



*Escuela Técnica Superior de
Ingenieros de Caminos, Canales
y Puertos.*



UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

CARACTERIZACIÓN CLIMATOLÓGICA DE LAS CONDICIONES METEO- OCEANOGRÁFICAS EN LA COSTA CANTÁBRICA. ANÁLISIS DE PATRONES ANUALES Y EVENTOS EXTREMOS

Trabajo realizado por:

Jaime Diego Rico

Dirigido por:

Francisco José Machín Jiménez

Manuel del Jesus Peñil

Titulación:

**Máster Universitario en Gestión
Integrada de Sistemas Hídricos**

Santander, 13 de octubre de 2020

TRABAJO FINAL DE MÁSTER

CARACTERIZACIÓN CLIMATOLÓGICA DE LAS CONDICIONES METEO-OCEANOGRÁFICAS EN LA COSTA CANTÁBRICA. ANÁLISIS DE PATRONES ANUALES Y EVENTOS EXTREMOS

Jaime Diego Rico

Directores: Francisco José Machín Jiménez; Manuel del Jesus Peñil

Resumen

La costa norte española es una región que se caracteriza por su alta dependencia climática del océano. La temperatura superficial del mar (SST) ha sido identificada en diversas regiones del mundo como el mecanismo forzador de las condiciones atmosféricas, teniendo un papel muy relevante en la precipitación asociada a ciclones tropicales. En este estudio, el objetivo principal se basa en investigar la influencia de la SST en la precipitación durante eventos extremos ($>50\text{mm/diarios}$). Para ello, se analizarán las relaciones y dependencias entre distintas variables meteo-oceanográficas, teniendo en cuenta el papel de la Oscilación del Atlántico Norte (NAO) en la circulación atmosférica a gran escala.

Algunas relaciones significativas entre la precipitación, SST, salinidad, velocidad del viento, temperatura atmosférica e índice NAO han sido establecidas anualmente. Sin embargo, estas relaciones no siguen el mismo patrón en todo el tramo de costa. El principal motivo a estas diferencias lo encontramos en la orografía local, que actúa como protección frente a las borrascas de un amplio rango de direcciones. Por otro lado, las relaciones encontradas durante los eventos de precipitación extrema han presentado un comportamiento muy similar a las relaciones anuales, sin indicios significativos que nos hagan pensar que existe un mecanismo de retroalimentación que influya en la intensidad de precipitación durante estos episodios.

El estudio ofrece una visión global de los mecanismos implicados en la generación de precipitaciones sobre la costa cantábrica y la variabilidad de la intensidad de estas precipitaciones según variables meteo-oceanográficas y el índice NAO. Así como la búsqueda del efecto de liberación de calor latente en el Golfo de Vizcaya, hasta ahora poco estudiado en esta región.

Palabras clave: Climatología – Cantábrico – Relaciones anuales – Calor latente – Precipitación – NAO – Eventos extremos – Golfo de Vizcaya.

Introducción

La hipótesis inicial de este estudio se basa en que la SST es una variable condicionante en la ocurrencia de eventos de precipitación extrema en la costa norte de España. Para ello se plantea:

- Caracterizar la climatología del tramo de estudio, estableciendo diferencias, similitudes y evolución entre las 4 estaciones analizadas.
- Establecer las relaciones anuales entre las distintas variables meteo-oceanográficas, indicando cuáles son los mecanismos forzadores de éstas.
- Analizar los eventos de precipitación extrema ocurridos a lo largo del tramo de estudio, buscando patrones en el comportamiento de las variables durante estos episodios.

La zona de estudio de este trabajo se sitúa en latitudes medias del Océano Atlántico Norte, concretamente entorno a la costa del Mar Cantábrico (latitud 43 – 44° Norte y longitud 1 – 10° Oeste). Se ha partido del siguiente conjunto de datos:

- Datos diarios (1981 – 2019) de las estaciones climatológicas de A Coruña, Gijón, Santander y Hondarribia (AEMET Open Data). Variables obtenidas:
 - Precipitación (mm)
 - Temperatura atmosférica (°C)
 - Velocidad media del viento (m/s)
 - Dirección media del viento (°)
- Datos de SST diaria (1981 – 2019) entre 43-45°N y 1-10°W (CMEMS, OSTIA).
- Datos horarios de salinidad superficial de las boyas Villano-Sisargas (2002 – 2019), Cabo de Peñas (2002 – 2019) y Bilbao Vizcaya (2006 – 2019) (Puertos del Estado).
- Datos del índice NAO anual y mensual (1981 – 2019) (CPC).

