



## TÍTULO

**ESTUDIO DE TENDENCIAS DE PARÁMETROS  
ATMOSFÉRICOS EN EL PARQUE NACIONAL DE DOÑANA  
(TRENDS STUDY OF ATMOSPHERIC PARAMETERS IN THE  
DOÑANA NATIONAL PARK)**

## AUTORA

**Sheyla Gianna Casana Barrera**

<b>Directores</b>	<b>Esta edición electrónica ha sido realizada en 2015</b>
<b>Instituciones</b>	Dr. José Antonio Adame Carnero ; Dr. José Antonio Dueñas Díaz
<b>Curso</b>	Universidad Internacional de Andalucía ; Universidad de Huelva
<b>ISBN</b>	<i>Máster Oficial en Tecnología Ambiental (2014/15)</i>
©	978-84-7993-692-1
©	Sheyla Gianna Casana Barrera
<b>Fecha documento</b>	De esta edición: Universidad Internacional de Andalucía
	2015



## Reconocimiento-No comercial-Sin obras derivadas

### Usted es libre de:

- Copiar, distribuir y comunicar públicamente la obra.

### Bajo las condiciones siguientes:

- **Reconocimiento.** Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciadore (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o apoyan el uso que hace de su obra).
- **No comercial.** No puede utilizar esta obra para fines comerciales.
- **Sin obras derivadas.** No se puede alterar, transformar o generar una obra derivada a partir de esta obra.
  
- *Al reutilizar o distribuir la obra, tiene que dejar bien claro los términos de la licencia de esta obra.*
- *Alguna de estas condiciones puede no aplicarse si se obtiene el permiso del titular de los derechos de autor.*
- *Nada en esta licencia menoscaba o restringe los derechos morales del autor.*



## Estudio de Tendencias de Parámetros Atmosféricos en el Parque Nacional de Doñana

(Trends Study of Atmospheric Parameters in the Doñana National Park)

**Ing. Sheyla Gianna Casana Barrera**

Trabajo de Investigación entregado para la obtención del grado de Máster  
(Universidad Internacional de Andalucía - Universidad de Huelva)

DIRECTORES DEL TRABAJO:

*Dr. José Antonio Adame Carnero (INTA)*

*Dr. José Antonio Dueñas Díaz (UHU)*

Diciembre 2015 <sup>1</sup>

---

<sup>1</sup>Este documento está diseñado para ser impreso a dos caras.



# Prólogo

El presente trabajo de investigación surge por iniciativa del Área de Investigación e Instrumentación Atmosférica; perteneciente al Departamento de Observación de la Tierra y Atmósfera, Subdirección de Ciencias del Espacio, Instituto Nacional Técnico Aeroespacial (INTA); el cual desarrolla proyectos de investigación atmosférica en la Estación de Sondeos Atmosféricos “El Arenosillo”.

Su interés por evaluar variables meteorológicas y su relación con el cambio climático en entornos naturales protegidos, en concordancia con el Observatorio de Cambio Global de Doñana, de la Estación Biológica de Doñana, perteneciente al Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), motivó principalmente el planteamiento de los objetivos de este trabajo.

A su vez, los conocimientos adquiridos en los cursos impartidos del Máster Oficial de Tecnología Ambiental, los estudios leídos sobre meteorología, climatología y cambio climático, y mi interés personal y profesional sobre este trabajo de investigación, me permitieron desarrollarlo bajo la supervisión de mis directores.

El objetivo principal de este trabajo es analizar la evolución y tendencia de la temperatura y velocidad del viento en superficie, en las dos últimas décadas (1994 -2014) en el Parque Nacional de Doñana. Para ello, se utilizaron datos provenientes del modelo meteorológico a escala global del Centro

Europeo de Predicción a Medio Plazo (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts - ECMWF) y del Centro de Predicción del Clima (Climate Prediction Center - CPC) de la Administración Nacional Atmosférica y Oceánica (National Oceanic and Atmospheric Administration - NOAA).

En el capítulo 1, se describe la introducción, conformada por el estado de la cuestión y los objetivos. En el capítulo 2, se detalla la descripción de la zona de estudio, los materiales usados y la metodología. En el capítulo 3, se presentan los resultados con sus respectivas gráficas y análisis. En el capítulo 4, se exponen las conclusiones obtenidas de esta investigación, para finalmente en el capítulo 5, indicar las referencias bibliográficas consultadas.

# Agradecimientos

A Dios, por su amor infinito y por regalarme esta experiencia de vida en España.

A mi madre, la Sra. Magdalena Cristina Barrera Huamán, por su amor único, confianza y compañía a la distancia.

A mis directores, el Dr. José Antonio Adame Carnero y Dr. José Antonio Dueñas Díaz, por su valioso conocimiento, tiempo, paciencia y confianza puesta en mí, para la realización de éste trabajo de investigación.

A la Universidad Internacional de Andalucía y Universidad de Huelva, por darme la oportunidad de cursar éste Máster.

Al Instituto Nacional Técnico Aeroespacial (INTA), Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), Centro Europeo de Predicción a Medio Plazo (ECMWF), Centro de Predicción del Clima (CPC) y Administración Oceánica Nacional y Atmosférica (NOAA), por la valiosa información brindada.



# Índice general

<b>Prólogo</b>	<b>3</b>
<b>Agradecimientos</b>	<b>5</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>9</b>
1.1. Estado de la cuestión . . . . .	9
1.2. Objetivos . . . . .	13
1.2.1. Objetivo General . . . . .	13
1.2.2. Objetivos Específicos . . . . .	13
<b>2. Materiales y métodos</b>	<b>15</b>
2.1. Introducción . . . . .	15
2.2. Descripción de la zona de estudio . . . . .	15
2.3. Materiales . . . . .	18
2.3.1. Variables meteorológicas e índice climático . . . . .	18
2.3.2. Modelo meteorológico global del ECMWF . . . . .	21
2.3.3. Herramientas informáticas utilizadas . . . . .	23
2.4. Metodología . . . . .	23
2.4.1. Extracción de la información . . . . .	23
2.4.2. Tratamiento de la información . . . . .	24
2.4.2.1. Media aritmética . . . . .	25
2.4.2.2. Desviación estándar . . . . .	25
2.4.2.3. Anomalía . . . . .	25
2.4.2.4. Coeficiente de correlación . . . . .	26

2.4.2.5.	Evolución promedio mensual (EPM) . . . . .	26
2.4.2.6.	Evolución y tendencia interanual (ETI) . . . . .	26
2.4.2.7.	Evolución y tendencia estacional (ETE) . . . . .	27
2.4.2.8.	Evolución anómala estacional (EAE) y su relación con el índice de NAO . . . . .	27
<b>3.</b>	<b>Resultados y Discusiones</b>	<b>29</b>
3.1.	Introducción . . . . .	29
3.2.	Resultados y discusiones . . . . .	29
3.2.1.	Evolución del promedio mensual (EPM) . . . . .	29
3.2.2.	Evolución y tendencia interanual (ETI) . . . . .	31
3.2.3.	Evolución y tendencia estacional ETE . . . . .	33
3.2.3.1.	Temperatura . . . . .	33
3.2.3.2.	Velocidad del viento . . . . .	34
3.2.4.	Evolución Anómala Estacional (EAE) y su relación con el índice NAO . . . . .	39
3.2.4.1.	Temperatura . . . . .	40
3.2.4.2.	Velocidad del viento . . . . .	43
<b>4.</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>47</b>
	<b>Referencias Bibliográficas</b>	<b>49</b>
	<b>Índice de figuras</b>	<b>53</b>

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Estado de la cuestión

Está demostrado por la comunidad científica internacional, que en la actualidad se está produciendo un fenómeno a escala global, conocido como Cambio Climático, el cual se pone de manifiesto en los numerosos estudios realizados y publicados por el IPCC, del inglés, Intergovernmental Panel on Climate Change (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático)[1]. Dicho fenómeno, se sitúa como el principal problema medioambiental del siglo XXI [2] y [3].

El cambio climático es la variación del estado del clima identificable en las variaciones del valor medio y/o en la variabilidad de sus propiedades, que persiste durante largos períodos de tiempo, generalmente decenios o períodos más largos. Puede deberse a procesos internos naturales, a forzamientos externos o a cambios antropogénicos persistentes de la composición de la atmósfera o del uso de la tierra [4]

La relación entre cambio climático y la actividad antropogénica es directa. La superficie de la tierra se ha calentado más de 0.8° C durante el siglo pasado, y en aproximadamente 0.6° C en las últimas tres décadas [5].

Este fenómeno está teniendo no solo implicaciones en la atmósfera y océanos, sino que se está manifestando en otros ámbitos como el social, económico, médico, poblacional, etc. El IPCC en su quinto informe del pasado año 2014, indica que la población experimentará escases de agua y se verá afectado por grandes inundaciones; la producción, el acceso y la estabilidad de precios de los alimentos también serán afectados; habrá una mayor probabilidad de daños y muerte debido a las olas de calor, incendios más intensos, y mayor propagación de enfermedades transmitidas por el agua y desnutrición. El cambio climático agravará la pobreza en los países emergentes y creará nuevos focos de pobreza tanto en países desarrollados como en vías de desarrollo [9].

Asimismo, hay lugares más sensibles y vulnerables, en los que el cambio climático puede ser “sentido” con mayor intensidad, y que pueden ser utilizados para realizar un mayor seguimiento del mismo. Entre estas regiones se encuentran las zonas polares [6], las grandes reservas naturales como el Amazonas [7], o regiones naturales con un especial interés ecológico por los singulares ecosistemas que contienen [8]. Es así, que de acuerdo a un estudio [10], se indica que el fenómeno del cambio climático representa una amenaza para la capacidad de las áreas naturales protegidas de poder cumplir su misión de conservación de la biosfera. Los pronósticos de cambio en frecuencia, intensidad y espacio de los fenómenos atmosféricos en muchas áreas, incluidas las áreas protegidas, advierten variaciones y posible ocurrencia de eventos catastróficos.

En España, existe la Red de Parques Nacionales [11] que es un sistema integrado para la protección y gestión del patrimonio natural español y está conformada por quince parques nacionales, y concretamente al suroeste del territorio se ubica el Parque Nacional de Doñana (en adelante PND). Este Parque es uno de los pocos que reúne características de importancia interna-

cional al igual que otros parques de Europa y del mundo por la diversidad de flora y fauna que alberga en sus ecosistemas, entre los que se destacan las marismas, las playas, las dunas y corrales, los cotos y las veras [12].

En la actualidad se han realizado algunos estudios para conocer qué impacto está teniendo o puede tener el Cambio Climático en el PND. Se pudiera citar el estudio [13], donde se indica que los impactos potenciales del cambio climático en el PND son la desecación de los humedales, teniendo un aumento de las temperaturas de entre 1.4° C y 3.8° C y una reducción de la precipitación anual de entre el 5 y el 10% para la década del 2050. Además, se señala que el PND está ubicado entre 0 a 40 m sobre el nivel del mar (snm) y que el nivel del mar en la región ha aumentado en unos 200 mm durante el siglo pasado y si en el futuro se incrementa aún más, podría amenazar los humedales del parque a través de la inundación de agua salada.

