuciones locales/regionales independientemente de la localización geográfica e, incluso, la altitud de la estación. Estas contribuciones oscilan entre el 7 y el 9 % (8-12  $\mu \mathrm{g} \,\mathrm{m}^{-3}$ )en los días de superación del VO alcanzando el 10-14 % (entre  $16 \,\mathrm{y} \,20 \,\mu \mathrm{g} \,\mathrm{m}^{-3}$ ) durante los días de episodios más agudos (superaciones de  $150 \,\mu \mathrm{g} \,\mathrm{m}^{-3}$ ). Esta homogeneidad en el comportamiento de estaciones ubicadas a cientos de km de distancia denotan el carácter eminentemente receptor de la región que se está estudiando y la falta de patrones de circulación regionales (brisas) que refuercen la recirculación y envejecimiento de masas de aire que ayuden a incrementar las concentraciones de ozono.

## Capítulo 4

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Este informe muestra los resultados de la interpretación de niveles de O<sub>3</sub> de acuerdo al análisis de series temporales del periodo 2008-2019, así como de meteorología en Aragón y su entorno. A continuación, se exponen las conclusiones más relevantes.

- 1. En la zona de estudio los vientos en los meses de abril a septiembre son de componente dominante O o NO adaptándose en cada zona a la topografía local. También existe una componente opuesta (levante) con velocidades de viento más suaves. Esta componente secundaria es más frecuente durante el día que por la noche.
- 2. La variabilidad espacial de los niveles promedio de NO y NO<sub>2</sub>, precursores de O<sub>3</sub>, está determinada por el carácter de la estación con niveles más elevados en cabinas de tráfico de Zaragoza y niveles muy inferiores en estaciones de fondo rural. En la red autonómica los niveles promedio más elevados de NO y NO<sub>2</sub> se encuentran en Alagón por encontrarse junto a un ramal de autovía.
- 3. En toda la zona de estudio se encuentran altos valores de percentil 93,2 (20 de las 30 estaciones estudiadas superan los 115  $\mu$ g m<sup>-3</sup> de este parámetro). Ello supondría superar o estar muy cerca de hacerlo el VO de protección a la población. Los valores más elevados se registran en estaciones rurales en zonas montañosas al este del dominio Montsec, Morella, Coratxar o La Cerollera (122-129  $\mu$ g m<sup>-3</sup>). También al oeste de la zona de estudio se observan altos niveles del percentil 93,2 en Tudela y Funes (122  $\mu$ g m<sup>-3</sup>).
- 4. Todas las estaciones registran anualmente, en promedio, superaciones diarias del VO. Destacan Montsec y Morella con 49 y 44 días al año, respectivamente y, en Aragón La Cerollera (30) y Castelnou (25).
- 5. Los valores extremos (percentil 99 de los máximos diarios de los promedios 8h) destacan en algunas estaciones con alto número de superaciones del VO como Montsec, Morella o La Cerollera pero también en otras en las que la titración nocturna evita que los niveles promedio suban pero registran episodios diurnos fuertes como Juneda, Funes o Tudela. Los percentiles 99 en las estaciones destacadas van entre 138 y 143 μg m<sup>-3</sup>.