Material y métodos

➤ Análisis climatológico

Se ha llevado a cabo un análisis y caracterización de las variables utilizadas en el estudio mediante el uso de climogramas y rosas de vientos. Además, se han calculado las tendencias anuales y su significancia estadística mediante la prueba Mann-Kendall. Cabe destacar que, para los análisis posteriores, se eliminará la tendencia anual a las variables con resultado significativo en esta prueba.

➤ Relaciones anuales

Esta parte de estudio se ha basado en un estudio cualitativo (gráficos de diferencias) y cuantitativo (coeficientes de correlación) entre las variables a analizar. El análisis se ha realizado a partir del cálculo de diferencias entre años consecutivos, tanto anualmente como en noviembre y diciembre. Los pares de variables sometidos a este estudio son:

- SST – Precipitación
- NAO – Precipitación
- NAO - Salinidad
- NAO – Viento
- Viento - Precipitación

➤ Eventos de precipitación extrema

Para la selección de estos eventos hemos utilizado el umbral de los 50 mm diarios de precipitación, caracterizando y cuantificando las diferencias respecto a cada estación climatológica. Tras esto, se han calculado los siguientes parámetros para cada evento:

- Anomalía media de SST en los 3 días previos al evento (total y >18°C)
- Anomalía de salinidad superficial durante el evento.
- Velocidad y dirección del viento media asociada al evento.

Estos parámetros se han sometido a un análisis cualitativo, buscando patrones significativos en el conjunto de episodios detectados para cada estación.

Resultados

➤ Análisis climatológico

Tras caracterizar la climatología en la zona de estudio, hemos observado que, en promedio, el 64% de la precipitación ocurre durante noviembre y diciembre. Por otro lado, en los climogramas se ha podido observar la gran capacidad de regulación del océano, que mantiene la temperatura atmosférica media muy cercana al valor de SST.

Además, todas las variables adquieren valores más extremos a medida que nos desplazamos hacia el Golfo de Vizcaya. En el caso del viento, las diferencias más significativas se observan en las direcciones del noreste (NE), que tienden a rolar hacia el norte en los extremos.

➤ Relaciones anuales

El conjunto de resultados obtenidos en este apartado se integra en la Tabla 1, donde podemos observar la correlación obtenida en el análisis cualitativo y su significancia estadística (verde).

Mientras, anualmente, A Coruña ha mostrado una gran dependencia del índice anual, precipitación y viento, en el resto de las estaciones esta relación se suaviza, indicando que el índice NAO anual no condiciona las condiciones en estas variables, pero sí en la salinidad. Por el contrario, durante a noviembre y diciembre (época con mayor precipitación) las relaciones entre el índice NAO, precipitación y viento se intensifican en casi la totalidad de las estaciones. Por último, cabe destacar que, en el caso de la SST, no ha habido indicios significativos de una intensificación de precipitación por liberación de calor latente.

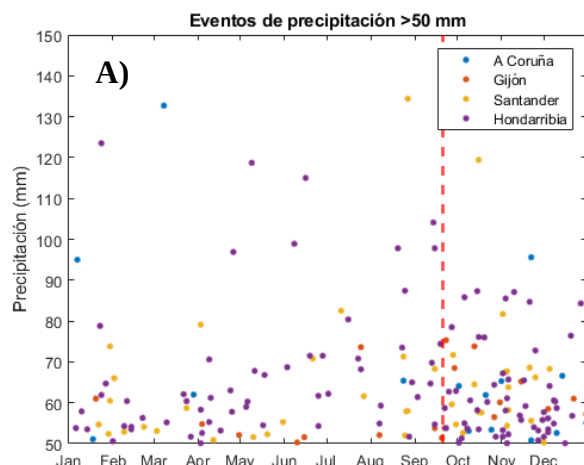
Tabla 1. Correlaciones obtenidas en las relaciones anuales en función de las estaciones de estudio. Los símbolos (-), (+) y 0 indican correlación negativa, positiva y sin tendencia destacable, respectivamente. Las celdas sombreadas en verde indican que la correlación es significativa estadísticamente al 85%.

