

Análisis de la concentración de O₃ y NO_x (NO + NO₂) en Andalucía Occidental

Autor principal: Benito De la Morena Carretero

Institución: Estación de Sondeos Atmosféricos, El Arenosillo - INTA.

Teléfono:

E-mail: morenacb@inta.es

Otros autores: D. Domínguez, J.A. Adame, J.A., F. Vaca), J. Contreras, A. Lozano y J.P. Bolívar

Resumen

El ozono (O_3) y sus precursores, entre los que destacan los óxidos de nitrógeno (NO_x), se tornan como uno de los principales contaminantes de la troposfera. La exposición a estos gases provoca efectos adversos para la salud humana, la vegetación y el medio ambiente en su conjunto.

En el sudoeste de la península Ibérica, se dan las condiciones óptimas para favorecer la formación de ozono superficial a partir de los óxidos de nitrógeno: elevados niveles de radiación solar a lo largo del año, fenómenos de brisa (costera y de valle-montaña), presencia de importantes complejos industriales, intenso tráfico de vehículos, etc.

Con el fin de conocer la variación espacial y temporal que presenta el ozono y los óxidos de nitrógeno, se han analizado los registros de cinco estaciones pertenecientes a la Red de Vigilancia de Calidad del Aire que posee la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía en la provincia de Huelva y en la ciudad de Sevilla, durante el período de 2003 a 2005.

Se ha estudiado la evolución media anual, observándose que en el caso del ozono, los mayores registros se obtienen durante los meses de verano (julio-agosto). Por el contrario, los óxidos de nitrógeno muestran un comportamiento inverso con máximos en los meses de invierno (diciembre-enero). Del estudio de la evolución media diaria se ha obtenido que los máximos diarios de ozono se observan a primeras horas de la tarde (15-17 horas), mientras que el ciclo diario de los óxidos de nitrógeno está influenciado por el tráfico de vehículos. De este modo, a lo largo del día se detectan dos períodos en los que los niveles son altos: a primera hora de la mañana (8-10 horas) y otro durante la tarde-noche (20-22 horas). Resaltar que los niveles de ozono detectados en zonas rurales son más elevados que los obtenidos en zonas urbanas. En el caso de los óxidos de nitrógeno este comportamiento se invierte, siendo las concentraciones de las estaciones urbanas superiores a las rurales.

1. Introducción.

El ozono en las capas bajas de la atmósfera se forma a partir de unas sustancias primarias conocidas como precursores, los cuales son los óxidos de nitrógeno ($NO + NO_2$) y los compuestos orgánicos volátiles (Finlayson-Pitts y Pitts, 2000). Estas sustancias en presencia de luz solar y con unas condiciones meteorológicas favorables, como son temperaturas medias-altas (entre 20 y 25° C) y una atmósfera en la que se desarrollen procesos de mezclado vertical, reaccionan entre sí, dando lugar a la formación de una serie de sustancias conocidas como contaminantes fotoquímicos (Colbeck y Mackenzie, 1994).

El ozono es sin duda el contaminante, que por sus propiedades y mayor concentración dentro de las sustancias fotoquímicas que se generan, el que más afección produce en la baja atmósfera. Al ser una sustancia con un alto poder oxidante, en concentraciones elevadas (superiores a 200 $\mu g \cdot m^{-3}$) o en concentraciones medias-altas (120 $\mu g \cdot m^{-3}$) durante un período de exposición prolongado, puede producir problemas en la salud humana, ecosistemas vegetales y materiales.

En el sur de la península Ibérica se registran las temperaturas más altas, los niveles más bajos de precipitación y los índices de radiación solar más elevados (MMA, 2001), condiciones todas ellas necesarias para que se produzca la contaminación fotoquímica. Pero para que se produzca este tipo de contaminación se tienen que tener, además de estas condiciones, las sustancias precursoras ya mencionadas.

Andalucía es, por tanto, una región propicia para este tipo de contaminación. Desde finales de los años noventa, la Consejería de Medio Ambiente (CMA) de la Junta de Andalucía ha intensificado la monitorización y el estudio de este tipo de contaminación en la comunidad autónoma. Entre los años 2002 y 2003 se ha duplicado el número de puntos de medición de ozono superficial y de óxidos de nitrógeno, contándose en la actualidad con 47 estaciones de medida de estas sustancias, dentro de las más de 80 estaciones que pertenecen a la Red de Vigilancia y Control de la Calidad del Aire.

Desde el año 2001 se vienen realizando campañas de medición con captadores difusivos, ampliando así las zonas de Andalucía en las que se dispone de información sobre la calidad del aire.

En el año 2004 se ha firmado un convenio de colaboración entre el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA) y la CMA de la Junta de Andalucía, con el fin de analizar el comportamiento que muestra el ozono y sus precursores en Andalucía, que cuenta con la colaboración científica del Dpto. de Física Aplicada de la Universidad de Huelva. Estos son los trabajos más destacados que se están llevando a cabo en los últimos años en Andalucía en materia de contaminación fotoquímica.

Para tener conocimiento del comportamiento que muestra el ozono superficial en esta área de estudio, es necesario analizar los factores que más le afectan, desde la meteorología a los niveles y comportamiento de sus precursores.

Se ha comenzado a estudiar las series de medidas de aquellos emplazamientos ubicados en la zona occidental de la Comunidad, por ser esta área la que presenta las concentraciones más elevadas de ozono.

En esta zona occidental se encuentra el valle del Guadalquivir, el cual desemboca en el litoral de Huelva y Cádiz (figura 1). En las zonas costeras de estas dos provincias, la dinámica atmosférica durante los meses de primavera y verano viene dominada mayoritariamente por el régimen de brisas, procesos de origen local que se pueden extender muchos kilómetros tierra adentro, uniéndose en determinadas condiciones a las brisas de valle que se generen. De esta forma, y bajo este tipo de condiciones se pueden transportar sustancias contaminantes desde la zona de la costa hacia el interior del valle.

En la zona de la costa de Huelva y en concreto en las cercanías de la ciudad, se ubican tres importantes complejos industriales, los cuales emiten diversas sustancias contaminantes, a lo que hay que añadir un importante parque automovilístico, tanto en la zona de Huelva como en la zona de Cádiz. A estas emisiones habría que sumar las procedentes del tráfico que se genera en el área metropolitana de Sevilla.

Por todo ello, se tienen emisiones en la zona de la costa que se transportan hacia el interior del valle, y en este traslado se puede producir la formación de ozono a partir de los precursores emitidos. Esta masa contaminada al llegar a la zona de Sevilla se recarga

de nuevos contaminantes, produciéndose en esta gran área urbana altas concentraciones de ozono.

La dinámica atmosférica de toda esta región, las características y el comportamiento que presentan las series de ozono y de óxidos de nitrógeno, es lo que se está estudiando desde hace varios años (Adame et al., 2004; Adame et al., 2006 a).

Como parte de estos trabajos, se está analizando la relación existente entre las concentraciones de ozono y sus precursores, en concreto los óxidos de nitrógeno. En esta comunicación se presentan los resultados obtenidos de analizar la variabilidad que presentan las concentraciones de ozono, monóxido de nitrógeno y dióxido de nitrógeno, en cinco estaciones de la Red de Calidad del Aire ubicadas en la zona occidental de Andalucía.

2. Materiales y métodos.

Para el desarrollo de este trabajo se han utilizado cinco emplazamientos de medida, tres de ellos están ubicados en la provincia de Huelva y los dos restantes en la ciudad de Sevilla. Los tres de Huelva son El Carmen (CRM), la Rábida (RBD) y El Arenosillo (ARE), mientras que los de Sevilla son Torneo (TOR) y Santa Clara (SCL).

La estación de El Carmen se encuentra en la ciudad de Huelva, siendo por tanto una estación típicamente urbana, influenciada por las emisiones procedentes del tráfico de la propia ciudad y de las localidades cercanas, pero también por las emisiones industriales. La estación de la Rábida, ubicada a escasos kilómetros de uno de los tres polígonos industriales que se sitúan en el litoral de Huelva, está enormemente afectada por las emisiones industriales. La estación de El Arenosillo, se ubica a unos 35 km de la ciudad de Huelva, en la zona costera hacia el sudeste (véase figura 1). Esta sería una estación rural, pero que se ve sometida a las emisiones tanto procedentes del tráfico como de la zona industrial.