- 6. Los máximos se registran en Junio y Julio por la alta insolación y altas temperaturas. En Aragón los niveles destacan Junio y Julio en Castelnou por encima de Huesca o Bujaraloz. Fuera de Aragón los valores mensuales promedio en verano son algo más elevados como en Juneda, Montsec, Tudela, Els Torms, Zorita o Funes (entre 108 y 115  $\mu$ g m<sup>-3</sup>).
- 7. Las condiciones de altitud y proximidad a fuentes de emisión condicionan el perfil diario de O<sub>3</sub>. Estaciones en cotas muy elevadas y alejadas de las fuentes de precursores muestran poca amplitud de concentraciones diarias con niveles estivales nocturnos altos por la presencia de capas de reserva ricas en O<sub>3</sub> (Montsec, Morella, Coratxar, La Cerollera y Torrelisa). Otras esta muestran amplitud en sus concentraciones por su ubicación en cotas bajas que permite que compuestos consumidores de O<sub>3</sub> alcanzar dichas ubicaciones durante la noche. Sin embargo los niveles máximos diarios pueden ser elevados (Juneda o Castelnou).
- 8. Excepto en Zaragoza ciudad, durante los fines de semana los niveles máximos se reducen ligeramente respecto a los de los días laborables mientras que los niveles mínimos nocturnos aumentan. Esto es general en las estaciones de Aragón fuera de la ciudad de Zaragoza. Ello es efecto del reducción de las emisiones de NO y la menor titración. La reducción de los niveles diurnos sugieren que una aportación significativa de O<sub>3</sub> en las mismas de transporte local-regional y/o una reducción de emisión de precursores durante sábado y domingo.
- 9. Los niveles de O<sub>x</sub> (O<sub>3</sub> + NO<sub>2</sub>) de Julio se han analizado mostrando comportamientos homogéneos en la mayoría de las estaciones ya que Aragón y su entorno se trata de una zona principalmente receptora de ozono formado en otras regiones. El O<sub>3</sub> maximiza a las 15 y las 16 UTC (que son las 17-18 UTC en estaciones de fondo en cotas altas) por el transporte de masas de aire cargadas con O<sub>3</sub>. En general, la formación local de O<sub>3</sub> es reducida ya que no hay máximos de O<sub>x</sub> en el entorno de las 12 UTC, hora de mayor insolación.
- 10. Los promedios 8h de O<sub>3</sub> muestran a nivel anual muestran características semejantes en todas las estaciones con máximos en Junio y Julio. En estaciones de tipo urbano o suburbano en con impacto del tráfico es importante. En ellas, los niveles invernales son bajos (fuerte titración en invierno) y los máximos de verano son moderados (Estaciones de la capital la de Monzón). Por otro lado en las estaciones rurales con bajo impacto de tráfico (Montsec, Coratxar, Morella, Vilafranca y Torrelisa), tienen niveles más elevados en verano y en invierno. También hay otras estaciones que tienen un comportamiento intermedio.
- 11. En los meses cálidos los niveles máximos 8h los fines de semana son más elevadas que durante los días laborables por el descenso de las emisiones de NO. En las estaciones de tipo rural, mucho menos influenciadas por el tráfico, las subidas durante el fin de semana en los meses fríos es menos marcada. En las estaciones de ámbito urbano en los meses de verano, el comportamiento es inverso. En las estaciones rurales los mínimos semanales se registran el fin de semana o el lunes.
- 12. Se han estudiado las tendencias de los promedios de abril-septiembre del periodo 2008-2019 para NO, NO<sub>2</sub> y O<sub>3</sub>. Hay descenso generalizado de los niveles promedio de NO en 9 estaciones (en la red autonómica de Aragón, Monzón, La Estanca, Monagrega, Castelnou e