	A Coruña	Gijón	Santander	Hondarribia
SST – Precipitación	0	-	-	-
NAO – Precipitación	-	0	+	+
NAO - Viento	-	0	0	0
Viento – Precipitación	0	-	+	0
NAO – Salinidad	-	-	-	-
SST N+D – Precipitación N+D	+	0	0	+
NAO N+D – Precipitación N+D	-	-	-	-
NAO N+D – Viento N+D	-	-	-	-
Viento N+D – Precipitación N+D	+	+	+	+

➤ Eventos de precipitación extrema

La característica principal de estos eventos sigue la misma tendencia que la precipitación anual: incrementan hacia aguas del Golfo de Vizcaya. Además, el 62% de éstos han ocurrido durante el otoño (Figura 1). Por otro lado, las anomalías calculadas indican que, generalmente, estos eventos vienen acompañados de reducciones de SST, sin haber encontrado relaciones que indiquen una alimentación por medio de la liberación de calor latente. En el caso de la salinidad, la intensa precipitación suele venir asociada a reducciones de ésta, sobre todo en otoño, cuando se produce el mayor volumen de lluvia. Por último, las condiciones del viento asociadas a estos eventos han aclarado la relación de llegada de precipitación con vientos procedentes del sector

oeste, además de poner de manifiesto el efecto de la orografía costera sobre las direcciones e intensidades.



B)

	SST		SST > 18°C		Salinidad	
	-	-	-	+	+	+
Invierno	50%	50%	0%	0%	50%	50%
Primavera	41%	41%	0%	100%	0%	100%
Verano	60%	60%	69%	31%	29%	71%
Otoño	62%	62%	80%	20%	61%	39%

Figura 1. (A) Distribución de los eventos de precipitación extrema (>50mm/día) detectados en las estaciones de estudio. La línea roja indica el comienzo del otoño. (B) Anomalías detectadas en los eventos en función de la época del año.

Conclusiones

Integrando el conjunto de resultados obtenidos, podemos afirmar que la NAO es el principal condicionante de la climatología en la zona de estudio, con mayor influencia en A Coruña. En el resto de las estaciones, debido a la orografía costera, solo el otoño ha presentado una gran dependencia similar.

El segundo gran condicionante, forzado por la NAO, es el viento, capaz de reducir la SST por liberación de calor sensible y afloramiento costero. Esta reducción es más marcada en A Coruña, y afecta a la temperatura atmosférica y salinidad. Además, la mayor energía esta zona (y mayor estratificación en el Golfo) hace que la amplitud de las variables sea mucho menor.

Por otro lado, cabe destacar que la intensificación de la precipitación por liberación de calor latente no existe, al menos, en las estaciones de A Coruña, Gijón y Santander. De hecho, lo más habitual durante los eventos de intensa precipitación, es la reducción de la SST por liberación de calor sensible, sumado a una reducción más brusca de la salinidad por el aporte de agua dulce.

Referencias destacables

- Castro, C. G., Pérez, F. F., Álvarez-Salgado, X. A., Rosón, G., & Ríos, A. F. (1994). Hydrographic conditions associated with the relaxation of an upwelling event off the Galician Coast (NW Spain). *Journal of Geophysical Research*, 99(C3), 5135. doi:10.1029/93jc02735
- García NO, Gimeno L, De La Torre L, Nieto R, Anel JA. (2005). North Atlantic Oscillation (NAO) and precipitation in Galicia (Spain). *Atmósfera* 18: 25–32.
- Phillips, I. D., & Thorpe, J. (2006). Icelandic precipitation—North Atlantic sea-surface temperature associations. *International Journal of Climatology*, 26(9), 1201-1221. doi:10.1002/joc.1302
- Schmitt, R. W., 2008: Salinity and the global water cycle. *Oceanography*, 21, 12–19, doi:10.5670/oceanog.2008.63.
- Stewart, Robert H. (2008). Introduction to physical oceanography. Texas A & M University. Available electronically from <http://hdl.handle.net/1969.1/160216>

CLIMATOLOGICAL CHARACTERIZATION OF THE METEO-OCEANOGRAPHIC CONDITIONS IN THE CANTABRIC COAST. ANALYSIS OF ANNUAL PATTERNS AND EXTREME EVENTS