Otro estudio [14], donde se señala que en las regiones del sur de España, las proyecciones sobre cambio climático son el incremento de la temperatura en aproximadamente 1.5° C, además de un aumento de la evaporación y una reducción de la humedad del suelo. Asimismo, una reducción de las precipitaciones, llegando hasta algunos casos hasta un 40% en la década del 2050.

De la misma forma, el estudio [15], menciona que para la década de 2080 en Doñana, la proyección de trece modelos climáticos globales usados en su estudio, predice un calentamiento de al menos 1.2° C para cada mes en esa zona. Especificando que entre los meses de noviembre a marzo, el promedio conjunto de los modelos climáticos, prevé una variación de temperatura entre 2.4° a 3.5° C, y para los meses de abril a octubre se incrementará en un rango de 4.2° a 4.7° C. Además, respecto a la precipitación media mensual y recursos de agua subterránea, se predice una disminución durante todo ese periodo.

Adicionalmente, el estudio [16], indica que debido al cambio climático, se espera que el suroeste de Europa experimente unos periodos largos y secos en verano. Esto, sumado al incremento del nivel del mar, puede significar que Doñana se vea disminuida y con el tiempo desaparecer, con graves consecuencias para las especies locales y las 300 aves migratorias que dependen de ese hábitat.

Por consiguiente, con el objeto de intensificar los estudios sobre esta temática en el PND, se ha creado el Observatorio de Cambio Global de Doñana [17], el cual tiene como función recoger todos los datos ecológicos existentes con el fin de contribuir a la investigación, conservación y gestión de este espacio natural.

Por otro lado, dentro del PND, la Estación Biológica de Doñana EBD, junto con otros centros de investigación, están monitoreando los parámetros meteorológicos, físico-químicos, hidrológicos, datos sobre las comunidades vegetales, e invertebrados acuáticos y terrestres, entre otros; y son los responsables también de la explotación de dicha información. Para ello, la EBD gestiona dos reservas científicas, la Reserva Biológica de Doñana y la Reserva Biológica de Guadamar ubicadas en Huelva y Sevilla respectivamente.

En el ámbito puramente atmosférico, en el PND se dispone de varias estaciones automáticas de meteorología, que a través de sensores remotos, miden una serie de parámetros (temperatura, viento, humedad, pluviometría, etc.), los cuales son enviados a un centro de almacenamiento de datos. Sin embargo, esta información está disponible desde hace algunos años y en la actualidad no se pueden realizar estudios de largo plazo para conocer cómo han evolucionado las variables meteorológicas en las últimas décadas.

En ese sentido, la monitorización meteorológica puede ser de utilidad en diversas disciplinas relacionadas con la flora, la fauna, inundación de las ma-

rismas, etc. No obstante, existe una carencia de este tipo de trabajos en la actualidad.

Entre las variables meteorológicas existentes que se pueden monitorear, la temperatura y la velocidad del viento son dos variables de gran interés. Por un lado, la temperatura influye y está implicada en numerosos procesos naturales, desde la aridez del suelo, crecimiento de las plantas, formación de estratos atmosféricos, lo que se conoce como estabilidad atmosférica, afección a comunidades de animales, etc. Por el otro, la velocidad del viento es un indicador de la capacidad dispersiva que tiene la atmósfera, del transporte atmosférico, así como de influir en procesos como la movilidad de duna o la desertización. Además, ambas variables, junto con la precipitación, son las más utilizadas para caracterizar el clima de una región y juegan un rol importante en el análisis y la realización de predicciones sobre el cambio climático futuro [9].

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo General**

Analizar la evolución y tendencia de la temperatura y velocidad del viento en superficie en las dos últimas décadas (1994 -2014) en el Parque Nacional de Doñana.

### **1.2.2. Objetivos Específicos**

- a) Generar una base de datos con valores de temperatura y velocidad del viento en superficie, en la región donde se ubica el PND para el periodo 1994 - 2014 (21 años), calculados por el modelo meteorológico global del Centro Europeo de Predicción a Medio Plazo (European Centre for

Medium-Range Weather Forecasts ECMWF).

- b) Estudiar la evolución promedio mensual, interanual y estacional que presentan estas dos variables en ese período.
- c) Analizar las tendencias y anomalías en las dos últimas décadas para conocer si se están viendo afectadas por el cambio climático.
- d) Relacionar la evolución de las anomalías con el indicador climático Oscilación del Atlántico Norte (North Atlantic Oscillation NAO).

# Capítulo 2

## Materiales y métodos

### 2.1. Introducción

El presente capítulo describe la zona de estudio, los materiales utilizados y la metodología seguida para el desarrollo del trabajo de investigación. En la primera sección se detalla la ubicación geográfica, características climáticas e importancia ecológica del PND. Luego, en la segunda sección, se incluyen los materiales del estudio como las variables meteorológicas e índice climático, la fuente de extracción de dichos parámetros y las herramientas informáticas usadas. Finalmente, se indica la metodología, desde la obtención de las variables hasta el tratamiento de los mismos.

### 2.2. Descripción de la zona de estudio

El Parque Nacional de Doñana, se localiza al suroeste de España, entre las latitudes de 36° 47' 41" y 37° 08' 32" N, y longitudes de 6° 15' 07" y 6° 33' 46" O; en una superficie total de 54,252 ha. Se ubica en la Comunidad Autónoma de Andalucía, en las provincias de Huelva (parte de los municipios de Almonte e Hinojos) y Sevilla (parte de los municipios de Aznalcázar y Puebla del Río).

Al Parque Nacional lo rodea el Parque Natural Doñana, con una distribución espacial atípica, puesto que se divide en cuatro sectores discontinuos: i) El Abalarío-Asperillo, paralelo a la costa de Huelva a lo largo de la carretera Matalascañas-Mazagon; ii) Sector Norte-Pinares de Hinojos; iii) Sector Este-Brazo de la Torre-Entremuros, cercano al río Guadalquivir; y iv) Pinares de Bonanza-Marismas de la Algaida, al norte de Sanlúcar de Barrameda [18]. (Fig. 2.1).

Respecto al clima del parque, el ámbito de Doñana se circunscribe en la zona climática del Mediterráneo subhúmedo, que se caracteriza por la acusada sequía estival que comprende desde el mes de junio a septiembre. Sus precipitaciones anuales oscilan entre los 500 a 600 mm, siendo sus inviernos muy suaves (por el papel suavizador de los vientos provenientes del mar) y los veranos muy calurosos.

Asimismo, el clima del parque posee una temperatura media anual de 16 a 19 °C, una media en verano inferior a 25° C y en invierno alrededor de 10° C. Las precipitaciones son muy variables, con años muy secos alcanzando menos de 200  $l/m^2$  y otros muy húmedos superando los 1,000  $l/m^2$ . Por su parte el viento, sopla predominantemente en sentido suroeste a noreste [19].

El PND presenta varios ecosistemas, se destacan las marismas, playas, dunas y corrales, cotos y veras. Las marismas ocupan casi el 50% de la superficie del parque (27000 ha) y son de importancia biológica porque alojan y alimentan a las aves de paso europeas y africanas. Las playas ocupan el litoral costero y sobre ellas crece una vegetación que da lugar a formaciones de dunas vivas. A su vez, las dunas y corrales albergan diferentes formaciones vegetales como los matorrales y los pinares. Por su parte, los cotos son ecosistemas de matorrales que alberguen una vegetación herbácea y leñosa. En ellos se pueden encontrar importantes aves y mamíferos como el águila im-



Figura 2.1: Ubicación y límites del Parque Nacional de Doñana.

perial ibérica (*Aquila adalberti*), ciervo (*Cervus elaphus*), lince ibérico (*Lynx pardinus*), entre otros. Finalmente, las veras corresponden a un ecosistema formado por las marismas y el matorral de los cotos, extendiéndose en una franja de 200 a 1500 m de ancho.

Además, respecto a la fauna característica del Parque Nacional, se destaca la presencia de 20 especies de peces de agua dulce, 11 de anfibios, 21 de reptiles, 37 de mamíferos no marinos y 360 aves, de las que 127 se reproducen habitualmente allí mismo. De la fauna endémica del parque se tiene al águila imperial ibérica y el lince ibérico [12].

## 2.3. Materiales

Para la realización del presente trabajo de investigación se ha utilizado información procedente de un modelo meteorológico de escala global del Centro Europeo de Predicción a Medio Plazo. [20]. Concretamente se ha extraído información de las variables temperatura y velocidad del viento, ambas en superficie, durante el periodo 1994 - 2014 (21 años). Además, se ha utilizado información del índice climático NAO para ese mismo periodo, el cual se ha obtenido del Centro de Predicción del Clima (Climate Prediction Center CPC) [21] de la Administración Nacional Atmosférica y Oceánica (National Oceanic and Atmospheric Administration NOAA) [22].

### 2.3.1. Variables meteorológicas e índice climático

La temperatura y el viento, junto con la precipitación, están consideradas como las variables que mejor definen las características climáticas de una región. Estas variables están relacionadas con los procesos físicos, químicos y biológicos que ocurren en el sistema climático [9].

La temperatura del aire es un elemento fundamental del clima y desde muchos puntos de vista, el más importante, ya que desempeña un papel primordial en la distribución de la vida vegetal y animal sobre la tierra [23]. En climatología la temperatura de la superficie terrestre se refiere a la temperatura del aire medida con un termómetro colocado a la sombra a una altura de 1.5 metros [24].

El viento se define como el movimiento de aire desde una zona hasta otra, ocasionado por una diferencia de presión entre dos puntos de la atmósfera.

Como ya se ha mencionado, además de las dos variables meteorológicas se ha utilizado en este trabajo un índice climático, definido como Oscilación del Atlántico Norte (NAO). Cuando se quieren investigar procesos atmosféricos a escalas temporales largas (más de una década) se utilizan índices climáticos. Es decir, que los índices son usados para describir el estado y los cambios en el sistema climático, por lo que permiten discernir el efecto de las variaciones de escala sinóptica y global en los sistemas locales; por otra parte, con esos índices se realizan análisis estadísticos tales como la comparación de series de tiempo, la estimación de medias y la identificación de valores extremos y tendencias.

Entre los índices climáticos atmosféricos, hay algunos bien conocidos como el del Niño/Niña que se utiliza en el Océano Pacífico [25] y otros menos conocidos como los que se utilizan en regiones polares (Oscilación Ártica y Antártica).