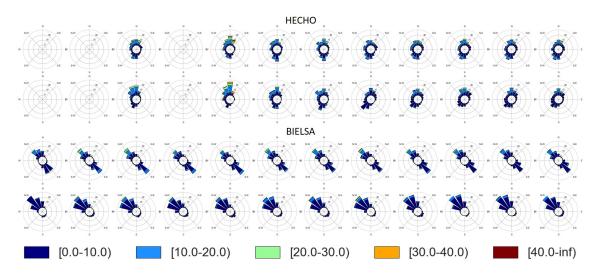
- Hijar) con significación estadística y promedio de reducción de -4,9 % año<sup>-1</sup>. En Renovales sí hay tendencia de NO creciente significativamente.
- 13. Cinco estaciones, mayoritariamente urbanas, muestran reducciones significativas estadisticamente (promedio -2,1 % NO<sub>2</sub> año<sup>-1</sup>). De ellas, destacan Huesca y Alagón de la red gestionada por el Gobierno de Aragón.
- 14. No hay tendencias significativas claras en niveles promedio y extremo de O<sub>3</sub>. Dominan los emplazamientos con subidas (8 con promedio de 1,3 % año<sup>-1</sup> de los que Castelnou, Teruel y Bujaraloz están en redes autonómicas) respecto a los que registran bajadas (Monzón, La Estanca y Caspe con media de -1,4 % año<sup>-1</sup>) en los niveles promedio de O<sub>3</sub> mientras que en los niveles extremo, ocurre lo contrario. Cinco con descenso y media -1,0 % año<sup>-1</sup> (La Estanca, Monagrega y Caspe en red autonómica) frente a 3 (solo Teruel en Aragón) con incremento con promedio de 0,7 % año<sup>-1</sup>. Por último el descenso en la titración no parece extremadamente relevante para explicar las subidas de O<sub>3</sub>.
- 15. Las superaciones del umbral de información de  $180 \mu g \text{ m}^{-3}$  son anecdóticas en número en Aragón y su entorno (sólo se registraron 16 entre todas las estaciones en 2008-2019 y, de ellas, sólo 4 en Aragón).
- 16. Fijando el umbral de 150 μg m<sup>-3</sup> como representativo de una situación episódica, se ha podido determinar que las estaciones con mayor número de superaciones se ubican fuera de Aragón (Juneda, Funes, Tudela y Montsec con entre 10 y 23 sup. año<sup>-1</sup>). En Aragón sólo se acerca La Cerollera con 8 sup. año<sup>-1</sup>. siendo el el Bajo Aragón la parte más afectada por episodios extremo.
- 17. Las superaciones del umbral de 150  $\mu$ g m<sup>-3</sup> destacaron en 2010 (10.2 sup. por año y estación) y 2015 (11.2 sup. por año y estación). Estos años registraron fuertes olas de calor. Se observa una tendencia a la disminución de superaciones anuales aunque sin significación estadística. En estaciones aragonesas destacaron los años 2010 (en Caspe y La Cerollera), 2013 (en La Cerollera) y 2015 (en Teruel).
- 18. Existen dos perfiles de estaciones de acuerdo a la distribución de las superaciones del umbral 150. Algunas tienen concentradas en los meses de Junio y Julio (en la red autonómica destacan en este grupo Castelnou y Alagón) y otras, mayoritariamente industriales, registran superaciones casi con la misma frecuencia en todos los meses desde abril a septiembre (de las redes de Aragón en este grupo están La Cerollera, Monagrega, Bujaraloz, Caspe y Escatrón).
- 19. Los episodios de ozono se producen con más frecuencia relativa en días de la semana laborable que en los fines de semana en la mayoría de estaciones por efecto del transporte a nivel regional y las reducciones de emisiones de precursores durante sábado y domingo. En las estaciones con mayor influencia del tráfico (en menor número que el resto), la reducción de las emisiones de NO generan un mayor número de episodios en fin de semana (principalmente el sábado).

- 20. En las estaciones de carácter rural no remoto (la mayoría) las superaciones del umbral de 150 μg m<sup>-3</sup> de O<sub>3</sub> se registran principalmente entre las 14h y las 16h UTC por fumigación al crecer la capa de mezcla o por transporte de larga o media distancia y no tanto por formación local. En las estaciones más remotas situadas en cotas elevadas se producen por transporte de masas de aire envejecidas hacia zonas elevadas desde los valles y mesetas (ejemplo en Aragón sería La Cerollera).
- 21. Se ha analizado la relación entre el viento y las altas concentraciones de ozono (superaciones de 150 μg m<sup>-3</sup> y del VO) en las estaciones seleccionadas donde más número de dichos eventos se han producido: La Cerollera, Escatrón, Juneda, Funes, Tudela, Morella y Montsec.
- 22. En La Cerollera y Morella, estaciones en alta cota ubicadas en el sector SE del dominio, se observa que los niveles se mantienen altos todo el día durante los episodios de contaminación maximizando a las 15-16h UTC en La Cerollera y a las 14h UTC en Morella. En ambas, el transporte predominante durante los episodios es S-SE aunque en La Cerollera también se en el sector NW se origina transporte asociado a episodios elevados de O<sub>3</sub> (puede que desde el VdE central).
- 23. En Montsec y Juneda, en el E del dominio, el comportamiento difiere por la altitud de ambas estaciones (Montsec elevada, Juneda no). En Montsec no se observa casi variación de y máximos a las 17h UTC con llegada de masas de transporte a media o larga distancia y en Juneda hay un marcado ciclo con concentraciones que maximizan a las 14-15 h UTC y se mantienen bajas en horas nocturnas. Los eventos de altos niveles de O<sub>3</sub> se registran con transporte del E y SE aunque en Juneda también se detectan episodios son transporte desde la zona del VdE central.
- 24. En la zona oeste del área de estudio se encuentran las estaciones de Tudela y Funes, ambas en el VdE, en cotas bajas y cercanas a la frontera de la CA de Aragón. En ambas estaciones se detectan los máximos a las 16 h UTC en días de episodio lo que indica que son estaciones receptoras de O<sub>3</sub> transportado a nivel regional desde la zona del VdE central (aportes de Zaragoza o de CT ubicadas en el valle).
- 25. Se han estimado los márgenes máximos de reducción de O<sub>3</sub> en las 7 estaciones seleccionadas tomando como referencia los niveles en la estación EMEP de Els Torms. En concreto se ha estimado la contribución local/regional durante los episodios de superación del umbral 150 μg m<sup>-3</sup>, en los días de superación del VO. En ambos casos se muestra una gran homogeneidad en las estaciones estudiadas independientemente de la localización geográfica e, incluso, la altitud de la estación. En días de superación del VO, la contribución local/regional oscilan entre el 7 y el 9 % (8-12 μg m<sup>-3</sup>) mientras que en los eventos más extremos (superaciones de 150 μg m<sup>-3</sup>), alcanza el 10-14 % (16-20 μg m<sup>-3</sup>) durante los días de episodios más agudos. Esta homogeneidad en el comportamiento denota el carácter eminentemente receptor de la región.