Jaime Diego Rico

Directors: Francisco José Machín Jiménez; Manuel del Jesus Peñil

Abstract

The north coast of Spain is a region characterized by its high climatic dependence on the ocean. Sea surface temperature (SST) has been identified in various regions of the world as the forcing mechanism of atmospheric conditions, playing a very relevant role in precipitation associated with tropical cyclones. In this study, the main objective is to investigate the influence of SST on precipitation during extreme events ($>50\text{mm/day}$). To do this, the relationships and dependencies between different meteo-oceanographic variables will be analysed, considering the role of the North Atlantic Oscillation (NAO) in large-scale atmospheric circulation.

Some significant relationships between precipitation, SST, salinity, wind speed, atmospheric temperature, and NAO index have been established annually. However, these relationships do not follow the same pattern throughout the coastline. The main reason for these differences is found in the local orography, which acts as a protection against storms from a wide range of directions. On the other hand, the relationships found during extreme precipitation events have presented a very similar behaviour to the annual relationships, without significant indications that make us think that there is a feedback mechanism that influences the intensity of precipitation during these episodes.

The study offers a global vision of the mechanisms involved in the generation of precipitation along the Cantabrian coast and the variability of the intensity of these precipitations according to meteo-oceanographic variables and the NAO index. As well as the search for the latent heat release effect in the Bay of Biscay, little studied in this region so far.

Keywords: Climatology - Cantabrian - Annual relationships - Latent heat - Precipitation - NAO - Extreme events - Bay of Biscay.

Introduction

The initial hypothesis of this study is based on the idea of SST as a determining variable in the occurrence of extreme precipitation events on the north coast of Spain. For this, it is proposed:

- To characterize the climatology of the study section, establishing differences, similarities and evolution between the 4 stations analysed.
- To establish the annual relationships between the different meteo-oceanographic variables, indicating which are the forcing mechanisms of these.
- To analyse the extreme precipitation events that occurred throughout the study section, looking for patterns in the behaviour of the variables during these episodes.

The study area of this work is in the middle latitudes of the North Atlantic Ocean, specifically around the coast of the Cantabrian Sea (latitude 43 – 44° North and longitude 1 – 10° West). We have started from the following data set:

- Daily data (1981 – 2019) from the weather stations of A Coruña, Gijón, Santander and Hondarribia (AEMET Open Data). Obtained variables:
 - Precipitation (mm)
 - Atmospheric temperature (°C)
 - Average wind speed (m/s)
 - Average wind direction (°)
- Daily SST data (1981 - 2019) between 43-45 ° N and 1-10 ° W (CMEMS, OSTIA).
- Hourly surface salinity data from the Villano-Sisargas (2002 - 2019), Cabo de Peñas (2002 - 2019) and Bilbao Vizcaya (2006 - 2019) buoys (Puertos del Estado).
- Annual and monthly NAO index data (1981 - 2019) (CPC).

Material and methods

➤ Climate analysis

An analysis and characterization of the variables used in the study has been carried out using climagrams and wind roses. In addition, the annual trends and their statistical significance have been calculated using the Mann-Kendall test. It should be noted that, for subsequent analyses, the annual trend for the variables with significant results in this test will be eliminated.

➤ Annual relationships

This part of the paper has been based on a qualitative (graphs of differences) and quantitative (correlation coefficients) study between the variables to be analysed. The analysis has been carried out from the calculation of differences between consecutive years, both annually and in November and December. The pairs of variables subjected to this study are:

- SST – Precipitation
- NAO – Precipitation
- NAO – Salinity
- NAO – Wind
- Wind – Precipitation

➤ Extreme precipitation events

For the selection of these events we have used the threshold of 50 mm per day of precipitation, characterizing and quantifying the differences with respect to each weather station. After this, the following parameters have been calculated for each event:

- Mean SST anomaly in the 3 days prior to the event (total and > 18°C)
- Surface salinity anomaly during the event.
- Average wind speed and direction associated with the event.

These parameters have been subjected to a qualitative analysis, looking for significant patterns in the set of episodes detected for each season.