En la región del Atlántico Norte se utiliza el índice definido como NAO, que consiste en una oscilación atmosférica entre el anticiclón subtropical de las Azores y la región de bajas presiones del Frente Polar [26]. De esta forma, la NAO muestra la variabilidad de la circulación atmosférica sobre todo del continente europeo y, por tanto, puede ser utilizada también para el estudio

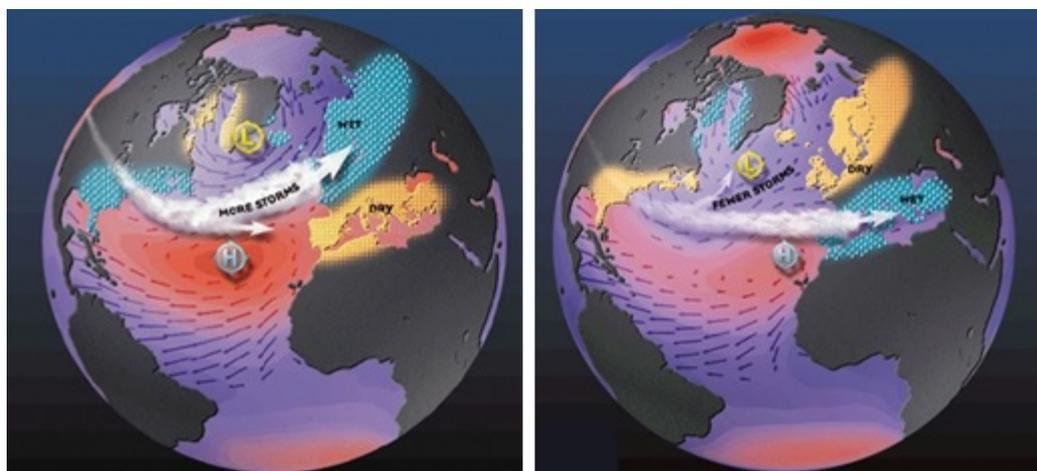


Figura 2.2: Fase positiva (izquierda) y negativa (derecha) del índice de NAO.

de la variabilidad atmosférica sobre la Península Ibérica, especialmente en invierno, cuando es más pronunciada [27].

El índice NAO es el resultado de la diferencia entre las anomalías normalizadas de la presión al nivel del mar en localidades representativas de los núcleos de las Azores (alta presión) y de Islandia (baja presión), y describe la variabilidad de la circulación atmosférica de una amplia región que abarca desde el centro de Norteamérica hasta Europa e incluso parte del norte de Asia.

La NAO presenta dos fases, una positiva y otra negativa. La fase positiva se caracteriza porque el anticiclón subtropical de las Azores presenta valores más altos de los normales, mientras que, en Islandia ocurre lo contrario; gracias a esa diferencia, las tormentas invernales que cruzan el océano Atlántico son más intensas y su trayectoria se ubica más al norte que durante la fase negativa. Como resultado el invierno es más cálido y húmedo en Europa en tanto que en el norte de Canadá y Groenlandia es más frío y seco [28]. (Fig. 2.2 - izquierda).

La fase negativa se caracteriza porque tanto la alta presión subtropical de las Azores como la baja presión de Islandia están debilitadas. El gradiente de presión es pequeño por lo que las tormentas invernales que siguen una trayectoria oeste-este son más débiles. En esta etapa se arrastra aire húmedo hacia el Mediterráneo y aire frío hacia el norte de Europa, en tanto que en la costa este de EEUU se presentan más rachas de aire frío y nevadas [28]. (Fig. 2.2 - derecha).

La obtención del Índice de NAO, se realizó a través del Centro de Predicción del Clima de la NOAA, el cual se encuentra de manera libre para cualquier usuario que lo necesite. Es así, que se recopilaron datos mensuales del índice de NAO desde el año 1994 al 2014, correspondiente a la zona de estudio, el Parque Nacional de Doñana.

### 2.3.2. Modelo meteorológico global del ECMWF

Los modelos atmosféricos utilizan un conjunto de ecuaciones matemáticas que representan los procesos físicos que ocurren en la atmósfera. Las ecuaciones que describen la dinámica atmosférica son generalmente ecuaciones diferenciales parciales, que tienen en cuenta una diferenciación en espacio y tiempo. Históricamente, el mayor uso de los modelos atmosféricos ha sido para la predicción del tiempo, y actualmente, se han desarrollado modelos meteorológicos complejos para la tropósfera y baja estratósfera [29].

En función de las escalas espaciales consideradas, los modelos atmosféricos o meteorológicos se pueden clasificar a grandes rasgos, en globales o de mesoescala. Los modelos globales recogen procesos en la escala sinóptica (varios miles de kilómetros), mientras que los de mesoescala, son capaces de reproducir fenómenos del orden de decenas a pocos kilómetros [30].

En la actualidad existen modelos globales que proporcionan información meteorológica de todo el planeta con una resolución espacial de 6 horas y que

puede variar entre  $1^\circ$  (aproximadamente 111 km) a  $0.25^\circ$  (aproximadamente 27.7 km).

Para la realización de este trabajo, se ha seleccionado el modelo global del Centro Europeo de Predicción a Medio Plazo (ECMWF). El ECMWF es una organización independiente, intergubernamental establecida en 1975 y está apoyada por 34 estados miembros, entre ellos España. El modelo ECMWF genera diferentes productos, en tiempo real se tienen datos operacionales y de predicción. Mientras, que a posteriori, se generan campos meteorológicos de re-análisis. El re-análisis se realiza cuando ya se tienen observaciones experimentales y se “fuerza” al modelo a que asimile esa información experimental.

La asimilación de datos para los productos de re-análisis en el ECMWF incluye la atmósfera, superficie de la tierra, océano, hielo del mar y el ciclo del carbono. Para ello, combina observaciones, que van desde la superficie hasta la recogida por satélites. Existen dos grandes bases de datos de re-análisis en el ECMWF, el ERA-40 y ERA-Interim [31]. Para éste trabajo se ha utilizado la información de re-análisis de ERA-Interim, el cual dispone de campos meteorológicos desde 1979 hasta la actualidad.

El acceso a la información de los campos meteorológicos de re-análisis de ERA-Interim, se puede realizar a través del Servicio Meteorológico Nacional, en este caso la Agencia Estatal de Meteorología - AEMET. La AEMET proporciona acceso a aquellos grupos de investigación (pertenecientes a universidades u organismos públicos de investigación) siempre que tengan en vigor un proyecto de investigación financiado y aprobado por el Ministerio de Economía y Competitividad - MINECO. Para este estudio, se ha podido acceder a los servidores del ECMWF y descargar la información, gracias a los proyectos que se desarrollan en el Instituto Nacional Técnico Aeroespacial - INTA, concretamente de la Subdirección de Espacio, Dpto. de Observación de la Tierra y Área de Investigación e Instrumentación Atmosférica.

### 2.3.3. Herramientas informáticas utilizadas

La extracción de la información de los servidores del ECMWF se ha realizado utilizando rutinas ya existentes. Una vez extraídos los campos meteorológicos, se ha procesado la información con programas escritos en Matlab, los cuales han permitido que se conviertan a ficheros de texto o ficheros de Excel. Luego, para el procesado de datos y elaboración de gráficas se trabajó con el programa Excel. Los datos del índice NAO han sido directamente descargados en formato texto y tratados, como en el caso de las dos variables meteorológicas, en Excel. Posteriormente, el presente documento se editó con el sistema de composición de textos  $\text{\LaTeX}$ .

## 2.4. Metodología

Por el largo periodo de estudio abordado, podríamos considerar esta investigación como diacrónica, en la que se estudian fenómenos con el objeto de verificar los cambios que se pueden producir en el tiempo. La metodología utilizada en esta investigación es cuantitativa, empleando el análisis estadístico como característica resaltante. En los siguientes apartados se describe cómo se han obtenido los datos y el proceso al que se han sometido las variables continuas empleadas.

### 2.4.1. Extracción de la información

Como se ha mencionado, los datos de temperatura y velocidad del viento en superficie, se extrajeron del modelo ECMWF. Para ello fue necesario definir una región espacial, y descargar la información en formato netcdf, con una resolución espacial de  $0.25^\circ$  y temporal de 6 horas, es decir un dato por cada cuadrícula de 27 km de lado.

El ECMWF cuenta con una base de datos en formato netcdf de diferentes variables meteorológicas, por lo cual para este estudio, se utilizó el programa

Matlab con el fin de poder leer las variables de interés en formato txt, y luego convertirlas en formato xlsx (Excel), que es el programa que finalmente se utilizó para el procesamiento de la información. A partir de los cuatro valores diarios, se calculó la media diaria y se generó un fichero para cada año con los valores diarios con fecha juliana. En el caso de la temperatura se pudo obtener directamente este parámetro del ECMWF pero en el caso de la velocidad del viento, hubo que descargar las dos componentes cartesianas, y a partir de ellas se obtuvo la velocidad.

Los valores del índice NAO mensual para cada año, se descargaron directamente en formato texto de la mencionada web. El CPC de la NOAA cuenta con ficheros de datos de diferentes índices climáticos en formato txt, por lo cual también se convirtió a formato xlsx (Excel), lo cual permitió que se continuara trabajando con el programa Excel.

### 2.4.2. Tratamiento de la información

Utilizando como base del trabajo los valores medios diarios, se calcularon las medias mensuales y anuales de las variables, con sus correspondientes desviaciones estándar. Así como la anomalía estacional, para finalmente determinar la línea de tendencia. Es así, que para establecer el tipo de función que mejor se ajuste a la posible relación entre cada variable y el tiempo (años) se hizo uso de la regresión. La regresión es la teoría que trata de expresar mediante una función matemática la relación que existe entre una variable dependiente y una (regresión simple) o varias (regresión múltiple) variables independientes [32].

En ese sentido, en el presente trabajo, al utilizar variables físicas de temperatura y velocidad del viento respecto a un periodo de años, se estaría hablando de variables cuantitativas dependientes respecto a una variable independiente (años), por lo que se trataría de una regresión simple al involucrar sólo dos variables.

Las funciones matemáticas utilizadas en el programa Excel se detallan a continuación.

#### 2.4.2.1. Media aritmética

La media aritmética de un conjunto de valores ( $x_i$ ) de una determinada variable viene definida por la fórmula:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2.1)$$

donde  $x_i$  es el valor de la variable para la muestra  $i$ , y  $n$  es el número total de muestras tomadas.

#### 2.4.2.2. Desviación estándar

La desviación estándar de un grupo de valores ( $x_i$ ) de una determinada variable viene definida por la fórmula:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2.2)$$

donde  $\bar{x}$  es la media aritmética (ecu. 2.1) de la variable estudiada, y  $n$  es el número total de muestras tomadas.

#### 2.4.2.3. Anomalía

La anomalía de un determinado periodo de tiempo (mes o año), de una variable viene dada por la siguiente fórmula:

$$\Lambda = \bar{a}_i - \bar{A} \quad (2.3)$$

donde  $\bar{a}_i$  es la media de la variable en el periodo de tiempo  $i$ , y  $\bar{A}$  es la media de todas las medias para un número  $n$  de periodos de dicha variable:

$$\bar{A} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \bar{a}_i \quad (2.4)$$

#### 2.4.2.4. Coeficiente de correlación

El coeficiente de correlación para un conjunto de valores de dos variables  $x_i$  e  $y_i$ , viene dado por la fórmula:

$$r = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 \sum(y_i - \bar{y})^2}} \quad (2.5)$$

donde  $\bar{x}$  and  $\bar{y}$  son las medias aritméticas de cada variable.

Por tanto, a partir de los valores medios mensuales se determinó la evolución promedio mensual. Igualmente, utilizando los valores medios anuales, se pudo obtener la evolución y tendencia interanual. Asimismo, seleccionando cuatro meses representativos de las estaciones del año, se obtuvo la evolución y tendencia estacional. Finalmente, se determinó la evolución anómala estacional y su relación con el índice de NAO.

A continuación se describe el procedimiento utilizado para determinar cada uno de los cuatro parámetros mencionados en el párrafo anterior.