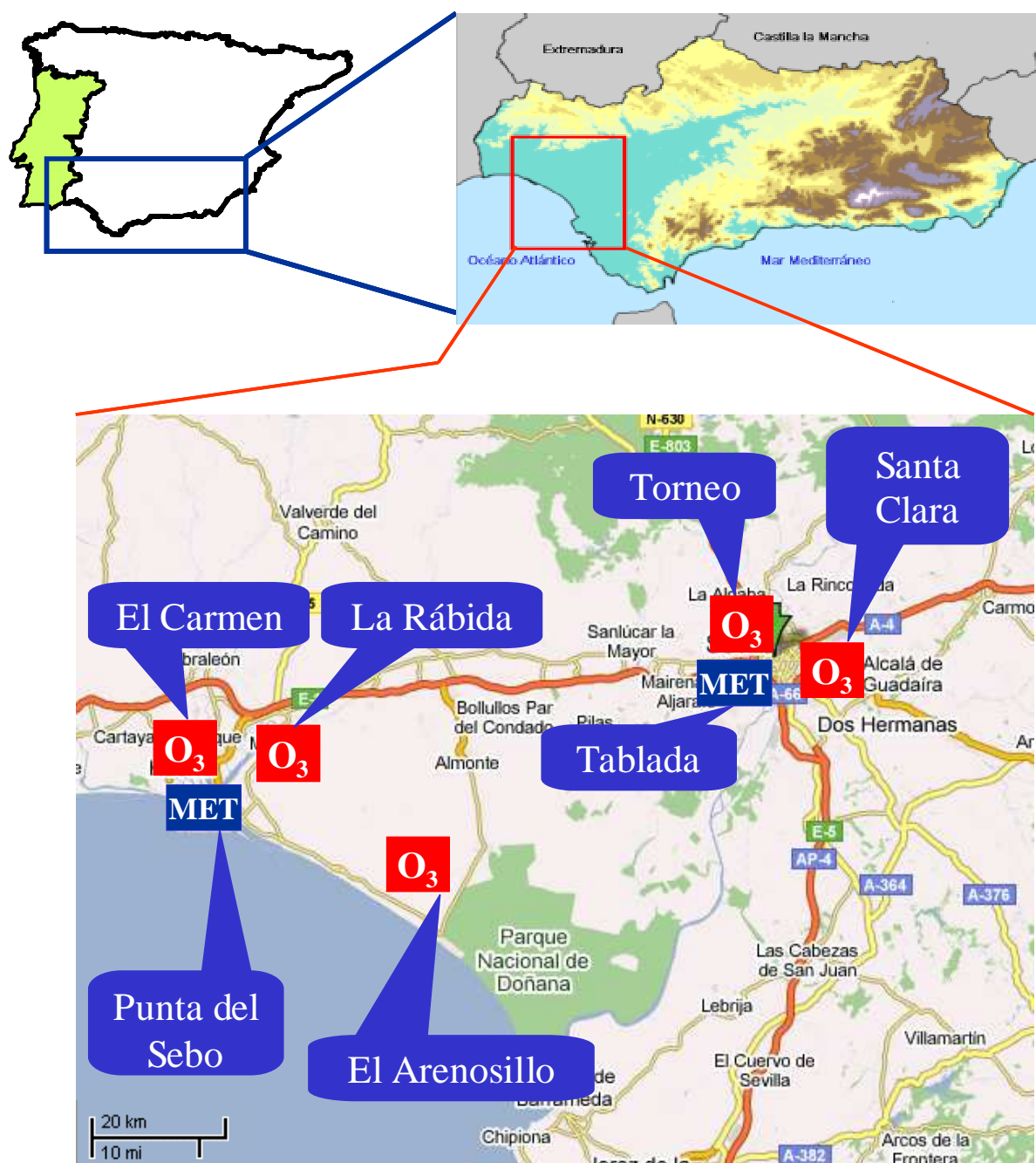


Figura 1. Estaciones de medida de ozono - óxidos de nitrógeno y torres meteorológicas en las provincias de Huelva y Sevilla.

En la provincia de Sevilla se ubican diversas estaciones de medición de la calidad del aire, pero la mayoría de ellas se sitúan en la zona metropolitana de Sevilla. Se han seleccionado dos de estas estaciones.

Torneo es un emplazamiento ubicado en las cercanías del río Guadalquivir, muy cercana al centro de la ciudad y enormemente afectada por las emisiones del tráfico. Santa Clara es la segunda estación que se analiza. Se encuentra también en la propia ciudad, en la zona este de la misma, siendo considerada como una estación suburbana.

De esta forma se tienen cinco estaciones de diferente carácter, urbanas (El Carmen y Torneo), suburbanas (Santa Clara), emplazamientos cerca de una zona industrial (La Rábida) y un estación rural como (El Arenosillo). Por tanto, se podrán comparar los registros de unas y otras atendiendo a la ubicación que tienen y por las emisiones o transporte de contaminantes que les afectan. Además, se pretende comparar las concentraciones de la zona costera de Huelva, con las del área metropolitana de Sevilla, así como los niveles de estos contaminantes en dos estaciones típicamente urbanas y/o suburbanas de Huelva y Sevilla.

El período de estudio ha sido el comprendido entre los años 2003 y 2005, aunque en el caso de los registros de NO_x de las tres estaciones de Huelva se han utilizado los datos del año 2005, puesto que no se disponía de datos en estos emplazamientos en años precedentes.

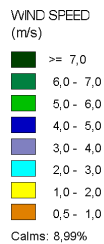
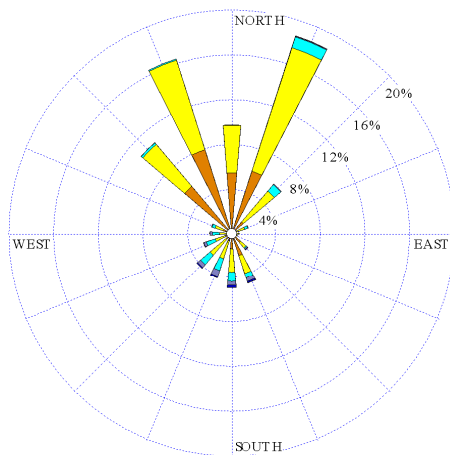
Para realizar una correcta interpretación de las concentraciones de estos contaminantes, es necesario conocer el entorno meteorológico y los escenarios meteorológicos típicos de la región de estudio. Desde hace algunos años se está estudiando el régimen de viento de la zona de Huelva, gracias a los registros de viento de la torre meteorológica de Punta del Sebo, perteneciente a la Red de Vigilancia y Control de la Calidad del Aire y la misma metodología se está aplicando con los datos de la torre de Tablada perteneciente al Instituto Nacional de Meteorología, ubicada en el sur de la ciudad de Sevilla. En ambos casos se han utilizados los datos de viento del período 2000-2005.

3. Resultados y discusión.

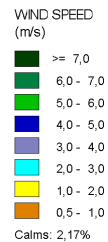
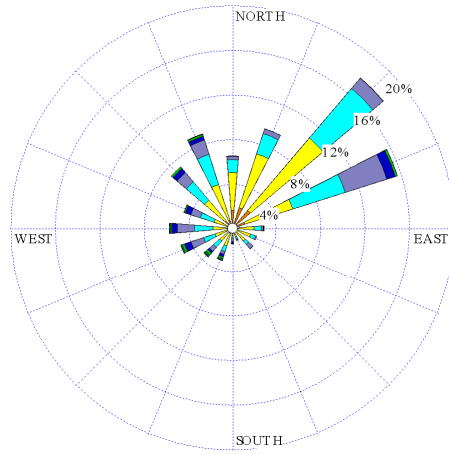
3.1. Régimen de viento del área de estudio.

Para analizar el régimen de viento de la región de estudio se han utilizado los datos horarios registrados en las torres meteorológicas de Punta del Sebo y de Tablada. Se presentan en la figura 2 las rosas estacionales obtenidas. Se ha considerado el invierno a los meses de diciembre, enero y febrero, la primavera de marzo a mayo, el verano del mes de junio al mes de agosto, y el otoño de septiembre a noviembre.

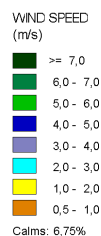
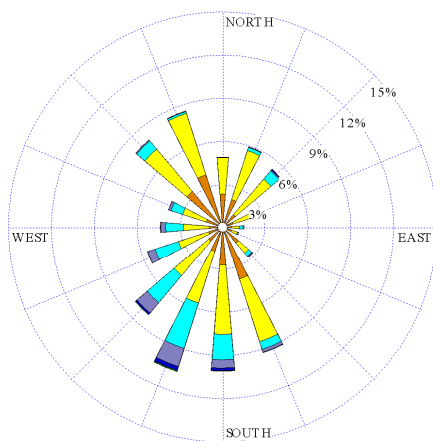
En invierno la península Ibérica se encuentra barrida por masas de aire que proceden mayoritariamente de la zona norte, bien de centro y norte de Europa, como del Atlántico norte (Sánchez, 1993). Por esta razón las direcciones más frecuentes que se registran en la zona sur de la península proceden del norte. En el caso de la zona de Sevilla destacan las direcciones del NNE y NW, mientras que, en la zona del litoral de Huelva hay un predominio tanto del NE-ENE como del NNW. Aunque éstas sean las direcciones más frecuentes, son las que registran las velocidades más bajas. Las velocidades más altas se miden en direcciones mucho menos frecuentes, las cuales presentan componente sur. Se ha obtenido que las velocidades que se miden en la zona del litoral de Huelva son más elevadas que las registradas en la zona de Sevilla, debido a que las masas atlánticas, que son las que causan estas velocidades, cuando llegan a la zona de Sevilla ya se encuentran más debilitadas.



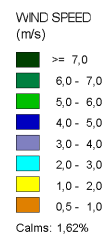
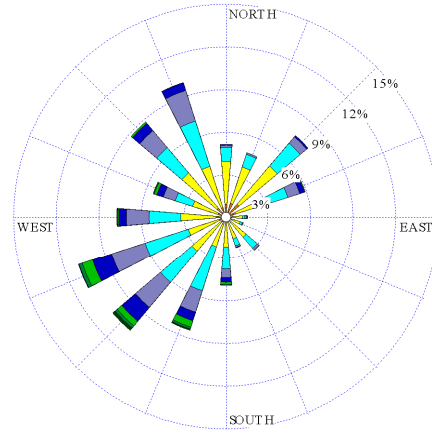
Invierno. Tablada.



Invierno. Punta del Sebo.



Primavera. Tablada.



Primavera. Punta del Sebo.

Figura 2. Rosas de viento de los meses de invierno (diciembre a febrero) y primavera (marzo a mayo) de las torres meteorológicas de Tablada (Sevilla) y Punta del Sebo (Huelva). Período 2000-2005.