Results

➤ Climate analysis

After characterizing the climatology in the study area, we have observed that, on average, 64% of the precipitation occurs during November and December. On the other hand, in the climate charts it has been possible to observe the great regulation capacity of the ocean, which maintains the mean atmospheric temperature very close to the SST value.

Furthermore, all the variables acquire more extreme values as we move towards the Bay of Biscay. In the case of the wind, the most significant differences are observed in the northeast (NE) directions, which tend to roll northward at the extremes.

➤ Annual relationships

The set of results obtained in this section is integrated in Table 1, where we can observe the correlation obtained in the qualitative analysis and its statistical significance (green).

While, annually, A Coruña has shown a great dependence on the annual index, precipitation and wind, in the rest of the stations this relationship softens, indicating that the annual NAO index does not condition the conditions in these variables, but does in salinity. On the contrary, during November and December (time with the highest rainfall) the relationships between the NAO index, precipitation and wind intensify in almost all the seasons. Finally, it should be noted that, in the case of SST, there has been no significant evidence of precipitation intensification due to the release of latent heat.

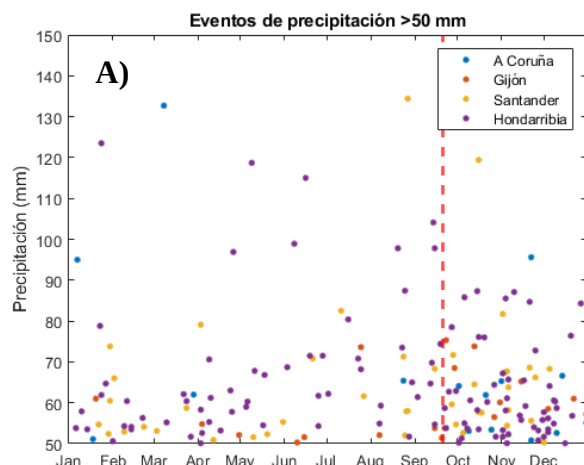
Table 2. Correlations obtained in the annual relations as a function of the study stations. The symbols (-), (+) and 0 indicate negative, positive correlation and no notable trend, respectively. Cells shaded green indicate that the correlation is statistically significant at 85%.

	A Coruña	Gijón	Santander	Hondarribia
SST – Precipitation	0	-	-	-
NAO – Precipitation	-	0	+	+
NAO - Wind	-	0	0	0
Wind – Precipitation	0	-	+	0
NAO – Salinity	-	-	-	-
SST N+D – Precipitation N+D	+	0	0	+
NAO N+D – Precipitation N+D	-	-	-	-
NAO N+D – Wind N+D	-	-	-	-
Wind N+D – Precipitation N+D	+	+	+	+

➤ Extreme precipitation events

The main feature of these events follows the same trend as annual precipitation: they increase towards the Bay of Biscay waters. In addition, 62% of these have occurred during the fall (Figure 1). On the other hand, the calculated anomalies indicate that, generally, these events are accompanied by reductions in SST, without having found relationships that indicate feeding through the release of latent heat. In the case of salinity, intense precipitation is usually associated with reductions in it, especially in autumn, when the greatest volume of rain occurs. Finally, the wind conditions associated with these events have clarified the relationship of arrival of

precipitation with winds from the western sector, in addition to highlighting the effect of the coastal orography on directions and intensities.



B)

	SST		SST > 18°C		Salinidad	
	-	-	-	+	+	+
Invierno	50%	50%	0%	0%	50%	50%
Primavera	41%	41%	0%	100%	0%	100%
Verano	60%	60%	69%	31%	29%	71%
Otoño	62%	62%	80%	20%	61%	39%

Figura 2. (A) Distribución de los eventos de precipitación extrema (>50mm/día) detectados en las estaciones de estudio. La línea roja indica el comienzo del otoño. (B) Anomalías detectadas en los eventos en función de la época del año.

Conclusions

Integrating the set of results obtained, we can affirm that the NAO is the main conditioning factor of the climatology in the study area, with the greatest influence in A Coruña. In the rest of the seasons, due to the coastal orography, only autumn has presented a similar dependence.

The second major conditioning factor, forced by the NAO, is the wind, capable of reducing the SST by releasing sensible heat and coastal upwelling. This reduction is more marked in A Coruña and affects atmospheric temperature and salinity. Furthermore, the greater energy in this area (and greater stratification in the Gulf) makes the amplitude of the variables much smaller.