#### 2.4.2.5. Evolución promedio mensual (EPM)

- a) Se calculó la media de las variables meteorológicas seleccionadas de cada mes del año en los 21 años, utilizando la formula (2.1), así como su respectiva desviación estándar a través de la formula (2.2).
- b) Los resultados se representaron en ejes cartesianos y se realizaron las gráficas de dispersión, donde se dibujó una línea siguiendo los puntos de los valores de la media de las variables meteorológicas, para determinar su tendencia.

#### 2.4.2.6. Evolución y tendencia interanual (ETI)

- a) Se calculó la media anual de las variables meteorológicas seleccionadas para cada año del periodo 1994 – 2014, utilizando la formula (2.1), así

como su respectiva desviación estándar utilizando la formula (2.2).

- b) Los resultados se representaron en un eje cartesiano y se realizó la gráfica de dispersión, donde se trazó la línea de tendencia y se determinó el tipo de función de regresión, así como su ecuación respectiva.

#### 2.4.2.7. Evolución y tendencia estacional (ETE)

En este caso se escogió un mes representativo de cada estación del año, siendo para invierno el mes de enero, para primavera abril, para verano julio y para otoño octubre.

- a) Se calculó la media y desviación estándar de las variables meteorológicas de cada uno de los meses representativos utilizando la formula (2.1) y la formula (2.2) respectivamente.
- b) Los resultados se representaron en ejes cartesianos y se realizaron las gráficas de dispersión, donde se trazó la línea de tendencia y se determinó el tipo de función de regresión, así como su ecuación respectiva.

#### 2.4.2.8. Evolución anómala estacional (EAE) y su relación con el índice de NAO

En este caso se utilizó como base las medias calculadas en el punto a, de la sección Evolución y tendencia estacional (ETE), y los valores del índice climático NAO de los meses representativos.

- a) Se calculó la nueva media usando la fórmula (2.4).
- b) Se determinó la anomalía estacional del periodo estudiado utilizando la fórmula (2.3).
- c) Se calculó el coeficiente de correlación entre las anomalías estacionales obtenidas de las variables meteorológicas y el índice NAO de cada mes representativo, usando la fórmula (2.5).

- c) Los resultados (anomalías positivas y negativas) de las variables meteorológicas y los valores del índice NAO, se representaron en un eje cartesiano donde se realizó una gráfica de dispersión y se dibujó una línea siguiendo los puntos.
- d) Los resultados del coeficiente de correlación se ordenaron en una tabla para visualizar y determinar el grado de correlación o anti correlación existente entre las anomalías de ambas variables y el índice NAO.

# Capítulo 3

## Resultados y Discusiones

### 3.1. Introducción

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos del procesamiento de los datos, analizándose la evolución promedio mensual, evolución y tendencia interanual y estacional; para finalizar con el estudio de las anomalías estacionales y su relación con el índice NAO. A su vez, en cada resultado obtenido se adjuntan las gráficas correspondientes.

### 3.2. Resultados y discusiones

#### 3.2.1. Evolución del promedio mensual (EPM)

Como era esperable se observa que la temperatura promedio mensual tiende a incrementarse conforme avanzan los meses del año, desde una mínima de  $10.8 \pm 0.5^\circ \text{C}$  en enero hasta llegar a una máxima de  $26.2 \pm 0.4^\circ \text{C}$  en agosto. Posteriormente, a partir de ese mes, la temperatura comienza a decrecer de nuevo hasta alcanzar los  $11.6 \pm 0.5^\circ \text{C}$  en diciembre. Ver Fig. 3.1 (a). Este un ciclo típico y representativo del hemisferio norte y latitudes medias. En cuanto a la amplitud térmica media anual, se obtuvo un valor de  $15.3^\circ \text{C}$ , que se calificaría como amplitud térmica media ( $12 - 16^\circ \text{C}$ ) [33].

Los resultados obtenidos están asociados a que el PND se ubica en una zona costera y el Océano Atlántico actúa como un agente termorregulador, resultando temperaturas suaves en invierno y elevadas en verano, característico de un clima mediterráneo.

La evolución media mensual se ha obtenido del promedio mensual de temperatura de 21 años, y es de esperarse que la tendencia a lo largo de un año siga aproximadamente el mismo patrón, es decir, que las temperaturas tiendan a incrementarse desde el mes de enero hasta los meses de julio y agosto, para luego disminuir hasta el mes de diciembre.

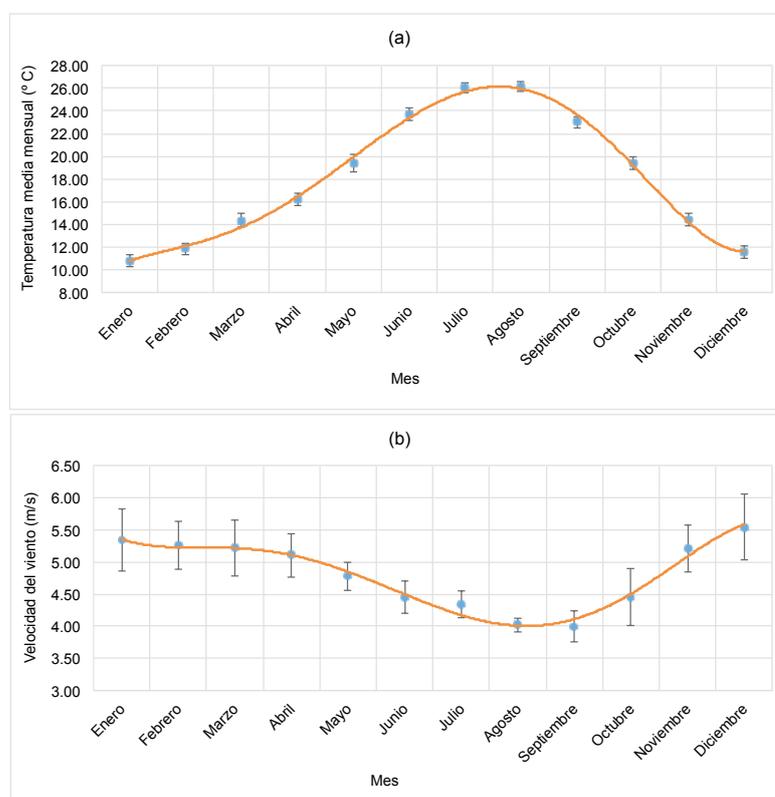


Figura 3.1: Evolución promedio mensual de la temperatura (a) y velocidad del viento (b).

Similar análisis se ha realizado con la velocidad del viento. Así la evolución promedio mensual de la velocidad del viento, a diferencia de la temperatura,

tiende a descender conforme avanzan los meses de año, desde  $5.3 \pm 0.5$  m/s en enero hasta una mínima de  $3.9 \pm 0.2$  m/s en septiembre. Luego, empieza a incrementarse hasta una máxima de  $5.6 \pm 0.5$  m/s en diciembre Ver Fig. 3.1 (b). A partir de este resultado pudiera inferirse que la tendencia a lo largo de un año concreto siga el mismo patrón mensual, es decir, que la velocidad del viento comience a descender desde el mes de enero hasta los meses de agosto y septiembre, para luego incrementar hasta el mes de diciembre.

La dinámica atmosférica que presenta las capas bajas de la atmósfera en la región de estudio viene gobernada en los meses fríos por movimientos de origen sinóptico, es decir, por la circulación general de la atmósfera. Sin embargo, en los meses cálidos, los movimientos atmosféricos en esta región están afectados por circulaciones mesoescalares como las brisas de costa, las cuales presentan una velocidad del viento más débil que bajo situaciones sinópticas. Por esta razón se obtiene la variación mensual de viento mostrada.

### 3.2.2. Evolución y tendencia interanual (ETI)

En la Fig. 3.2 (a), se presenta la evolución de la temperatura media anual, así como su línea de tendencia. Se observa que durante el periodo estudiado, la temperatura media anual presenta fluctuaciones, con un máximo de  $18.6 \pm 6.2^\circ$  C en el año 2009 y un mínimo de  $17.6 \pm 5.2^\circ$  C en el año 1996, característico de una zona cálida de España ( $17.5 - 20^\circ$  C) [33]. La línea de tendencia, obtenida como una función lineal, muestra una pendiente positiva, lo que indica un incremento anual. Según los resultados obtenidos, se ha producido un incremento de  $0.23^\circ$  C en las últimas dos décadas en el PND, es decir, un incremento de  $0.01^\circ$  C por año ( $0.11^\circ$  C por década).

De la misma forma, la Fig. 3.2 (b), muestra la evolución interanual de la velocidad media del viento, presentando fluctuaciones interanuales con una máxima de  $5.2 \pm 2.3$  m/s en el año 1996 y una mínima de  $4.4 \pm 1.7$  m/s en el año 2007. La línea de tendencia presenta una función también

lineal con pendiente positiva, lo que indicaría un incremento de 0.1 m/s en las dos últimas décadas (0.05 m/s por década y 0.005 m/s por año). Este incremento se puede considerar no significativo, puesto que un incremento de esta magnitud prácticamente no modifica la intensidad de los procesos advectivos que se pueden producir en la región. Por tanto, a escala interanual se pudiera indicar que no se están produciendo modificaciones en las últimas dos décadas, en los procesos de transporte y dispersión de sustancias químicas en el medio atmosférico del PND.

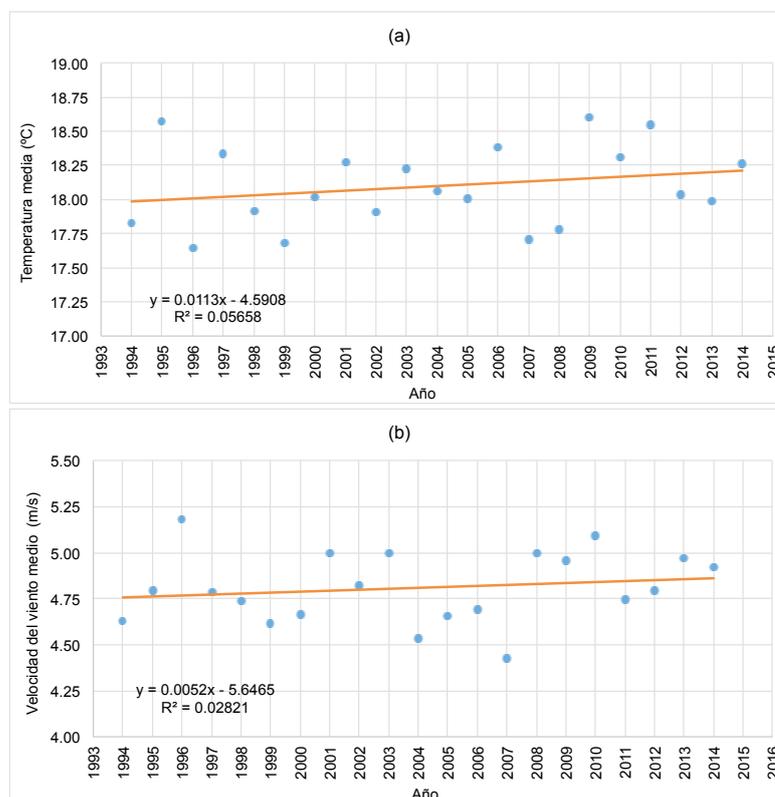


Figura 3.2: Evolución y tendencia interanual de la temperatura (a) y velocidad del viento (b).