Durante los meses de primavera se registra viento con una mayor distribución de direcciones en ambos emplazamientos. La causa de estos hechos pudiera deberse a una mayor superposición y variabilidad de situaciones atmosféricas, puesto que en esta época del año se tienen tanto situaciones de carácter puramente sinóptico, como procesos mesoescalares, los cuales comienzan a desarrollarse con cierta intensidad en los últimos meses de primavera.

En la torre de Tablada existe un predominio de las direcciones procedentes del sur, concretamente desde el SSW y SW, las cuales coinciden con las registradas en la torre de Punta del Sebo.

Se tienen masas procedentes tanto del norte como del sur, mayoritariamente del Atlántico. Las velocidades más altas de nuevo proceden del sur, dominando la dirección del SW como aquella que trae las mayores rachas de viento.

En los meses de verano, mientras que en la zona de Sevilla se tiene un predominio muy claro de las direcciones SSE, S y SSW, es decir mayoritariamente viento con una fuerte componente sur, en la zona de la costa de Huelva se tienen dos direcciones dominantes como son las del NNW y WSW. La dirección del tercer cuadrante tiene un doble origen, viento sinóptico procedente del Atlántico y régimen de brisas diurno. La dirección del cuarto cuadrante se debe al régimen de brisas nocturno.

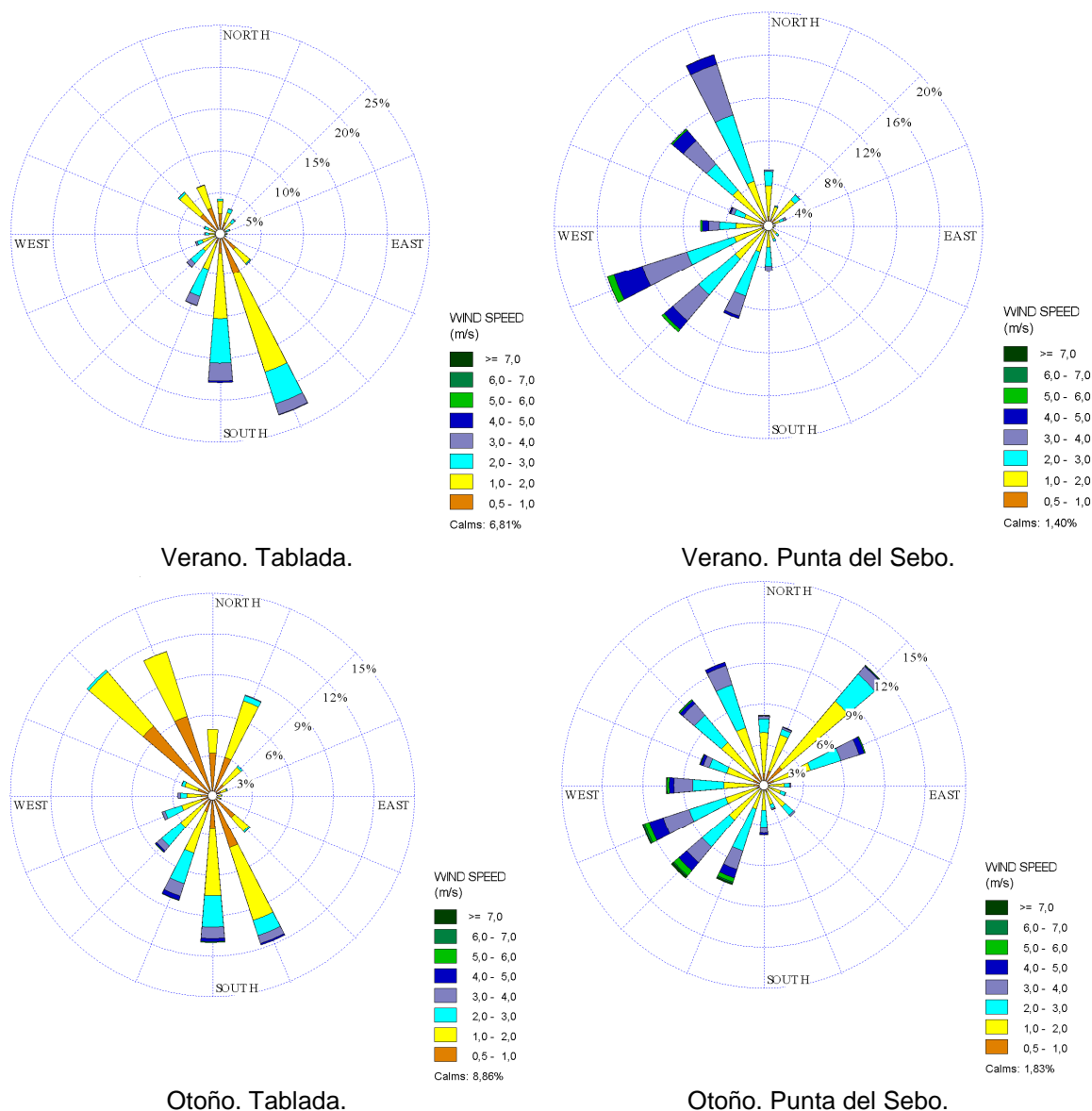


Figura 2 (continuación). Rosas de viento de los meses de verano (junio a agosto) y otoño (septiembre a noviembre) de las torres meteorológicas de Tablada (Sevilla) y Punta del Sebo (Huelva). Período 2000-2005.

En el caso de la torre de Tablada, el régimen diurno de la brisa de valle que se desarrolla en esta zona tendría también componente sur, así como la llegada de la brisa costera desde la zona del litoral, que se encuentra a unos cien km. No se registran velocidades tan altas como en primavera, encontrándose de nuevo las velocidades más altas aquellas que proceden del sur. Las direcciones procedentes del norte disminuyen su frecuencia de ocurrencia y siguen presentando velocidades bajas. En este caso este viento del norte que se registra en Tablada pudiera tener su origen en el régimen nocturno de los desarrollos locales y no tanto en la presencia de masas de aire que viajen desde centro Europa o de zonas atlánticas de latitudes superiores.

El otoño vuelve a ser como la primavera con una mayor distribución de frecuencias en los cuatro cuadrantes, como ya se ha mencionado en el caso de la primavera, debido muy posiblemente a una mayor variabilidad de situaciones. En la torre de Punta del Sebo dominan las direcciones procedentes desde del ENE, SW y NNW. Mientras que en la de Tablada se registra viento que sopla mayoritariamente desde el NW, SSE y S. Las velocidades más altas de nuevo proceden del sur y las más bajas del norte.

3.2. Características generales de las series de ozono y de óxidos de nitrógeno.

Con el fin de tener un conocimiento general de las características que presentan los registros de ozono, monóxido y dióxido de nitrógeno, se han calculado una serie de parámetros estadísticos en los cinco emplazamientos de medida a partir de los valores horarios de dichas series. Estos estadísticos, calculados de forma separada para las cuatro estaciones anuales, son: el valor máximo de la serie, el percentil 95 (P95), el valor medio, la mediana (P50), y el valor mínimo. Los resultados obtenidos se exponen en la tabla 1.

Para todos los parámetros estadísticos calculados con los valores horarios de ozono, se obtiene una variación según la época del año, excepto el mínimo, el cual muestra valores muy similares independientemente de la estación del año. El máximo de las series de ozono muestran los valores más altos en los meses de verano y primavera. En todos los emplazamientos de medida se han registrado máximos absolutos por encima de los $180 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, valor definido como el umbral de información a la población (Real Decreto, 2004). Incluso en tres de las cinco estaciones (El Arenosillo, El Carmen y Santa Clara) se han superado durante este período de medida los $200 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, destacando los $260 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ registrados en la estación de Santa Clara. Las diferencias que se encuentran entre los valores máximos y el percentil 95 llegan a ser de $70\text{-}80 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, lo cual indica que los valores máximos se producen en situaciones atmosféricas muy concretas. En primavera y verano el percentil 95 es mayor en Santa Clara, seguido de El Arenosillo, la Rábida, El Carmen y Torneo.

La media y la mediana tienen valores muy similares, lo cual indica que la media no se encuentra muy afectada por las concentraciones extremas. Los valores más altos se registran en El Arenosillo, seguido de Santa Clara, El Carmen, la Rábida y Torneo. Las diferencias entre los valores de El Arenosillo y Santa Clara son mayores en los meses de invierno y otoño. En El Arenosillo se mantienen unas concentraciones de $60 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ durante estos meses invernales, mientras que en Santa Clara los valores de ozono son de $42 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. Sin embargo, en la primavera y verano los procesos fotoquímicos y de transporte hacen que las concentraciones de ambos emplazamientos sean muy similares, a pesar del distinto carácter de cada uno de ellos.

Los valores mínimos de ozono se encuentran entre los $3\text{-}5\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ en todos los emplazamientos y épocas del año, a excepción de los $14\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ obtenidos en los meses de primavera en El Arenosillo.

Los valores de inmisión de monóxido de nitrógeno (NO) tienen su origen en la emisión directa de este contaminante, es decir es un contaminante primario, siendo por tanto totalmente distinto al ozono, que es un contaminante secundario. El monóxido de nitrógeno es emitido fundamentalmente por las fuentes móviles (el tráfico) y las emisiones industriales.

Todos los parámetros calculados con los valores horarios de las series de NO muestran una variabilidad estacional, a excepción de los valores mínimos. Al contrario de lo que se encontraba con las concentraciones de ozono, los registros de NO son más elevados en los meses de invierno y de otoño. Las causas son fundamentalmente atmosféricas, puesto que durante estos meses las inversiones térmicas nocturnas son más intensas, la atmósfera se encuentra más estable verticalmente, lo cual disminuye los procesos de mezclado y debido a ello los contaminantes primarios emitidos desde la superficie como el NO, tienden a quedarse en la capa más superficial de la atmósfera, la parte baja de la capa límite planetaria.