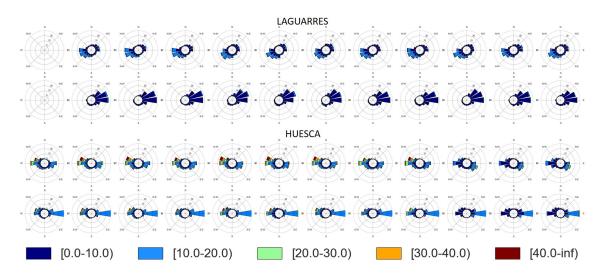
Además también es aconsejable realizar una serie de recomendaciones sobre futuros trabajos y/o estudios a medio o largo plazo:

- 1. Sería aconsejable monitorizar los niveles de O<sub>3</sub> en la zona oeste del VdE en la zona limítrofe con La Rioja y Navarra dado que hay indicios de que se registren altas concentraciones a la luz de los niveles de Tudela o Funes.
- 2. Sería también de interés acometer una campaña con captadores pasivos orientada a la medición de ozono y de sus principales precursores (NO<sub>x</sub> y COVs). Aunque el objetivo sería caracterizar espacialmente los niveles de los citados contaminantes, en particular la campaña sería de utilidad para conocer los niveles de O<sub>3</sub> de la zona oeste de Aragón donde no hay apenas estaciones de monitorización pero en las cabinas fronterizas de Navarra y La Rioja se registran episodios de contaminación por O<sub>3</sub>. La campaña de dosímetros debería incluir una red algo más densa en las zonas en las que, en este estudio, se han observado los niveles más elevados de ozono.
- 3. Con el objetivo de profundizar en el conocimiento de la fenomenología de los episodios de contaminación por O<sub>3</sub> troposférico en el VdE, sería relevante realizar una campaña intensiva de de verano en la que se midiesen simultáneamente parámetros de interés en superficie y en altura. Se han realizado varias de estas campañas en puntos de la PIB (Plana de Vic, Madrid, Valle del Guadalquivir), obteniendo importantes conclusiones.
- 4. La puesta en marcha un sistema de modelización fotoquímica adaptado a la CA de Aragón sería importante como herramienta para la investigación y la gestión (medidas de mitigación) de la contaminación sobre O<sub>3</sub> y otros contaminantes.