### 3.2.3. Evolución y tendencia estacional ETE

Con el objeto de profundizar en la variación interanual respecto a lo que pudieran mostrar las variables analizadas en función a la época del año, se han seleccionado cuatro meses como representativos de las cuatro estaciones del año. Así por ejemplo, lo que se representa en la Fig. 3.3 y Fig. 3.4, para cada uno de los meses representativos, se ha obtenido como el valor medio de todos esos meses (enero, abril, julio y octubre) de estas dos últimas décadas. Además, se ha aplicado la misma estrategia de análisis que en la sección anterior (3.2.2), respecto a evolución interanual y línea de tendencia.

#### 3.2.3.1. Temperatura

Durante la estación de invierno, representado por el mes de enero (Fig. 3.3 (a)), entre la máxima de  $12.8 \pm 1.9^\circ \text{ C}$  en el año 1996 y el mínimo de  $8.9 \pm 2.3^\circ \text{ C}$  en el año 2005, hubo una variación de temperatura de  $3.9^\circ \text{ C}$ . Asimismo, se observa que la línea de tendencia presenta una pendiente negativa, con un descenso de  $0.26^\circ \text{ C}$  en las dos últimas décadas ( $0.13^\circ \text{ C}$  por década y  $0.01^\circ \text{ C}$  por año).

En cuanto a la estación de primavera, representado por el mes de abril (Fig. 3.3 (b)), se observa que hubo una variación de temperatura de  $3.6^\circ \text{ C}$  en el periodo estudiado, registrándose una máxima de  $18 \pm 1.8^\circ \text{ C}$  en el año 2011 y una mínima de  $14.4 \pm 1.3^\circ \text{ C}$  en el año 2000. La línea de tendencia presenta una pendiente positiva, con un incremento en los últimos 21 años en el PND de  $0.46^\circ \text{ C}$  ( $0.22^\circ \text{ C}$  por década y  $0.02^\circ \text{ C}$  por año).

Respecto a la estación de verano, representado por el mes de julio (Fig. 3.3 (c)), se observa que hubo una variación de temperatura de  $3.7^\circ \text{ C}$ , registrándose una máxima de  $27.5 \pm 1.3^\circ \text{ C}$  en el año 2010 y una mínima de  $23.8 \pm 2.1^\circ \text{ C}$  en el año 1997. La línea de tendencia presenta una pendiente positiva, con un incremento de  $0.04^\circ \text{ C}$  por año, lo cual indica un incremento en las dos últimas décadas de casi un grado ( $0.87^\circ \text{ C}$ ) y  $0.42^\circ \text{ C}$  por década.

Durante la estación de otoño, representado por el mes de octubre (Fig. 3.3 (d)), se observa que hubo una variación de temperatura de  $3.2^{\circ}\text{C}$  durante el periodo estudiado, registrándose una máxima de  $21.2 \pm 1.7^{\circ}\text{C}$  en el año 2009 y una mínima de  $18.0 \pm 1.4^{\circ}\text{C}$  en el año 1998. Asimismo, de nuevo la línea de tendencia presenta una pendiente positiva, con un incremento anual de  $0.04^{\circ}\text{C}$ , por década de  $0.43^{\circ}\text{C}$  y casi un grado en las dos últimas décadas ( $0.91^{\circ}\text{C}$ ).

El análisis de la variación interanual de la temperatura en las cuatro estaciones del año, ha mostrado resultados distintos. Mientras que, el invierno presenta una tendencia negativa, es decir, un enfriamiento, el resto de meses muestra una tendencia al calentamiento. Esta tendencia se hace más intensa conforme avanza el año, obteniéndose incrementos en verano y otoño que duplican a los de primavera. Si esta tendencia se mantuviera en las próximas décadas, se pudiera indicar que los inviernos serían más fríos pero el descenso de temperatura pudiera ser suave, menor de  $0.5^{\circ}\text{C}$  hasta mitad de siglo.

Sin embargo, las primaveras serían más cálidas, con un incremento general de aproximadamente  $0.8^{\circ}\text{C}$  desde el presente hasta el año 2050. El incremento más notable se produciría en verano y otoño, prácticamente las estaciones más cálidas, periodo desde junio-julio hasta octubre, con la tendencia obtenida de  $0.42^{\circ}\text{C}$  de incremento por década. Además, en los próximos 35 años (año 2050) se pudiera incrementar la temperatura en el PND aproximadamente  $1.5^{\circ}\text{C}$  en dichas estaciones.

### 3.2.3.2. Velocidad del viento

Durante la estación de invierno, representado por el mes de enero (Fig. 3.4 (a)), hubo una variación de la velocidad del viento en  $3.2\text{ m/s}$ , registrándose una máxima de  $7.3 \pm 2.9\text{ m/s}$  en el año 1996 y una mínima de  $4.1 \pm 1.5\text{ m/s}$  en el año 2012. Asimismo, se observa que la línea de tendencia presenta una pendiente negativa, con un descenso de  $0.68\text{ m/s}$  en las dos últimas décadas

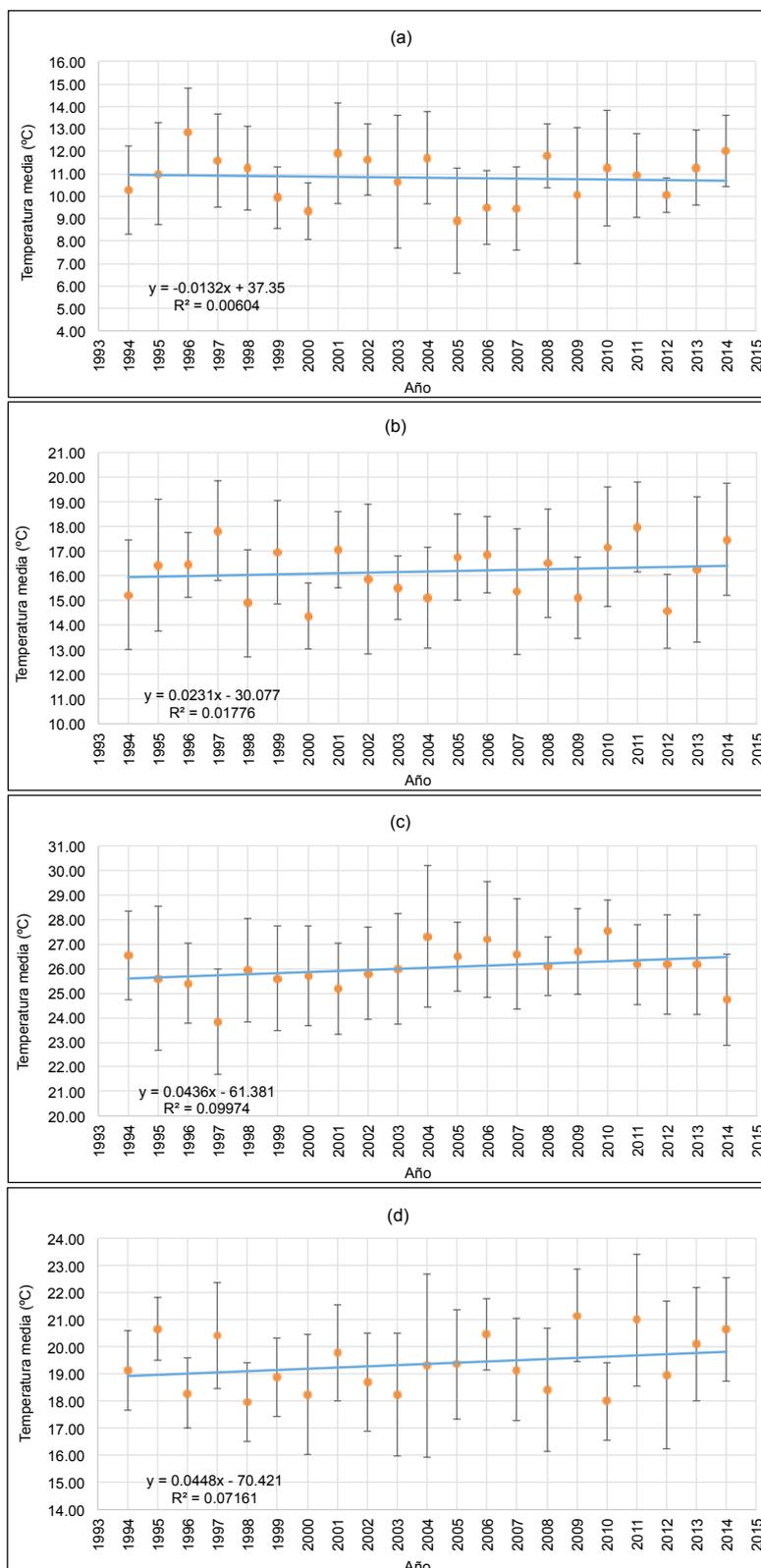


Figura 3.3: Evolución y tendencia estacional de la temperatura en verano (a), primavera (b), verano (c) y otoño (d).

(0.32 m/s por década y 0.03 m/s por año).

En cuanto a la estación de primavera, representado por el mes de abril (Fig. 3.4 (b)), se observa que hubo una variación de la velocidad del viento de 2.7 m/s durante el periodo estudiado, registrándose una máxima de  $6.6 \pm 2.8$  m/s en el año 2008 y una mínima de  $3.9 \pm 1.5$  m/s en el año 2007. La línea de tendencia presenta una pendiente positiva, con un incremento en los últimos 21 años en el PND de 0.07 (0.03 m/s por década y 0.003 m/s por año).

Respecto a la estación de verano, representado por el mes de julio (Fig. 3.4 (c)), se observa que hubo una variación de la velocidad de viento de 1.26 m/s, registrándose una máxima de  $4.9 \pm 1.5$  m/s en el año 2001 y una mínima de  $3.7 \pm 1.2$  m/s en el año 1998. La línea de tendencia presenta una pendiente positiva, con un incremento de 0.02 m/s por año, lo cual indica un incremento en las dos últimas décadas de 0.41 m/s y 0.20 m/s por década.

Respecto a la estación de otoño, representado por el mes de octubre (Fig. 3.4 (d)), se observa que hubo una variación de la velocidad del viento en 1.95 m/s durante el lapso estudiado, registrándose una máxima de  $5.6 \pm 2.4$  m/s en el año 2006 y una mínima de  $3.7 \pm 1.6$  m/s en el año 1994. Asimismo, de nuevo la línea de tendencia presenta una pendiente positiva, con un incremento anual de 0.01 m/s, por década de 0.10 m/s y en las dos últimas décadas de 0.20 m/s.

El análisis de la variación interanual de la velocidad del viento en las cuatro estaciones del año, ha mostrado, al igual que la temperatura, resultados distintos. Mientras que, el invierno presenta una tendencia negativa, es decir, menos ventosa y con capacidad de dispersión reducida, el resto de meses muestra una tendencia a tornarse más ventosa y con ello mayor circulación atmosférica. Esta tendencia se va incrementando de forma leve conforme avanza el año, obteniéndose incrementos en verano y otoño mayores que a

los de primavera. Si esta tendencia se mantuviera en las próximas décadas, se pudiera indicar que los inviernos serían menos ventosos pudiendo llegar a descender 1.18 m/s hasta la mitad del siglo (2050), disminuyendo la capacidad dispersiva en esa época del año. Sin embargo, las primaveras serían más ventosas, con un incremento general y suave de aproximadamente 0.12 m/s desde el presente hasta el año 2050. El incremento más notable se produciría en verano y otoño, las cuales serían las estaciones más ventosas, teniendo una tendencia de aproximadamente 0.20 m/s y 0.10 m/s de incremento por década respectivamente. Asimismo, en los próximos 35 años (2050) se pudiera incrementar la velocidad del viento en el PND aproximadamente hasta 0.71 m/s en verano y 0.35 m/s en otoño.