A estos hechos hay que unir un menor consumo de esta sustancia en la formación de ozono. En verano el aumento de la temperatura y de la radiación solar, produce varios efectos, entre ellos un aumento de los procesos fotoquímicos, debido a los cuales se consume todo el NO emitido para producir ozono, por otro lado los procesos de mezclado vertical también son más elevados por lo que el almacenamiento en los estratos inferiores es menor.

Los máximos de NO registrados en las estaciones de la ciudad de Sevilla son superiores a los $600\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ en los meses de invierno y de otoño, siendo incluso superiores a los $500\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ en la primavera. Sin embargo estos valores no se obtienen en las tres estaciones de la provincia de Huelva. Si se supone que los niveles máximos de NO de los emplazamientos de Sevilla tienen su origen mayoritariamente en las emisiones del tráfico, estas emisiones son mucho mayores que las que se tienen por ejemplo en la estación urbana de El Carmen, cuyo máximo es cercano a los $300\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ en estos mismos meses, de tal forma que si se comparan las concentraciones máximas de NO de la estación urbana de El Carmen de la ciudad de Huelva y la de Torneo de la ciudad de Sevilla, el máximo de Torneo es un 207-234 % mayor que el de El Carmen.

La Rábida registra durante los meses de invierno y otoño concentraciones inferiores a las de El Carmen, sin embargo durante el verano la concentración máxima han sido de $238\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. Este comportamiento no se refleja por ejemplo en los valores del percentil 95, por lo que debe suponerse que se ha debido a un hecho puntual.

Los valores del percentil 95 en las dos estaciones de Sevilla, durante los meses de invierno y otoño se encuentran entre los $150\text{ y }190\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, mientras que en las de Huelva son muy inferiores. La estación de El Arenosillo, al ser una estación rural registra los valores más bajos tanto del máximo, como del percentil 95 de los cinco emplazamientos analizados.

| | | O ₃ | | | | | NO | | | | | NO ₂ | | | | |
|--------|-----------|----------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----------------|-----|-----|-----|-----|
| | | ARE | CRM | RBD | TOR | SCL | ARE | CRM | RBD | TOR | SCL | ARE | CRM | RBD | TOR | SCL |
| Máximo | Invierno | 123 | 111 | 125 | 83 | 111 | 49 | 292 | 151 | 685 | 633 | 30 | 75 | 105 | 308 | 242 |
| | Primavera | 168 | 129 | 171 | 125 | 166 | 29 | 92 | 40 | 518 | 587 | 44 | 62 | 97 | 233 | 146 |
| | Verano | 207 | 212 | 180 | 192 | 260 | 41 | 88 | 238 | 190 | 174 | 50 | 48 | 197 | 166 | 141 |
| | Otoño | 197 | 153 | 162 | 132 | 171 | 33 | 297 | 88 | 616 | 452 | 32 | 59 | 163 | 243 | 166 |
| P95 | Invierno | 92 | 79 | 93 | 50 | 69 | 18 | 64 | 17 | 190 | 170 | 25 | 44 | 53 | 102 | 78 |
| | Primavera | 117 | 105 | 110 | 81 | 116 | 16 | 19 | 10 | 81 | 47 | 32 | 27 | 40 | 78 | 77 |
| | Verano | 138 | 121 | 117 | 105 | 147 | 18 | 31 | 26 | 66 | 31 | 32 | 23 | 77 | 75 | 56 |
| | Otoño | 122 | 109 | 99 | 78 | 109 | 15 | 55 | 18 | 149 | 94 | 26 | 22 | 82 | 93 | 73 |
| Media | Invierno | 58 | 42 | 52 | 20 | 27 | 11 | 17 | 7 | 63 | 42 | 21 | 16 | 27 | 53 | 37 |
| | Primavera | 79 | 68 | 71 | 41 | 63 | 10 | 7 | 5 | 28 | 14 | 24 | 11 | 22 | 40 | 33 |
| | Verano | 87 | 73 | 69 | 54 | 79 | 11 | 9 | 12 | 21 | 10 | 25 | 10 | 34 | 36 | 24 |
| | Otoño | 72 | 55 | 58 | 34 | 46 | 10 | 16 | 7 | 47 | 23 | 21 | 9 | 42 | 47 | 33 |
| P50 | Invierno | 58 | 41 | 51 | 15 | 19 | 10 | 7 | 5 | 43 | 19 | 21 | 12 | 24 | 48 | 33 |
| | Primavera | 78 | 71 | 72 | 41 | 64 | 10 | 5 | 5 | 20 | 6 | 24 | 5 | 20 | 36 | 27 |
| | Verano | 86 | 73 | 68 | 52 | 79 | 10 | 6 | 9 | 15 | 7 | 25 | 6 | 28 | 33 | 20 |
| | Otoño | 69 | 53 | 56 | 30 | 42 | 9 | 8 | 5 | 28 | 9 | 21 | 7 | 38 | 43 | 28 |
| Mínimo | Invierno | 4 | 4 | 6 | 3 | 3 | 6 | 3 | 3 | 2 | 2 | 15 | 3 | 10 | 4 | 3 |
| | Primavera | 14 | 5 | 5 | 3 | 3 | 5 | 3 | 3 | 2 | 2 | 13 | 3 | 7 | 3 | 3 |
| | Verano | 5 | 4 | 4 | 4 | 4 | 5 | 3 | 3 | 2 | 3 | 15 | 3 | 5 | 3 | 3 |
| | Otoño | 7 | 4 | 4 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 2 | 3 | 9 | 3 | 12 | 3 | 3 |

Tabla 1. Valores estadísticos obtenidos a partir de las concentraciones horarias de O₃, NO y NO₂ (en µg·m⁻³) medidos en los cinco emplazamientos analizados. Período 2003-2005.

Los valores de la media y de la mediana son, en general, relativamente similares, y a su vez más elevados en los puntos de medición de Sevilla que en los de Huelva. Si se comparan los valores medios de la estación de El Carmen con los de Torneo, en los meses de mayor concentración, se obtiene un ratio $\text{NO}_{\text{TOR}}/\text{NO}_{\text{CRM}}$ que oscila entre 2.9-3.7. Este ratio aumenta si la comparativa se realiza con los emplazamientos de Torneo y de la Rábida obteniéndose valores del ratio $\text{NO}_{\text{TOR}}/\text{NO}_{\text{RBD}}$ que oscilan entre los 6.7-9.

Estos resultados indican que las concentraciones de NO en el área urbana de Sevilla son entre tres y cuatro veces superiores a las del área urbana de Huelva, cuando ésta estaría influenciada no sólo por las emisiones del tráfico sino también por las emisiones industriales. La estación de la Rábida que mayoritariamente está afectada por las emisiones industriales, aunque también y en menor medida por el tráfico, registra niveles medios de NO entre siete y nueve veces menos que la estación urbana de la ciudad de Sevilla.

Los valores obtenidos para la estación de Santa Clara, para los parámetros estadísticos calculados, son siempre algo inferiores a los de Torneo, pero superiores a cualquiera de las tres estaciones de Huelva. Esto indicaría que una estación suburbana de Sevilla registra siempre valores de NO superiores a los de una estación urbana, industrial o rural de la provincia de Huelva.

La estación de medida de El Arenosillo muestra en general los niveles más pequeños, lo cual es lógico puesto que al estar ubicado en un entorno rural, a este enclave llegarían por procesos de transporte las concentraciones de NO emitidas en otras zonas, probablemente en el área urbana y las zonas industriales cercanas a la ciudad de Huelva. Además, el comportamiento estacional del NO en este emplazamiento es muy pequeño, presentando valores muy similares a lo largo de todo el año.

Los mínimos de la concentración de NO no muestran variaciones estacionales, con valores entre $2\text{-}3\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ en todos los emplazamientos, próximo al límite de detección de los instrumentos de medida.

El NO_2 es un contaminante primario y secundario. El 90% de las emisiones de NO_x se deben al NO y tan sólo el 10% restante procede del NO_2 . El NO emitido a la atmósfera se oxida rápidamente a NO_2 , por ello el origen mayoritario del NO_2 en la baja atmósfera procede de este proceso de oxidación, siendo por tanto un contaminante secundario.

Los valores obtenidos de cada uno de los parámetros estadísticos calculados con las series de NO_2 , muestran un comportamiento estacional. Para este contaminante los mayores valores se siguen obteniendo en los meses de invierno y de otoño, muy seguidos de los valores obtenidos en primavera.

Los valores más altos de los máximos absolutos se siguen registrando en las dos estaciones de Sevilla, durante los meses de invierno. Si se comparan los registros máximos horarios de las dos estaciones de Torneo y de El Carmen durante el invierno y el otoño, se obtiene un valor del ratio $\text{NO}_{2\text{-TOR}}/\text{NO}_{2\text{-CRM}}$ de 4.1. Si esta mismo ratio se calcula con los valores de Torneo y de la Rábida, el valor del cociente $\text{NO}_{2\text{-TOR}}/\text{NO}_{2\text{-RBD}}$ oscila entre 2.9 y 1.5.

El percentil 95 es mayor en las estaciones urbanas de Sevilla y siguen siendo mayores en invierno y en otoño. En las estaciones de Huelva los valores de este estadístico son mayores en el emplazamiento de la Rábida, mostrando valores menores y muy similares entre sí, en las estaciones de El Arenosillo y El Carmen.

Si se comparan los valores medios de NO y NO₂ de las estaciones de medición de Sevilla, se observa que durante los meses de invierno y de otoño los valores de NO son más elevados, pero esta comportamiento se invierte en el resto de meses del año. Estos resultados se pueden deber a que durante los meses de mayor radiación solar y temperatura, el NO se oxida muy rápidamente a NO₂, dentro del ciclo fotoquímico de formación de ozono, y por esta razón los niveles medios de NO₂ en la ciudad de Sevilla durante la primavera y el verano son mayores que los de NO.