On the other hand, it should be noted that the intensification of precipitation due to the release of latent heat does not exist, at least in the stations of A Coruña, Gijón and Santander. In fact, the most common thing during intense precipitation events is the reduction in SST due to release of sensible heat, added to a more abrupt reduction in salinity due to the supply of fresh water.

Notable references

- Castro, C. G., Pérez, F. F., Álvarez-Salgado, X. A., Rosón, G., & Ríos, A. F. (1994). Hydrographic conditions associated with the relaxation of an upwelling event off the Galician Coast (NW Spain). *Journal of Geophysical Research*, 99(C3), 5135. doi:10.1029/93jc02735
- García NO, Gimeno L, De La Torre L, Nieto R, Anel JA. (2005). North Atlantic Oscillation (NAO) and precipitation in Galicia (Spain). *Atmósfera* 18: 25–32.
- Phillips, I. D., & Thorpe, J. (2006). Icelandic precipitation—North Atlantic sea-surface temperature associations. *International Journal of Climatology*, 26(9), 1201-1221. doi:10.1002/joc.1302
- Schmitt, R. W., 2008: Salinity and the global water cycle. *Oceanography*, 21, 12–19, doi:10.5670/oceanog.2008.63.
- Stewart, Robert H. (2008). Introduction to physical oceanography. Texas A & M University. Available electronically from <http://hdl.handle.net/1969.1/160216>

Índice

1. Introducción	3
1.1. Interacción océano-atmósfera	3
1.2. Mecanismos forzadores a gran escala.....	3
1.3. Motivación y objetivos	4
2. Material y métodos.....	4
2.1. Zona de estudio.....	4
2.2. Variables atmosféricas.....	5
2.3. Variables oceánicas.....	6
2.4. Climatología en el Cantábrico	7
2.4.1. Tendencias.....	8
2.4.2. NAO	9
2.5. Búsqueda de relaciones anuales.....	9
2.6. Identificación de eventos y búsqueda de relaciones.....	10
3. Resultados	11
3.1. Análisis climatológico	11
3.1.1. SST + Precipitación + Temperatura atmosférica.....	11
3.1.2. Salinidad	14
3.1.3. Viento	15
3.2. Búsqueda de relaciones anuales.....	17
3.2.1. SST – Precipitación	17
3.2.2. NAO – Precipitación	18
3.2.3. NAO – Salinidad	20
3.2.4. NAO – Viento.....	21
3.2.5. Viento – Precipitación	22
3.3. Eventos de precipitación extrema (>50 mm).....	24
3.4. Búsqueda de relaciones durante eventos.....	26
3.4.1. Anomalías de SST	26
3.4.2. Anomalías de salinidad.....	28

3.4.3.	Viento	29
4.	Discusión.....	30
4.1.	Análisis climatológico	30
4.1.1.	Efecto regulador	30
4.1.2.	Influencia en la precipitación	31
4.1.3.	Salinidad	31
4.1.4.	Viento	32
4.2.	Relaciones anuales	32
4.3.	Eventos de precipitación extrema	34
4.3.1.	Anomalías de SST	35
4.3.2.	Anomalías de salinidad.....	35
4.3.3.	Anomalías de viento	36
5.	Conclusión.....	37
6.	Proyectos de trabajo futuros.....	39
7.	Referencias	39

1. Introducción

1.1. Interacción océano-atmósfera

La temperatura de la superficie del mar (SST) juega un papel clave en el control del clima debido a los procesos de evaporación, precipitación y calentamiento atmosférico (Stewart, 2008). Las anomalías en las variables atmosféricas a menudo se asocian con anomalías de la temperatura de la superficie del mar, al menos en una escala de tiempo mensual o estacional. Debido al elevado calor específico del océano, la anomalía de SST es una variable adecuada para ser utilizada como predictor climático en varios lugares del mundo. De hecho, diferentes estudios realizados durante las últimas décadas han informado que la SST puede ser de utilidad en la predicción de lluvias mensuales o estacionales, debido a la gran masa térmica del océano (Barnston, 1994). En consecuencia, cabe destacar que un océano frío induce la estabilización de la columna de aire, favoreciendo una disminución en la tasa de precipitación, mientras que un océano cálido y con anomalías de SST positivas tiende a aumentar la tasa de precipitación, por medio de la evaporación y liberación de calor latente, reduciendo la estabilidad atmosférica.