Los resultados obtenidos en esta sección estarían indicando que los inviernos presentan una tendencia a ser ligeramente más fríos y con velocidades del viento menor. En ésta estación, los escenarios meteorológicos típicos en la región vienen caracterizados por flujos continentales (interior de la Península Ibérica y continente Europeo), canalizados a través del valle del Guadalquivir; pero principalmente por flujos oceánicos (del oeste), es decir del Océano Atlántico. En ese sentido, las tendencias que se obtienen pudieran estar indicando que se estaría reduciendo la entrada de flujos del oeste, más ventosos y cálidos, e incrementándose los flujos de aire continentales del norte de Europa, más fríos y con menor velocidad.

La estación de primavera no presenta grandes cambios, en cuanto a temperatura y velocidad del viento. Sin embargo, en el verano y otoño, ambas variables analizadas, muestran tendencias más claras, con incrementos de temperatura y de velocidad. En estos meses cálidos en la región, es típico el desarrollo de procesos mesoescalares, con situaciones de bajo gradiente isobárico. Si se incrementa la velocidad del viento y la temperatura, se pudiera estar produciendo una tendencia a incrementarse no los procesos de mesoescala sino la llegada de masas de aire continentales, las cuales llegan

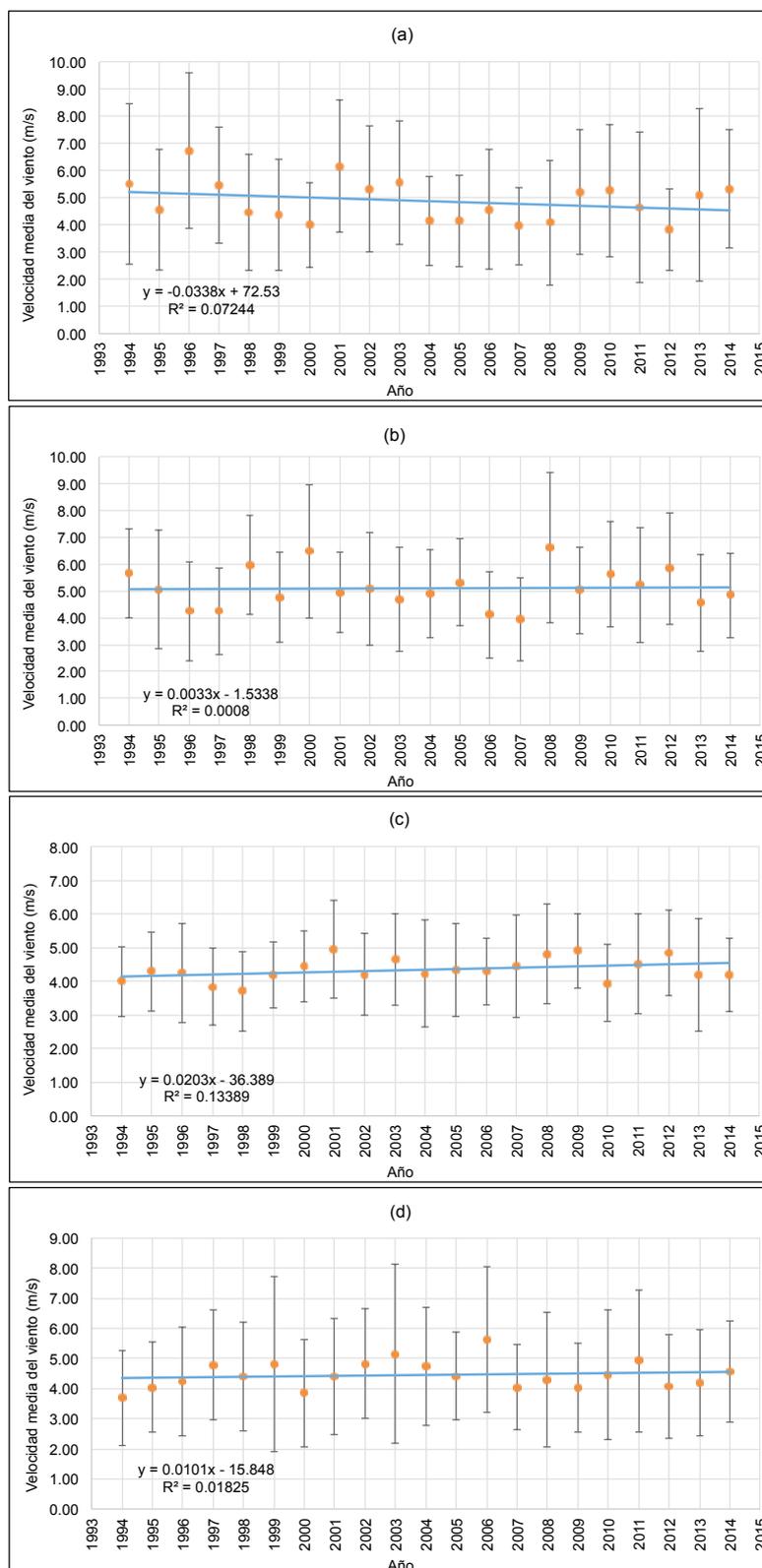


Figura 3.4: Evolución y tendencia estacional de la velocidad del viento en invierno (a), primavera (b), verano (c) y otoño (d).

con mayor velocidad y temperatura. En ambos casos, se pudiera estar incrementando la llegada de masas de aire con origen en la zona continental de la península o del norte de África. Algunos estudios recientes, aún pendientes de publicación, están apuntando en esta misma dirección, obteniendo un incremento de la llegada de masas de aire saharianas en las últimas décadas, resultados que serían coherentes con los obtenidos en este trabajo.

### **3.2.4. Evolución Anómala Estacional (EAE) y su relación con el índice NAO**

Una vez obtenidas las medias mensuales de ambas variables del periodo 1994 - 2014, se puede obtener la anomalía de cada una respecto a la serie promedio (sección 2.4.2.8). Esta anomalía se ha calculado para los cuatro meses representativos (enero, abril, julio y octubre), de las cuatro estaciones del año siguiendo similar metodología aplicada en las secciones anteriores. Cabe indicar, que debido a los errores no significativos obtenidos de las medias mensuales utilizadas para el cálculo de las anomalías, no se han tomado en cuenta para el desarrollo de ésta sección.

Las anomalías positivas, indicarán para el caso de la temperatura, meses más cálidos de lo normal, y en el caso de la velocidad del viento, meses más ventosos de lo habitual. Lo contrario pasará para anomalías negativas.

La evolución de las anomalías durante el período de estudio de los cuatro meses mencionados, se muestran en las Fig. 3.5 y Fig. 3.6 para la temperatura y velocidad del viento respectivamente. Además, con el objeto de analizar si la evolución de estas anomalías está relacionada con el índice climático NAO, se ha representado en estas mismas figuras, la evolución del índice NAO para cada uno de estos cuatro meses representativos.

### 3.2.4.1. Temperatura

Respecto a la temperatura, se puede observar que para la estación de invierno, representado por el mes de enero (Fig. 3.5 (a)), se obtuvo 12 registros de anomalías positivas (57%), con un valor máximo alcanzado de  $+2.03^{\circ}\text{C}$  en el año 1996; así como 9 negativos (43%), con un valor mínimo de  $-1.92^{\circ}\text{C}$  en el año 2005.

En cuanto a la estación de primavera, representado por el mes de abril (Fig. 3.5 (b)), se observa también 12 registros de anomalías positivas (57%), con un valor máximo alcanzado de  $+1.80^{\circ}\text{C}$  en el año 2011; así como 9 registros anómalos negativos (43%), con un valor mínimo de  $-1.81^{\circ}\text{C}$  en el año 2000.

En la estación de verano, representado por el mes julio (Fig. 3.5 (c)), se observa 11 registros de anomalías positivas (52%), con un valor máximo alcanzado de  $-1.49^{\circ}\text{C}$  en el año 2010; así como 10 registros anómalos negativos (48%), con un valor mínimo de  $-2.21^{\circ}\text{C}$  en el año 1997.

En cuanto a la estación de otoño, representado por el mes de octubre (Fig. 3.5 (d)), se observan 8 registros de anomalías positivas (38%), con un valor máximo alcanzado de  $+1.79^{\circ}\text{C}$  en el año 2009; así como 13 registros anómalos negativos (62%), con un valor mínimo de  $-1.42^{\circ}\text{C}$  en el año 1998.

Respecto a los cuatro meses representativos de cada estación, se observa que la de invierno, primavera y otoño presentaron las mayores fluctuaciones de anomalía positiva  $+2.03^{\circ}\text{C}$  (1996),  $+1.80^{\circ}\text{C}$  (2011) y  $+1.79^{\circ}\text{C}$  (2009) respectivamente; mientras que la de verano, además de invierno y primavera una mayor oscilación de anomalía negativa  $-2.21^{\circ}\text{C}$  (1997),  $-1.92^{\circ}\text{C}$  (2005) y  $-1.81^{\circ}\text{C}$  (2000) respectivamente. Sin embargo, independientemente de dichas fluctuaciones en esos años específicos, las estaciones de invierno y primavera mostraron mayores episodios anómalos positivos (57% cada una),

lo que indicaría que la temperatura observada fue más cálida respecto al valor promedio del ciclo estudiado para esos meses; y la estación de otoño, al tener mayores episodios anómalos negativos (63%), indicaría que la temperatura observada fue menos cálida respecto a su valor promedio.

Al analizar las anomalías de temperatura y su relación con el índice de NAO, se observa que independientemente de la estación del año, resulta una clara anti correlación entre ellas. Es decir, que las anomalías positivas están generalmente asociadas a índices NAO negativos y viceversa.

Como una primera aproximación, para conocer qué grado de anti correlación presentan estas dos series (anomalía de temperatura e índice NAO), se ha calculado el coeficiente de correlación lineal (igualmente se realizó para la velocidad del viento y se comentará en su respectiva sección). Los resultados obtenidos se muestran en la tabla:

Estación	Anomalía T vs NAO	Anomalía VV vs NAO
Invierno (Enero)	-0.49	-0.39
Primavera (Abril)	-0.03	-0.15
Verano (Julio)	-0.02	-0.54
Otoño (Octubre)	-0.15	-0.41

Tabla 3.1: Coeficiente de correlación lineal entre el índice NAO y la anomalía de temperatura y velocidad del viento.

De acuerdo a la tabla 3.1, se observa que todos los coeficientes de correlación calculados son negativos, por tanto, se obtiene entre ambas series una clara relación inversa o anti correlación como ya se ha mencionado, y aunque los coeficientes de correlación son bajos, son mayores en invierno (enero) y otoño (octubre) que en primavera (abril) y verano (julio). En ese sentido, la relación inversa entre la temperatura y el índice NAO indicaría que los meses fríos estarían siendo más afectados que los cálidos.