En los tres emplazamientos de Huelva los valores obtenidos de los parámetros calculados para el NO₂ siempre son mayores que los de NO, independientemente de la época del año. Esto hechos pudieran deberse a que el NO₂ de la zona de Huelva tiene su origen mayoritario en las emisiones industriales, las cuales son constantes a lo largo del año y pueden ser superiores a las de NO. Por tanto, la influencia que tendría en estas tres estaciones las emisiones de NO₂ procedentes directamente del tráfico o de la oxidación del NO, sería menos influyente.

Los valores de la media y la mediana de NO₂ son en general muy próximos. Si se comparan los valores de NO₂ de las dos estaciones urbanas de Sevilla y de Huelva se obtiene un valor del ratio de NO_{2-TOR}/NO_{2-CRM} de 3.3-5.2, en los meses de invierno y otoño respectivamente. Esta misma comparativa en estos meses pero con las estaciones de Torneo y de la Rábida, se obtienen valores del ratio NO_{2-TOR}/NO_{2-RBD} de 1.9 y 1.1, para el invierno y el otoño respectivamente.

Por tanto, un emplazamiento urbano de la ciudad de Sevilla presenta niveles medios de NO₂ durante los meses de mayor estabilidad atmosférica entre 3 y 5 veces superiores a los de una ciudad con un entorno industrial como es Huelva. Además, los registros de Torneo son también mayores que los niveles de inmisión de un emplazamiento industrial como es la Rábida.

Respecto a los mínimos de NO₂ de Torneo y Santa Clara tienen un valor de 3 µg·m⁻³ a lo largo de año. Sin embargo, los mínimos de los emplazamientos de la Rábida y de El Arenosillo tienen valores de entre 10 a 15 µg·m⁻³. Esto se pudiera deber a que los niveles de NO₂ de estas dos estaciones de Huelva tienen, como ya se ha comentado, un origen mayoritariamente industrial, estas emisiones son constantes a lo largo del año, las cuales pudieran originar este valor de “fondo” a lo largo del año. Por el contrario, el emplazamiento urbano de El Carmen muestra los valores mínimos como los dos de Sevilla.

3.3. Evolución mensual.

El análisis de la evolución mensual se ha realizado a partir de las medias mensuales, las cuales han sido obtenidas a través de las medias diarias de los tres contaminantes que se estudian. En la figura 3 se expone la evolución media mensual durante el período de medida de 2003 a 2005 de estas tres sustancias en los cinco emplazamientos estudiados.

El comportamiento que muestran las medias mensuales de NO en los dos emplazamientos urbanos de Sevilla es el típico de estaciones urbanas y suburbanas influenciadas por las emisiones del tráfico. Con valores máximos en los meses de enero y diciembre y mínimos en el mes julio. Las concentraciones de NO registradas en Torneo son un 38% más elevadas que las registradas en la estación de Santa Clara durante los meses invernales. La localización de la estación de Torneo está más afectada por las emisiones del tráfico, mientras que en Santa Clara, ubicada en la zona este de la ciudad en un área suburbana, los valores de este contaminante son menores, muy posiblemente debido a la menor influencia del tráfico.

La estación urbana de El Carmen también presenta las mayores concentraciones mensuales en los meses de enero y diciembre, pero con concentraciones casi cuatro veces menores que las que se miden en la estación urbana de Torneo. Desde el mes de mayo se observa una tendencia creciente en las concentraciones de NO en el Carmen, con un incremento no muy elevado ($2\text{-}3\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ por mes) pero si apreciable. De igual forma se ha encontrado concentraciones mensuales máximas de NO en los meses de junio y agosto en la estación de la Rábida. El origen de estos resultados pudiera estar en las situaciones atmosféricas que se tienen en esta zona durante estos meses.

Como ya se ha mencionado, los niveles de NO que se miden en estos emplazamientos de Huelva pudieran tener su origen mayoritariamente en las emisiones industriales, más que en las procedentes del tráfico. Estas emisiones industriales se suponen constantes a lo largo del año, de tal forma que lo que cambia son las condiciones meteorológicas. Desde el mes de mayo comienzan a producirse fenómenos locales, desarrollo de brisa costera, los cuales tienen como consecuencia la recirculación de las masas de aire. A mayor frecuencia de ocurrencia e intensidad de estos fenómenos, mayor pudiera ser la acumulación de este contaminante primario en estas masas de aire, a pesar que debe ser consumido en el ciclo fotoquímico de ozono.

Los registros mensuales de la estación de El Arenosillo indican una concentración prácticamente constante a lo largo del año, con un valor medio de $10\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. Los niveles que se miden en este punto tienen su origen en el transporte desde la zona industrial y urbana, y este resultado indicaría que la aporte medio mensual desde estas zonas de emisión a la zona de El Arenosillo no presenta variaciones a lo largo del año.

De esta forma se pone de manifiesto el distinto comportamiento que muestra la evolución mensual de NO en las estaciones costeras de Huelva y en las urbanas y suburbanas de Sevilla. La variabilidad está condicionada tanto por el tipo de fuentes y la intensidad de las emisiones como por las situaciones atmosféricas a las que se ven sometidas.

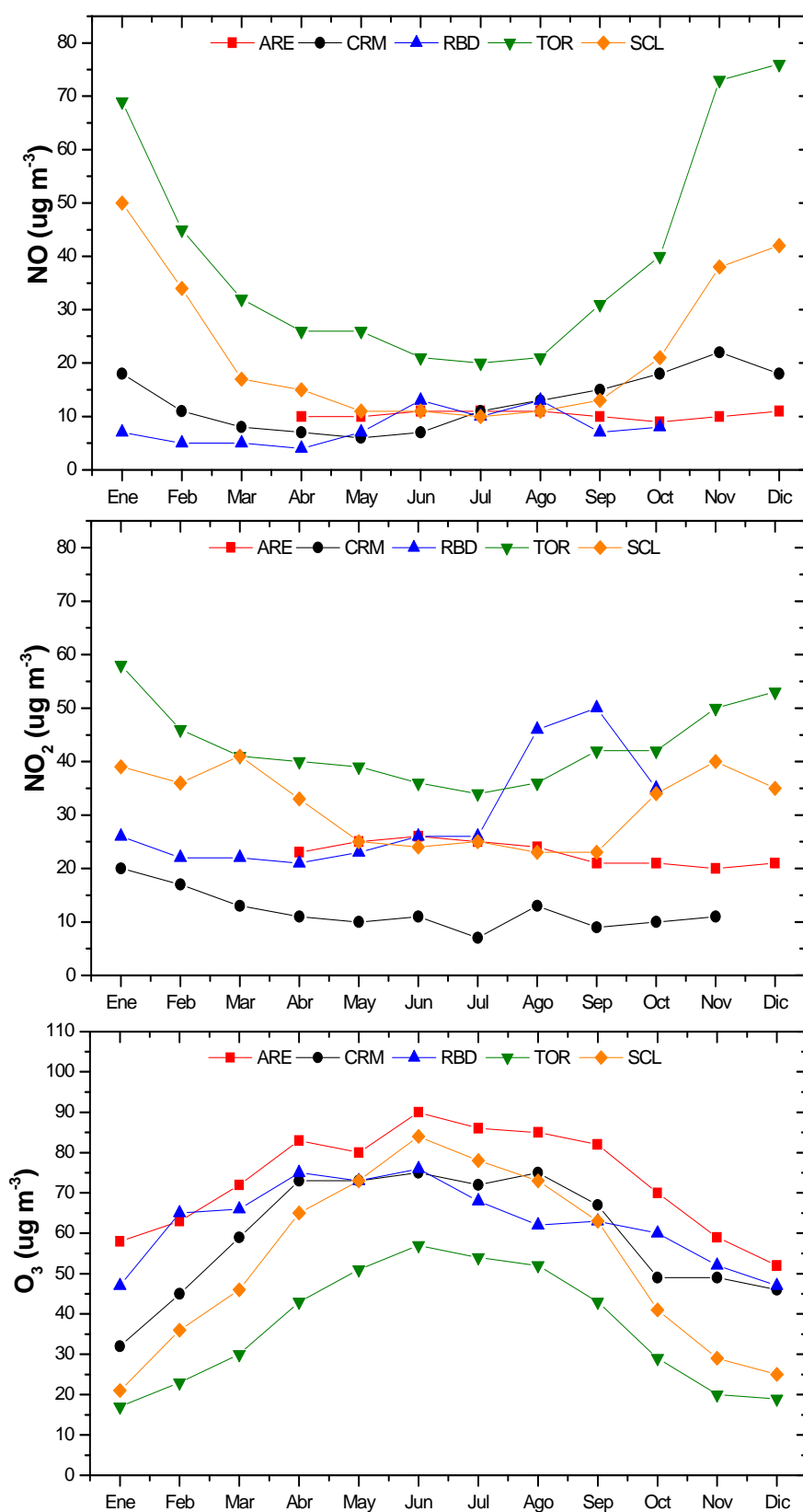


Figura 3. Evolución media mensual de las concentraciones de NO, NO₂ y O₃.

Como ya se ha puesto de manifiesto también en el anterior apartado, los niveles mensuales de NO_2 en las estaciones de Sevilla son menores a las de NO . Una posible explicación a estos hechos estaría en el origen del NO_2 debido mayoritariamente a la oxidación del NO . Sin embargo, en las estaciones costeras de Huelva el comportamiento es el opuesto, mayores concentraciones medias mensuales de NO_2 que de NO , debido a que las causas de estos niveles estarían en las emisiones industriales.