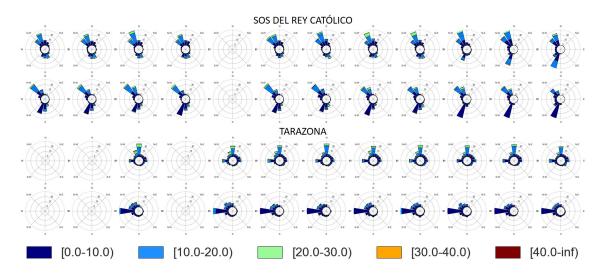
## **ANEXOS**



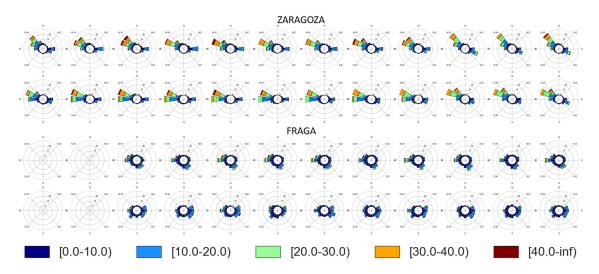
**Figura 4.1:** Rosas de viento anuales de abril a septiembre de las estaciones meteorológicas de la AEMET: Hecho y Bielsa. En la parte superior se muestra el periodo diurno y en la inferior el periodo nocturno. De izquierda a derecha se presentan los diferentes años del periodo 2008-2019 en orden creciente.



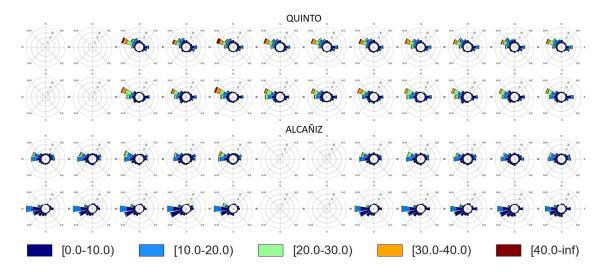
**Figura 4.2:** Rosas de viento anuales de abril a septiembre de las estaciones meteorológicas de la AEMET: Laguarres y Huesca. En la parte superior se muestra el periodo diurno y en la inferior el periodo nocturno. De izquierda a derecha se presentan los diferentes años del periodo 2008-2019 en orden creciente.



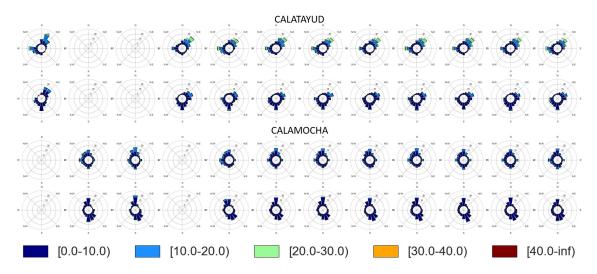
**Figura 4.3:** Rosas de viento anuales de abril a septiembre de las estaciones meteorológicas de la AEMET: Sos del Rey Católico y Tarazona. En la parte superior se muestra el periodo diurno y en la inferior el periodo nocturno. De izquierda a derecha se presentan los diferentes años del periodo 2008-2019 en orden creciente.



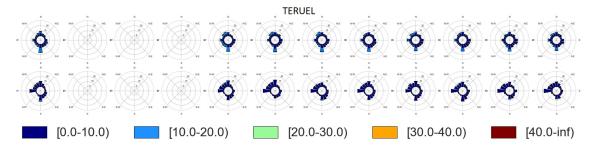
**Figura 4.4:** Rosas de viento anuales de abril a septiembre de las estaciones meteorológicas de la AEMET: Zaragoza (Aeropuerto) y Fraga. En la parte superior se muestra el periodo diurno y en la inferior el periodo nocturno. De izquierda a derecha se presentan los diferentes años del periodo 2008-2019 en orden creciente.



**Figura 4.5:** Rosas de viento anuales de abril a septiembre de las estaciones meteorológicas de la AEMET: Quinto de Ebro y Alcañiz. En la parte superior se muestra el periodo diurno y en la inferior el periodo nocturno. De izquierda a derecha se presentan los diferentes años del periodo 2008-2019 en orden creciente.



**Figura 4.6:** Rosas de viento anuales de abril a septiembre de las estaciones meteorológicas de la AEMET: Calatayud y Calamocha. En la parte superior se muestra el periodo diurno y en la inferior el periodo nocturno. De izquierda a derecha se presentan los diferentes años del periodo 2008-2019 en orden creciente.



**Figura 4.7:** Rosas de viento anuales de abril a septiembre de la estación meteorológica de la AEMET de Teruel. En la parte superior se muestra el periodo diurno y en la inferior el periodo nocturno. De izquierda a derecha se presentan los diferentes años del periodo 2008-2019 en orden creciente.