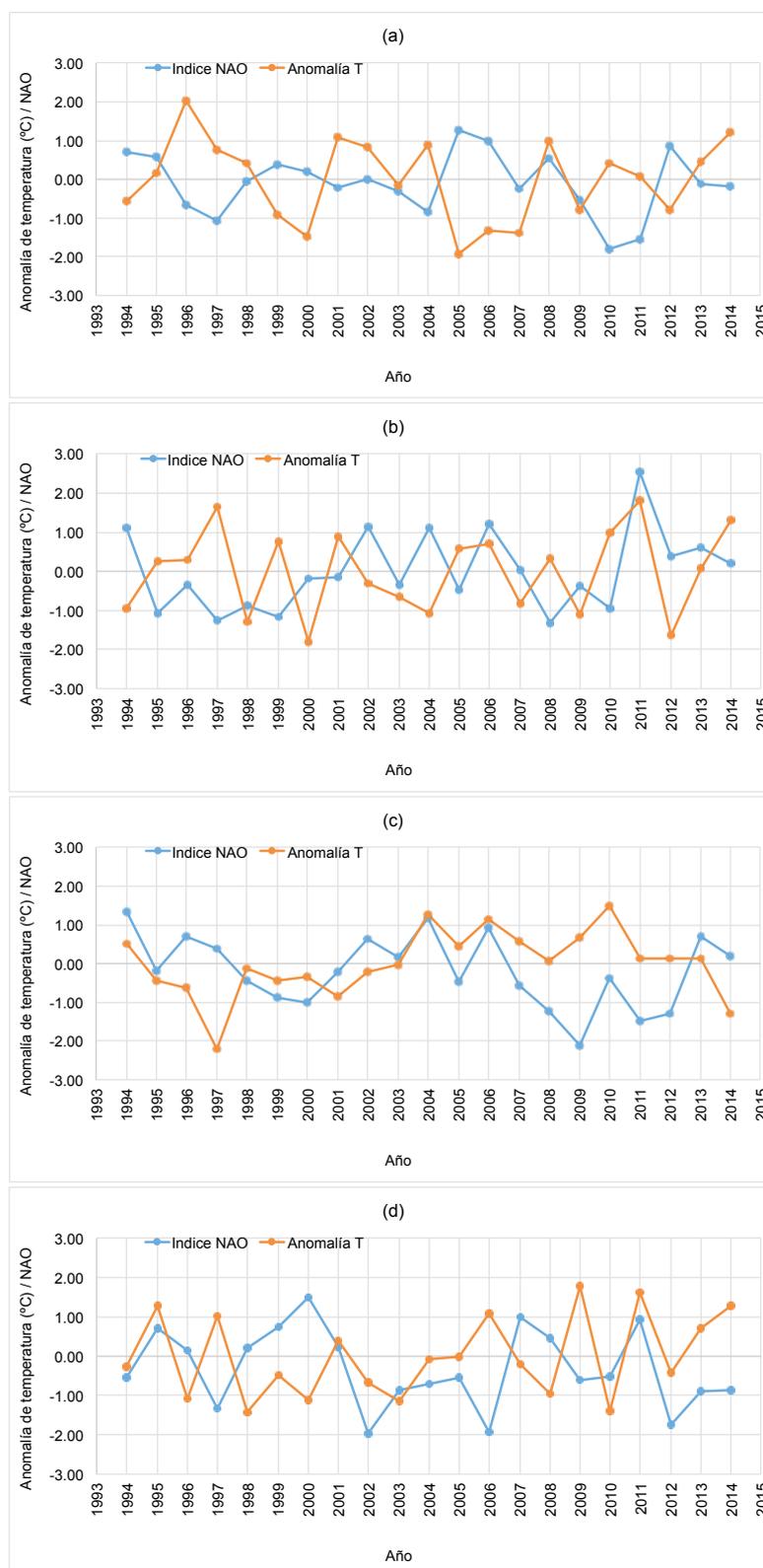


Figura 3.5: Evolución anómala estacional de la temperatura y su relación con el índice NAO en invierno (a), primavera (b), verano (c) y otoño (d).

### 3.2.4.2. Velocidad del viento

Similar estudio al realizado con la temperatura, se ha llevado a cabo para la velocidad del viento, analizando la evolución de sus anomalías para los cuatro meses representativos y su relación con el índice NAO.

La evolución anómala durante el ciclo estudiado (1994 – 2014) para la estación de invierno, representado por el mes de enero (Fig. 3.6 (a)), tuvo 10 registros de anomalías positivas (48 %), con un valor máximo alcanzado de +1.99 m/s en el año 1996; 10 registros anómalos negativos (48 %), con un valor mínimo de -1.26 m/s en el año 2012; así como un año en el que no hubo presencia de anomalía (2011).

En primavera, representado por el mes abril (Fig. 3.6 (b)), se observan 8 registros de anomalías positivas (38 %), con un valor máximo alcanzado de +1.51 m/s en el año 2008; así como 13 registros anómalos negativos (62 %), con un valor mínimo de -1.16 m/s en el año 2007.

En la estación de verano, representado por el mes de julio (Fig. 3.6 (c)), se observan 8 registros de anomalías positivas (38 %), con un valor máximo alcanzado de +0.62 en el año 2001; 12 registros anómalos negativos (57 %), con un valor mínimo de -0.64 m/s en el año 1998; así como un año en el que no hubo presencia de anomalía (2005).

En cuanto a la estación de otoño, representado por el mes de octubre (Fig. 3.6 (d)), se observan 8 registros de anomalías positivas (38 %), con un valor máximo alcanzado de +1.18 m/s en el año 2006; así como 13 registros anómalos negativos (62 %), con un valor mínimo de -0.77 en el año 1994.

Respecto a los cuatro meses representativos de cada estación, se observa que la de invierno, primavera y otoño presentaron las mayores fluctuaciones de anomalía positiva +1.99 m/s (1996), +1.51 m/s (2008) y +1.18 m/s (2006) respectivamente, además, la de invierno y primavera mostraron también una

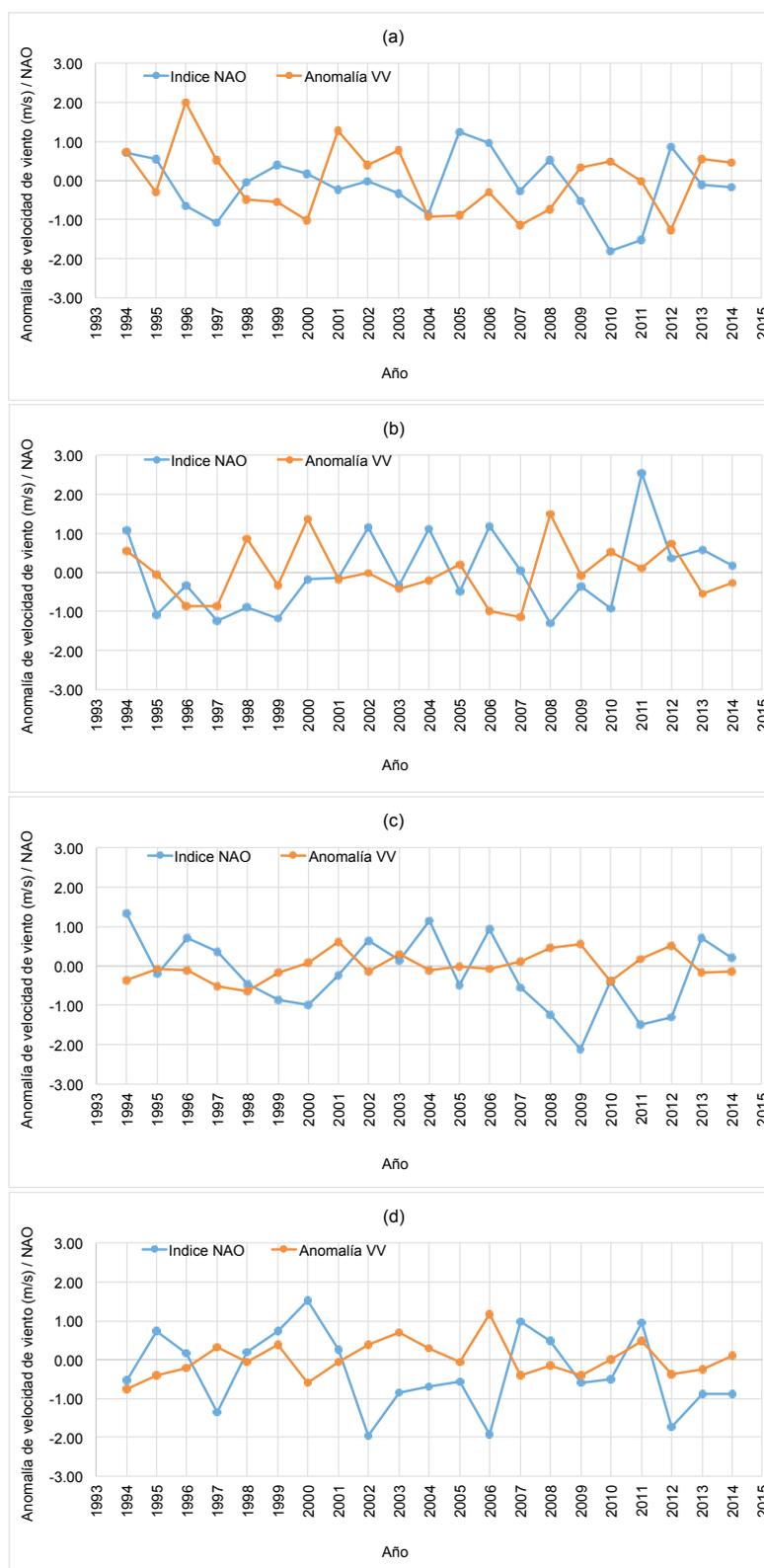


Figura 3.6: Evolución anómala estacional de la velocidad del viento y su relación con el índice NAO en invierno (a), primavera (b), verano (c) y otoño (d).

mayor oscilación de anomalía negativa  $-1.26$  m/s (2012) y  $-1.16$  (2004) respectivamente. Sin embargo, independientemente de dichas fluctuaciones en esos años específicos, las estaciones de primavera, verano y otoño, mostraron mayores episodios anómalos negativos (entre 62 a 57%), lo que indicaría que la velocidad del viento observada fue inferior (o menos ventosa) respecto al valor promedio del ciclo estudiado para esos meses. La estación de invierno mostró igual porcentaje de eventos anómalos positivos y negativos.

En cuanto al análisis de las anomalías de velocidad del viento y su relación con el índice de NAO, al igual que los resultados encontrados con la temperatura, se obtiene una correlación lineal negativa o inversa, donde las anomalías positivas de la velocidad del viento están asociadas a índices NAO negativos y viceversa. Por consiguiente, las correlaciones negativas son mayores en las estaciones de verano y otoño que en invierno y primavera.

Si se comparan los índices de correlación lineal entre el índice NAO con la temperatura y la velocidad del viento, se tiene que los obtenidos con la velocidad del viento son mayores (Tabla 3.1). Resultado esperable puesto que el índice NAO representa la variación de los flujos de aire del oeste, por tanto está más relacionado con las condiciones dinámicas que con las térmicas.