El ciclo anual del NO_2 en las dos estaciones urbanas de Sevilla no muestra una variabilidad tan marcada como la del NO . En la estación de Torneo se encuentra un comportamiento típico de estación urbana fuertemente influenciada por el tráfico, con máximo mensual de NO_2 en el mes de enero y mínimo en el mes de julio. Ahora bien, la estación de Santa Clara muestra dos máximos relativos en los meses de marzo y de noviembre y valores mínimos en los meses centrales del verano. Los meses en los que se producen las mayores concentraciones de NO_2 , se pueden considerar a nivel meteorológico como de transición, puesto que en las rosas de viento de Tablada (figura 2) se ha mostrado que esta época se caracteriza por presentar una mayor ocurrencia de distintas situaciones meteorológicas con dominio de la escala sinóptica y mesoescalar. Este tipo de situaciones favorecería un mayor transporte de NO hacia esta zona este de la ciudad de Sevilla que en su recorrido se oxida y se convertiría en NO_2 .

La evolución mensual de la concentración de NO_2 en la estación de la Rábida muestra máximos en los meses de agosto y septiembre, teniendo estos resultados la misma explicación que la ya mencionada para el NO . Pero con este contaminante los resultados son más marcados que para el NO , puesto que una mayor ocurrencia de fenómenos de brisa costera y por tanto, de recirculación de masas de aire, pudiera ser la causa que hace que las concentraciones medias mensuales prácticamente se dupliquen en la Rábida en los mes agosto respecto de los meses de mayo y junio.

En la estación urbana de El Carmen el máximo anual se encuentra en el mes de enero y el mínimo en el mes de julio, pero hay que indicar que la oscilación anual en este emplazamiento es muy pequeña. Una estacionalidad muy poco marcada se encuentra igualmente en El Arenosillo, en este caso el máximo mensual se mide en el mes de junio, pero las diferencias entre unos meses y otros es de $2\text{-}3\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.

Los valores medios mensuales durante los meses de abril a julio en las estaciones de la Rábida y el Arenosillo son muy similares. Estos hechos pudieran indicar que estarían afectadas por las mismas fuentes de emisión de NO_2 . A partir de julio la mayor ocurrencia e intensidad de los fenómenos de brisa, hace que las concentraciones de NO_2 se incrementen más en la Rábida, debido a la cercanía de este emplazamiento a la zona industrial, sin embargo no tiene tanta influencia en la zona de El Arenosillo. Los valores medios mensuales detectados en El Carmen son menores que los de El Arenosillo y la Rábida.

En general, y a pesar de que la zona costera de Huelva, donde se localizan las estaciones de medida analizadas es una zona con influencia de las emisiones del tráfico y de la zona industrial, los valores medios mensuales de NO_2 obtenidos son menores que las de las dos estaciones que se ubican en la ciudad de Sevilla. Por ello se pudiera suponer de esta forma que las emisiones de NO_2 de la zona industrial de Huelva produciría menores niveles de inmisión que las emisiones de NO del tráfico de la ciudad de Sevilla, el cual se transforma mediante reacciones de oxidación en NO_2 .

La evolución mensual de ozono difiere de las registradas de NO y de NO₂, así en las estaciones de Torneo y de Santa Clara los máximos anuales se obtienen de una forma muy clara en el mes de junio, con valores de 57 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ y 84 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ respectivamente, mientras que el mínimo mensual se obtiene en el mes de enero. Estos resultados indican que existe una diferencia superior a un 45% en los valores mensuales obtenidos en estos dos emplazamientos. Las causas de estos hechos pudiera deberse a que la estación de Torneo está en una zona de mayor influencia de emisiones del tráfico, y por ello expuesta a mayores concentraciones de NO y de NO₂, mientras que hacia la zona de Santa Clara se desplazarían estas emisiones primarias, y en el recorrido hasta esta zona peri urbana de la ciudad se iría consumiendo el NO, formándose NO₂, el cual terminaría formando ozono, el cual se registra en mayores concentraciones que en Torneo. Las condiciones atmosféricas típicas de verano son las que favorecerían la mayor formación de ozono y el máximo estival.

En las estaciones de la costa de Huelva los niveles más pequeños se producen en los meses de enero y diciembre, pero el máximo anual no está definido tan claramente como en las estaciones de Sevilla, puesto que las condiciones atmosféricas en esta zona de costa son distintas. Así la estación urbana de El Carmen y la rural de El Arenosillo registran valores medios mensuales casi constantes desde el mes de mayo al mes de septiembre, con valores que oscilan entre los 73-75 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ de El Carmen y los 85-90 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ de El Arenosillo, período que coincide con el de mayor ocurrencia de fenómenos de brisa, habiéndose constatado que en esta zona las mayores concentraciones de ozono vienen dadas por unas condiciones meteorológicas caracterizadas por la brisa costera (Adame et al., 2006 b). En la Rábida los mayores niveles de ozono se miden entre los meses de abril a junio y comienza una ligera tendencia decreciente a partir del mes de julio.

Las concentraciones medias mensuales más elevadas se han obtenido en la estación de El Arenosillo, estación rural, seguida de la estación suburbana de Santa Clara. A pesar que en El Arenosillo se tienen menores valores de NO y NO₂ que en Santa Clara, se pudiera indicar que las condiciones atmosféricas que se producen en El Arenosillo, las cuales causan que el ozono sea formado a lo largo del transporte de los lugares de emisión de sustancias precursoras, compensa el que las concentraciones de NO y NO₂ sean menores.

A estas dos estaciones les seguirían la Rábida y El Carmen, y por último estarían las concentraciones mensuales de ozono que se miden en Torneo. Si se comparan los valores medios mensuales de El Carmen frente a los de Torneo durante el mes de junio, el valor mensual de El Carmen es un 30% superior al de Torneo. Sin embargo las concentraciones medias mensuales de NO y NO₂ en Torneo, durante este mismo mes de junio, son tres veces mayores que las de El Carmen.

Estos resultados indican la existencia de otros factores (muy posiblemente meteorológicos) mucho más influyentes en la formación de ozono que los debidos a las emisiones de contaminantes primario.

3.4. Evolución diaria.

Las concentraciones de estas tres sustancias presentan un ciclo diario muy bien definido. En un núcleo urbano es clásico encontrar la evolución media diaria del NO, NO₂ y ozono, como la que se presenta en la figura 4, la cual corresponde a las estaciones urbanas de Torneo y El Carmen, ciclo similar al encontrado en otras áreas urbanas (Minoura, 1999).

En este tipo de emplazamiento urbano se produce un aumento de las emisiones de NO y NO₂ debido al inicio de la actividad humana, con el consiguiente aumento del tráfico. Este máximo se produce entre las 9-10 horas en ambos emplazamientos urbanos, con valores máximos cuatro veces más altos en el caso de Torneo que en el de El Carmen, debido a las diferencias en el volumen de tráfico de la ciudad de Sevilla respecto a la de Huelva. Las mayores emisiones como se pueden observar corresponderían al NO y en menor medida al NO₂.

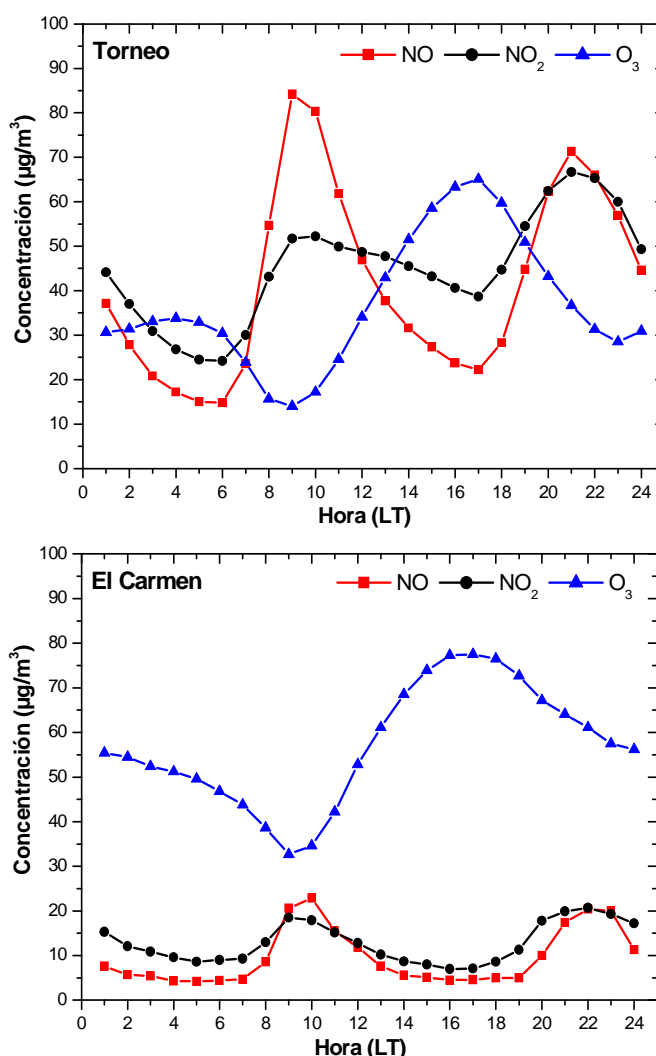


Figura 4. Evolución media diaria anual de las concentraciones de NO, NO₂ y O₃ de los emplazamientos urbanos de Torneo y El Carmen.

Esta misma hora del máximo matinal de NO_x coincide con el mínimo diario de ozono, debido a que el poco ozono que hubiera de la noche anterior se ha consumido para formar NO_2 . A medida que la mañana avanza, el volumen de tráfico es menor y disminuyen los niveles de inmisión de los NO_x , siendo más acusado el descenso que se produce en el NO. El aumento de la radiación solar y de la temperatura favorece la mayor capacidad de mezclado de la atmósfera, lo cual conlleva a su vez a favorecer la actividad fotoquímica, aumentando de forma gradual a lo largo de la mañana las concentraciones de ozono gracias al consumo de los NO_x .

El máximo de ozono coincide con un mínimo relativo de las concentraciones de NO_x , en la estación de Torneo este máximo se produce de forma clara a las 17 horas, sin embargo en El Carmen se tienen valores máximos entre las 15 y las 19 horas. Estos resultados se deben al diferente carácter de ambos emplazamientos. Las concentraciones máximas diarias de ozono en Torneo son $65 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, mientras que en el Carmen se aproximan a los $80 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.

Si se tienen concentraciones de NO_2 más altas en Torneo que en El Carmen y las de ozono tienen una tendencia inversa, indicaría que en la estación de El Carmen se producen procesos que guían de forma más efectiva a la formación y/o acumulación de ozono, sin necesidad de tener concentraciones de NO_x tan elevadas. Estos procesos pudieran ser por ejemplo la formación de capas residuales nocturnas en la zona del El Carmen de mayor intensidad a las que se pudieran formar en la zona urbana de Torneo. Puesto que en El Carmen es un lugar urbano costero, bajo escenarios de brisa se puede producir la recirculación de contaminantes y por tanto la existencia de estas estratos en altura que, con la ruptura de la capa de inversión a primeras horas de la mañana, llevarían a tener unos mayores niveles de ozono en superficie, a pesar de tener menores concentraciones de NO_x .

Con la disminución de la radiación solar, la actividad fotoquímica desciende y con ella los niveles de ozono. A estas causas de índole meteorológico hay que añadir que a últimas horas de la tarde se incrementa de nuevo la actividad antropogénica, y con ella el tráfico y los niveles de inmisión de NO_x . Este incremento de los NO_x se produce entre las 21-22 horas en ambos emplazamientos.

Estos picos suelen ser algo inferiores a los máximos matinales. Por una parte, hay más ozono que por la mañana, el cual consume los NO_x , y por otro lado, a estas horas de la tarde-noche la capacidad de mezclado es probablemente mayor que a primeras horas de la mañana, por lo que las concentraciones no se acumulan tan fácilmente en la capa superficial de la atmósfera.

A estas últimas horas del día, de nuevo los niveles de NO y NO_2 son muy distintos en ambos emplazamientos. Mientras que este máximo secundario de NO en Torneo alcanza los $71 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, en El Carmen se miden $17 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.

Además de tener estos ciclos típicamente urbanos de las concentraciones diarias de estas tres sustancias, se pueden tener otro tipo de ciclos menos marcados. Para conocer la evolución diaria de estos tres contaminantes, en los cinco emplazamientos que se analizan en este trabajo, se muestra dicha evolución en la figura 5, según sea invierno (diciembre, enero y febrero) o verano (junio a agosto).

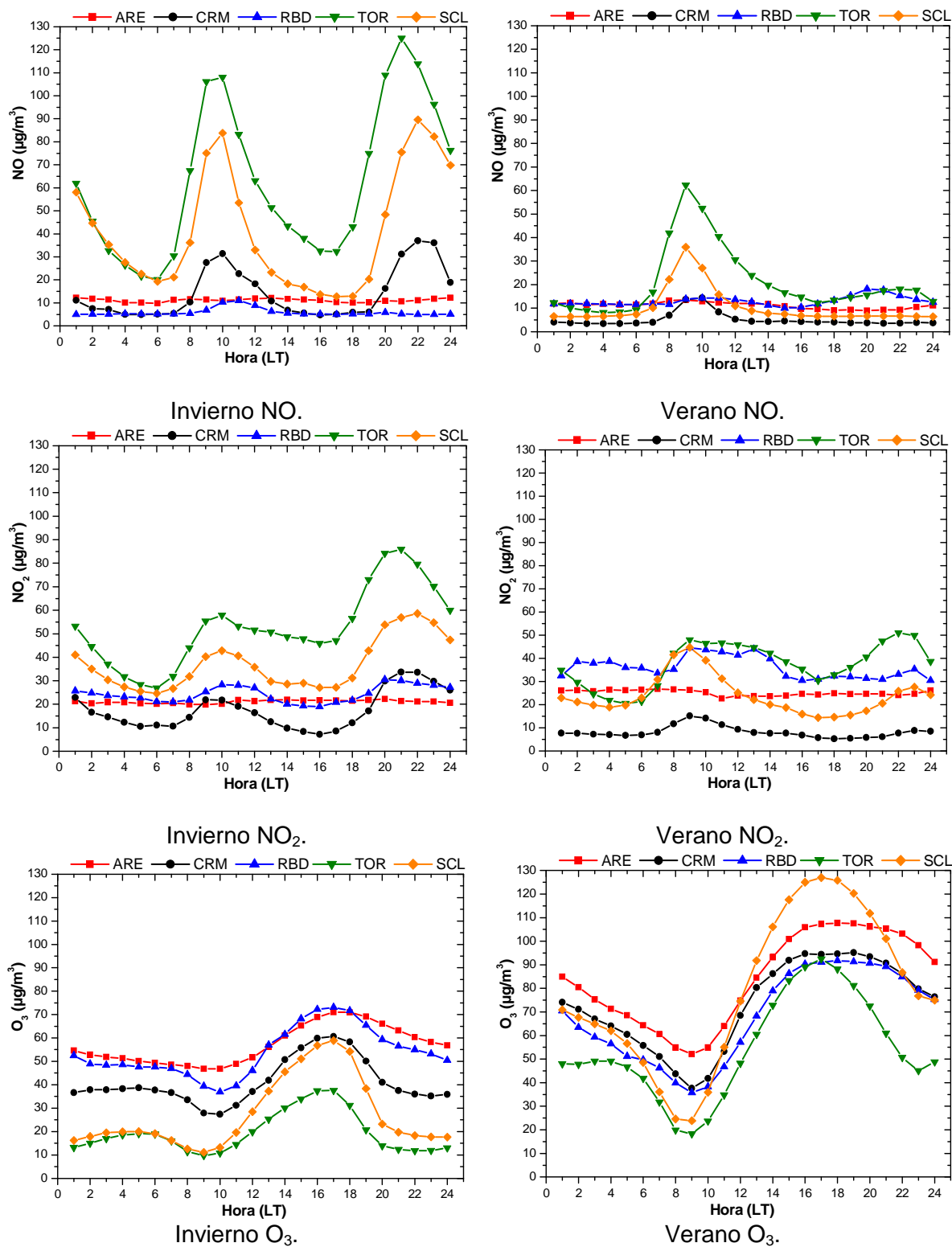


Figura 5. Evolución media diaria de las concentraciones de NO, NO₂ y O₃.

Durante los meses de invierno se muestra un comportamiento muy marcado en el ciclo de NO de las estaciones urbanas y suburbanas de Torneo, Santa Clara y El Carmen. Con máximos entre las 9-10 horas y un máximo secundario a las 21-22 horas, debido a las emisiones del tráfico. Dadas las características de cada uno de estos puntos de medición, las concentraciones de Torneo son superiores a las de Santa Clara y éstas a su vez a las de El Carmen. En la estación de la Rábida este máximo matinal es muy poco acusado, y el máximo de la tarde-noche desaparece debido a que este emplazamiento no se ve afectado por las emisiones del tráfico y sí por las industriales, registrándose los niveles más bajos de los cinco emplazamientos analizados. El ciclo diario de El Arenosillo en invierno es prácticamente constante, con valores superiores a los que se registran en la Rábida e inferiores a los de El Carmen.

El ciclo de NO en las estaciones urbanas y suburbanas durante los meses de verano presentan, como diferencia más apreciable respecto a los meses de invierno, que los niveles son más bajos, el máximo matinal es más pequeño y prácticamente desaparece el máximo de la tarde-noche. Estos resultados pudieran tener su origen tanto en la mayor intensidad de los procesos fotoquímicos, mayor consumo de NO_x y la menor estabilidad atmosférica, mayor capacidad de mezclado y menor capacidad para almacenarse en las capas bajas. El máximo matinal igualmente se sigue produciendo entre las 9-10 horas, las mayores concentraciones se registran de nuevo en Torneo, seguido de Santa Clara y El Carmen. Si se compara la concentración máxima de NO durante estas horas de la mañana en los meses de invierno y de verano, se obtiene para estos tres emplazamientos urbanos-suburbanos un ratio de 2, es decir el máximo de invierno es el doble que el registrado en verano.

La evolución diaria del NO en El Arenosillo durante el verano es muy similar a la registrada durante el invierno, con valores prácticamente constantes a lo largo de todo el día. En la Rábida durante el verano las concentraciones se incrementan respecto a las del invierno, posiblemente porque las situaciones atmosféricas de origen local que se desarrollan en estos meses cause una menor dispersión en esta zona y una mayor acumulación en masas de aire que pudieran recircular por este área.

La evolución diaria de la concentración de NO₂ durante los meses de invierno muestra, como en el caso del NO, dos máximos diarios en las estaciones urbanas y suburbanas analizadas. Uno a primeras horas de la mañana, sobre las 9-10 horas y otro a las 21-22 horas. La diferencia más notable respecto a la evolución diaria del NO es que el máximo diario en este caso se produce a últimas horas del día, el origen está en los procesos fotoquímicos. A estas horas de la tarde se tiene una concentración de NO que es menor que la matinal pero sí se tiene más ozono que por la mañana, de esta forma la oxidación del NO por parte del ozono para formar NO₂ es más efectiva, lo cual se traduce en máximos de NO₂ más altos que los que se tienen por la mañana. Las concentraciones máximas de NO₂ a estas horas son de 86 µg·m⁻³ en Torneo, 56 µg·m⁻³ en Santa Clara y 33 µg·m⁻³ en El Carmen.