Por tanto, de los resultados obtenidos en esta sección se pudiera indicar que un índice de NAO positivo estaría asociado con valores negativos en las anomalías de la temperatura y de la velocidad del viento. Bajo condiciones de NAO positivo, es característico que los flujos de aire del oeste y la llegada de tormentas se incrementen hacia la zona de Europa central, lo cual se traduce en veranos más fríos e inviernos más húmedos. Sin embargo, al obtener anomalías negativas en ambas variables, sugiere que no llegarán los flujos del oeste y tormentas a la zona de la Península ibérica y mediterráneo occidental. Lo cual sería coherente con los resultados obtenidos, puesto que al no llegar flujos del oeste las velocidades del viento serían menores, no pre-

sentando estos flujos ese efecto regulador en las temperaturas, por lo que serían más bajas.

Un índice de NAO negativo, está asociado con anomalías positivas tanto de la temperatura como de la velocidad del viento. Bajo condiciones de NAO negativo, los flujos de aire del oeste y las tormentas que alcanzan Europa central se debilitan, teniendo inviernos más fríos y secos. Sin embargo, al obtener anomalías positivas en ambas variables, sugiere que los flujos del oeste y tormentas llegaran con más intensidad a la zona de la Península Ibérica y Mediterráneo occidental. Por tanto, al llegar esos flujos del oeste con más intensidad es coherente que las anomalías de la velocidad del viento sean positivas, mientras que las temperaturas también se incrementan por efecto de la llegada de masas de aire marítimas más cálidas húmedas que las que se pueden encontrar en la zona continental.

Finalmente, es necesario precisar, que la influencia que tiene el índice de NAO sobre una determinada región, requiere de un estudio muy detallado. En la actualidad no hay estudios de este tipo, en el que se investigue cómo la evolución del índice NAO estaría afectando al Sur de la Península Ibérica. Por ello, este trabajo ha sido un primer acercamiento, y se han obtenido unos primeros resultados que servirán para iniciar este tipo de investigación.

# Capítulo 4

## Conclusiones

La evolución promedio mensual de la temperatura y velocidad del viento, en el período de 21 años estudiados (1994 - 2014) en el Parque Nacional de Doñana, presentó una curva habitual, es decir en los primeros y últimos meses del año, la temperatura es menor y la velocidad de viento es mayor, respecto a los demás meses del año, y viceversa.

La amplitud térmica media anual de temperatura fue de  $15.3^{\circ}\text{C}$ , típica de un clima Mediterráneo, y asociado al efecto termorregulador del Océano Atlántico.

Estas variables muestran una evolución interanual asociada a los escenarios meteorológicos típicos de cada año, los cuales no son siempre regulares, resultando temperaturas entre  $17.6$  a  $18.6^{\circ}\text{C}$  y velocidades de viento entre  $4.4$  a  $5.2\text{ m/s}$ . El ajuste lineal de la evolución interanual, muestra tendencias positivas de  $0.11^{\circ}\text{C}$  y  $0.05\text{ m/s}$  por década para la temperatura y velocidad de viento respectivamente.

El análisis estacional de las dos variables estudiadas muestra en los meses más fríos de invierno, una línea de tendencia negativa, que indica que se tornará menos cálida, así como menos ventosa. Concretamente se ha pro-

ducido una reducción de  $0.13^{\circ}\text{C}$  y  $0.32\text{ m/s}$  por década en los últimos 21 años.

En el resto del año, primavera, verano y otoño; las dos variables presentan una línea de tendencia positiva, indicando una tendencia al calentamiento e incremento de la velocidad del viento. Los resultados obtenidos a partir de las líneas de tendencia obtenidas, indican que en los últimos años se ha producido un incremento entre  $0.2$  a  $0.4^{\circ}\text{C}$  y entre  $0.03$  a  $0.2\text{ m/s}$  por década. Si ésta tendencia se mantuviera, la temperatura y velocidad del viento para el año 2050, se incrementaría en  $1.5^{\circ}\text{C}$  y  $0.35$  a  $0.71\text{ m/s}$ , en el periodo de junio a octubre.

A partir del análisis de la evolución mensual de las anomalías y su relación con los valores mensuales del índice NAO, se obtiene una clara anti correlación para las dos variables y en todas las estaciones del año. Obteniéndose además, que ésta anti correlación es más fuerte en los meses fríos que en los cálidos para la temperatura y el comportamiento opuesto para la velocidad del viento.

Un índice NAO positivo conlleva a la disminución de los flujos del oeste a la Península Ibérica, lo cual es coherente con las anomalías negativas de temperatura y velocidad del viento. Por el contrario, un índice NAO negativo está asociado a un incremento de estos flujos marinos del oeste, relacionado a su vez con las anomalías positivas, incremento de la velocidad del viento y de la temperatura.

# Bibliografía

- [1] Intergovernmental Panel on Climate Change.  
<http://www.ipcc.ch/>
- [2] D. Galán & J.L. Garrido (2012). Cambio climático Perspectivas Futuras. ISSN: 0211-9803. <http://dx.doi.org//10BMD.2012.v15.40329>
- [3] J. Smith, N. Bhatti, G. Menzhulin, R. Benioff, M. Campos, B. Jallow & R. Dixon (2012). Adapting to climate change: an international perspective. Springer Science & Business Media.
- [4] IPCC (2007). Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el cambio Climático. Ginebra, Suiza. ISBN: 92-9169-322-7.
- [5] D. Campbell-Lendrum, C. Corvalán & M. Neira (2007). Global climate change: implications for international public health policy. Bulletin of the World Health Organization. Suiza. Vol 85 (3).
- [6] J. Turner, S. Colwell, G. Marshall, T. Lachlan-Cope, A. Carleton, P. Jones & S. Iagovkina (2015). Antarctic climate change during the last 50 years. International journal of Climatology, 25(3), 279-294.
- [7] C. Nobre, P. Sellers & J. Shukla (2015). Amazonian deforestation and regional climate change. Journal of Climate, 4(10), 957-988.

- [8] D. King, D. Bachelet, A. Symstad, K. Ferschweiler & M. Hobbins (2015). Estimation of potential evapotranspiration from extraterrestrial radiation, air temperature and humidity to assess future climate change effects on the vegetation of the Northern Great Plains. USA. *Ecological Modelling*, 297, 86-97.
- [9] IPCC (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland. ISBN: 978-92-9169-143-2.
- [10] E. Cuevas & M.A. Taveras (2012). *Áreas Protegidas y Cambio Climático: Perspectiva legales y acciones de gestión en República Dominicana*.
- [11] Red de Parques Nacionales.  
<http://www.magrama.gob.es/es/red-parques-nacionales>
- [12] J. Oñate, D. Pereira & F. Suárez (2012). Strategic environmental assessment of the effects of european union regional development plans in Doñana National Park. *Environmental Management* Vol. 31, N<sup>o</sup>. 5, Doi: 10.1007/s00267-002-2932-z.
- [13] M. Hulme & N. Sheard (1999). *Climate change scenarios for the Iberian peninsula*. Climate Research Unit, Norwich, UK.  
<http://whc.unesco.org/en/climatechange>
- [14] D. Stucker, & E. Lopez-Gunn (2014). *Adaptation to Climate Change through Water Resources Management: Capacity, Equity and Sustainability*. Earthscan Studies in Water Resource Management. ISBN: 978-0-415-63593-6.

- [15] C. Guardiola-Albert & C. Jackson (2011). Potential Impacts of Climate Change on Groundwater Supplies to the Doñana Wetland, Spain. *Society of Wetland Scientists* 31:907–920, DOI:10.1007/s13157-011-0205-4.
- [16] E. Fearn & K. Redfort (2011) *State of the Wild 2010-2011: A Global Portrait*. Vol. 3 of *State of the Wild*. ISBN: 978-1-59726-678-9.
- [17] Observatorio de Cambio Global de Doñana.  
<http://www.ebd.csic.es/observatorio-cambio-global>
- [18] Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía (2004). *Parque Nacional y Parque Natural Doñana: Una planificación integrada*. Sevilla, España. Editorial Consejería del Medio Ambiente. Depósito Legal: SE-3013-06.
- [19] J. Castroviejo (1993). *Mapa del Parque Nacional de Doñana*. Madrid, España. Editorial Consejo Superior de Investigaciones Científicas y Agencia de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía.
- [20] European Centre for Medium-Range Weather Forecasts.  
<http://www.ecmwf.int>
- [21] Climate Prediction Center.  
<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/>
- [22] National Oceanic and Atmospheric Administration.  
<http://www.noaa.gov/>
- [23] I. Font (2000). *Climatología de España y Portugal*, Vol. 76 de la Biblioteca de las Ciencias. Salamanca, España, Editorial Universidad de Salamanca, ISBN: 978-84-7800-944-2.
- [24] J. Fuentes (2012) *Iniciación a la Meteorología y la Climatología*. Madrid, España, Editorial Mundi-Prensa, ISBN: 84-7114-869-2.
- [25] I. Moon, S. Kim & C. Wang (2015). El Niño and intense tropical cyclones. *Nature*, 526(7575), E4-E5.

- [26] J. Hurrell (1995). Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: regional temperatures and precipitation. *Science*, 269(5224), 676-679.
- [27] S. Domínguez (2009). *La Física de índice predictivo de riesgo de incendios forestales*. Universidad de Salamanca. ISBN: 978-84-7800-265-8.
- [28] M. Jiménez (2015). Indicadores Climáticos: Una manera para identificar la variabilidad Climática a escala global. *Boletín Hidroclimático de los Mares de México*.
- [29] D. Andrews (2000). *An introduction to atmospheric physics*. Cambridge, United Kingdom. Edited by University Press. ISBN: 978-0-521-69318-9.
- [30] C. Whiteman (2000). *Mountain Meteorology: Fundamentals and Applications*, New York, United States, Edited by Oxford University Press. ISBN: 0-19-513271-8.
- [31] D. Dee, S. Uppala, A. Simmons, P. Berrisford, P. Poli, S. Kobayashi & F. Vitart (2011). The ERA-Interim re-analysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137(656), 553-597.
- [32] C. Guisande (2006). *Tratamiento de datos*. Madrid, España, Editorial Díaz Santos. ISBN: 84-7978-736-8.
- [33] Instituto Geográfico Nacional.  
<http://www.ign.es/ign/main/index.do>

# Índice de figuras

2.1. Ubicación y límites del Parque Nacional de Doñana. . . . .	17
2.2. Fase positiva (izquierda) y negativa (derecha) del índice de NAO. . . . .	20
3.1. Evolución promedio mensual de la temperatura (a) y velocidad del viento (b). . . . .	30
3.2. Evolución y tendencia interanual de la temperatura (a) y velocidad del viento (b). . . . .	32
3.3. Evolución y tendencia estacional de la temperatura en verano (a), primavera (b), verano (c) y otoño (d). . . . .	35
3.4. Evolución y tendencia estacional de la velocidad del viento en invierno (a), primavera (b), verano (c) y otoño (d). . . . .	38
3.5. Evolución anómala estacional de la temperatura y su relación con el índice NAO en invierno (a), primavera (b), verano (c) y otoño (d). . . . .	42
3.6. Evolución anómala estacional de la velocidad del viento y su relación con el índice NAO en invierno (a), primavera (b), verano (c) y otoño (d). . . . .	44