La estación de El Arenosillo muestra valores prácticamente constantes de NO₂ a lo largo de todo el día durante este período invernal, con valores medios de 20 µg·m⁻³. La Rábida presenta una tendencia muy similar a las encontradas en las estaciones urbanas y suburbanas, aunque en este caso los valores de los máximos matinal de última horas de la tarde no presentan diferencias, como ocurría en los emplazamientos con un mayor carácter urbano.

Durante los meses de verano se observa que los valores de NO_2 son más pequeños que durante el invierno, debido al mayor consumo de esta sustancia en el ciclo de formación de ozono. En las estaciones urbanas de Torneo y Santa Clara se observan los picos matinales y de últimas horas de la tarde, pero en la estación urbana de El Carmen el máximo relativo de la tarde desaparece, debido probablemente a que las emisiones que se tengan de NO_x en esta zona sean pequeñas y a que lo que haya sea rápidamente transformado a favor de la formación fotoquímica del ozono. Además, es éste último emplazamiento el que muestra los niveles más pequeños de NO_2 en este período.

La Rábida presenta concentraciones ligeramente más altas al resto del día entre las 9 y las 14 horas. Precisamente es durante este intervalo horario cuando se comienza a desarrollarse el régimen de brisa diurna y muy probablemente la llegada de emisiones frescas procedentes de la zona industrial es lo que hace que se registren ligeramente estas concentraciones de NO_2 . A partir de las 14 horas quizás las concentraciones de ozono ya sean lo suficientemente elevadas como para permitir que se tenga ese nivel de NO_2 y por esta razón comience a disminuir.

En El Arenosillo durante el verano la concentración de NO_2 se mantiene constante a lo largo del día, igual que ocurría con el NO . Ahora bien, se han obtenido valores de NO_2 más altos en El Arenosillo ($24 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) que en la estación urbana de El Carmen (con un máximo de $15 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$). Este hecho indicaría que la zona de El Arenosillo estaría más afectada por las emisiones mayoritariamente industriales de NO_2 que la zona de El Carmen.

Respecto las concentraciones de ozono durante la noche en los meses de invierno se mantienen prácticamente constantes, sobre las 9-10 horas se produce el mínimo y a partir de entonces se comienza un ascenso gradual de las concentraciones de ozono, siendo el ratio de crecimiento distinto según el emplazamiento de medida. El máximo se alcanza prácticamente a las 17 horas en todas las estaciones, destacando los valores de El Arenosillo y la Rábida, con niveles máximos de $71 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ y $73 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ respectivamente.

Durante el verano las concentraciones lógicamente son mayores, durante la noche las concentraciones presentan una tendencia decreciente, registrándose el mínimo diario a las 9 horas. El máximo en las dos estaciones de la ciudad de Sevilla de nuevo se alcanza a las 17 horas, pero en las tres estaciones costeras de Huelva se tienen concentraciones máximas desde las 14 a las 20-21 horas, reflejo de los distintos niveles de emisión de precursores de la diferencia de los procesos físico-químicos a los que se ven sometidos los emplazamientos de medida.

Las concentraciones máximas se registran en la estación de Santa Clara con $127 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, seguido de los $107 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ de El Arenosillo, siendo por tanto el emplazamiento suburbano de Sevilla y el rural-costero de Huelva aquellos que más ozono registran durante los meses de verano. Las concentraciones más bajas de ozono se miden en el emplazamiento de Torneo.

4. Conclusiones.

Respecto al régimen de viento analizado se ha obtenido que durante los meses de invierno predomina el viento procedente del norte tanto del NW como del NE, las velocidades más altas sin embargo, se registra con direcciones con componente sur. Son más altas las velocidades registradas en la torre de Huelva que la de la torre de la ciudad de Sevilla. Durante la primavera comienzan a desarrollarse en la baja troposfera procesos de origen térmico a la que se unen viento de origen sinóptico, por esta razón y dada la mayor variabilidad de condiciones atmosféricas posibles, se registran también una mayor distribución de direcciones de viento, siendo predominante la componente sur.

El verano viene dominado en el litoral de Huelva por los procesos de brisa costera, con direcciones predominantes que coinciden con el régimen diurno y nocturno. En la zona de Sevilla también se dan estos procesos locales, pero en el emplazamiento de Tablada se obtiene un claro dominio de viento con componente sur. Durante los meses de otoño se tiene un comportamiento similar al encontrado en primavera, con una gran distribución de direcciones de viento.

Del análisis estadístico de las concentraciones horarias de los tres contaminantes se han obtenido una serie de resultados. Algunos de los más relevantes son los siguientes. Respecto al ozono las mayores concentraciones se han obtenido en la estación de El Arenosillo, seguido de las de Santa Clara, El Carmen, la Rábida y Torneo. Mostrándose en todos los parámetros calculados una variabilidad estacional.

La concentración de NO en los emplazamientos de Sevilla son más elevados que los del litoral de Huelva. Si se comparan los registros de las estaciones urbanas de Sevilla y de Huelva, se encuentra que la de éste último son hasta cuatro veces más pequeños que los de Sevilla. Estos hechos indican que las emisiones del tráfico de la ciudad de Sevilla produce unos mayores niveles de inmisión de NO que las emisiones del tráfico e industriales de la zona de Huelva.

La concentración de NO₂ es en general mayor en la zona de Sevilla que en la zona de Huelva. En las estaciones de Sevilla la concentración de NO es mayor que la de NO₂ durante los meses de invierno y otoño, siendo al revés en los meses de mayor radiación solar. Sin embargo, en las estaciones del litoral de Huelva se ha encontrado que siempre es mayor la concentración de NO₂ que la de NO. Al comparar las concentraciones de las dos estaciones urbanas de Huelva y Sevilla, se ha obtenido que en los meses de invierno y otoño las concentraciones de NO₂ de la ciudad de Sevilla presenta niveles medios entre 3 y 5 veces superiores a los de una ciudad de Huelva.

La evolución estacional de NO indica valores máximos en los meses de invierno y otoño en las dos estaciones de Sevilla, comportamiento similar al encontrado en la estación urbana de El Carmen. Sin embargo, en la Rábida se muestran concentraciones máximas anuales en los meses de verano y en El Arenosillo la concentración media mensual de NO es prácticamente constante a lo largo del año. Las concentraciones mensuales de NO son más elevadas en la zona de Sevilla que en las estaciones de Huelva.

La evolución mensual del NO_2 muestra que los valores de NO_2 son más pequeños que los de NO en las dos estaciones de Sevilla, sin embargo ocurre lo contrario en los emplazamientos de Huelva. Debido al distinto origen de las emisiones que producen estos niveles. Los máximos y mínimos anuales de estos valores mensuales presentan diferencias apreciables entre unos emplazamientos y otros.

La concentración media mensual de ozono muestra un claro máximo en el mes de junio y valores mínimos en enero en las estaciones de Torneo y Santa Clara. Este comportamiento no se tiene en las estaciones de Huelva, en las cuales se producen niveles máximos desde el mes de mayo al mes de septiembre. Estos resultados se deben fundamentalmente a los distintos procesos que tienen lugar en uno y otro lugar, así como en las diferencias en los niveles de emisión de precursores.

Se ha analizado también la evolución diaria que presentan las tres sustancias estudiadas, realizándose un estudio comparativo entre los ciclos diarios de las estaciones urbanas de Torneo y El Carmen. Se han obtenido los ciclos clásicos, pero se ha evidenciado que concentraciones de NO_x más altas en Torneo llevan a tener concentraciones de ozono más bajas que las de El Carmen, poniendo de manifiesto estos hechos que ambos emplazamientos están sometidos a distintas condiciones atmosféricas.

Referencias

Adame, J.A., Contreras, J., Lozano, A., Bolívar, J.P. y De la Morena, B. 2004. El ozono superficial en Andalucía. *VII Congreso Nacional de Medio Ambiente (CONAMA)*. Libro de resúmenes. pag 31. ISBN: 84-609-3086-6.

Adame, J.A., Lozano, A., Contreras, J., De la Morena, B.A. y Bolívar, J.P. 2006 (a). Concentraciones de ozono superficial en estaciones urbanas de Sevilla (España): resultados iniciales. *5 Asamblea Hispano Portuguesa de Geodesia y Geofísica*.

Adame, J.A., Bolívar, J.P. y De la Morena, B.A. 2006 (b). Origin of elevated ozone concentration at Huelva (southwest of Spain). *European Geoscience Union. Journal Geophysical Abstracts*, Vol 8, 01035.

Colbeck, I y Mackenzie, A. 1994. *Air pollution by photochemical oxidants*. Editorial Elsevier Science B.V.

Finlayson-Pitts, B.J. y Pitts, J. 2000. *Chemistry of the Upper and Lower atmosphere*. San Diego (USA). Academic Press.

.MMA. (2001). *Guía resumida del clima en España 1971-2000*. Ministerio de Medio Ambiente. Dirección General del Instituto Nacional de Meteorología.

Minoura, H. 1999. Some characteristics of surface ozone concentration observed in an urban atmosphere. *Atmospheric Research*, 51, 153-169.

Real Decreto 1976/2003. 2004. Relativo al ozono en el aire (BOE de 13 de enero de 2004).

Sánchez, J. 1993. *Situaciones atmosféricas en España*. INM. Serie Monografías