Estudios previos han demostrado y caracterizado la influencia de las anomalías de SST, así como sus patrones a escala global en la precipitación y temperatura atmosférica continentales (Barnston and Smith, 1996). En el caso del Mediterráneo y Atlántico Norte, la SST se ha relacionado con la precipitación en diferentes áreas, como en Cerdeña (Delitala et al., 2000) o en Islandia (Phillips and Thorpe, 2006).

1.2. Mecanismos forzadores a gran escala

La costa norte de España es una parte de la Península Ibérica que se sitúa en latitudes medias del hemisferio norte (43°N). Su influencia por las “jet streams” (corrientes de viento oeste) provee a esta zona con una gran variabilidad climática y, en muchos casos, una difícil predicción de la evolución meteorológica. Además, la ausencia de algún forzamiento de magnitud similar a El Niño (donde la interacción atmósfera-océano juega un gran papel) hace que la búsqueda de relaciones entre estos dos medios sea un verdadero desafío (Lorenzo et al., 2007)

En esta zona del Atlántico Norte, la NAO (Oscilación del Atlántico Norte) es el patrón dominante en la variabilidad de la circulación atmosférica (Serreze et al., 1997). En estudios anteriores, se ha comprobado que este índice tiene influencia sobre variables climáticas, como la precipitación o el afloramiento costero (deCastro et al., 2006). Sin embargo, hasta ahora no se ha tenido en cuenta su influencia en los eventos de precipitación extrema (consideremos para la zona un valor mayor de 50 litros diarios), así como en otras variables atmosféricas y oceánicas.

1.3. Motivación y objetivos

Además de la ausencia de estudios que se centren en los eventos de precipitación extrema en esta zona, sus mecanismos forzadores y el análisis de los patrones a gran escala, cabe destacar que la costa norte española es productora de una importante cantidad de energía hidroeléctrica a nivel nacional (deCastro et al., 2006). Por otro lado, las características edáficas de la mayor parte de esta área la hacen sensible a episodios cortos de sequía (Vega et al., 2006), mientras que el riesgo por crecidas fluviales e inundaciones es relativamente elevado en relación con el contexto estatal (Ibáñez et al., 2000). De hecho, la mayor parte de los procesos y las consecuencias socioeconómicas de estas inundaciones presentan grandes niveles de semejanza con los eventos de inundación en la cuenca levantina (Ollero, 1997). Todo esto hace que la precipitación, y en concreto la precipitación extrema, sea un factor clave a estudiar y tener en cuenta, así como los mecanismos y variables que influyen en el comportamiento de estos eventos.

El principal objetivo de este trabajo pretende explorar la hipótesis de que la SST es una variable condicionante en la ocurrencia de eventos de precipitación extrema en la costa norte de España. En un contexto de cambio climático con incremento de temperaturas, nos enfocaremos en analizar el comportamiento meteo-oceanográfico durante los eventos de precipitación extrema. En la siguiente sección se presentan los métodos llevados a cabo para la selección de la zona de estudio y variables a analizar. Además, se buscará y analizarán las relaciones y patrones anuales entre las variables propias de los procesos de interacción atmósfera-océano.

2. Material y métodos

2.1. Zona de estudio

La zona de estudio de este trabajo se sitúa en latitudes medias del Océano Atlántico Norte, concretamente entorno a la costa del Mar Cantábrico (latitud 43 – 44° Norte y longitud 1 – 10° Oeste) (Figura 2). Durante otoño e invierno, las “jet streams” se desplazan hacia latitudes más bajas (Gallego et al., 2005), lo que causa que los frentes fríos asociados a bajas presiones afecten a esta área, dejando abundante precipitación. Pese a ser un tramo de costa relativamente pequeño (≈ 600 Km) existen diferencias significativas en relación con determinadas variables atmosféricas y oceánicas, como veremos más adelante.

Como primer punto de este trabajo, se ha procedido a la caracterización climatológica de la zona de estudio, para más tarde proceder a la identificación de eventos de precipitación extrema y la búsqueda de relaciones. Las variables, estaciones y resoluciones con las que se ha realizado el estudio se desarrollan en los siguientes apartados.



Figura 3. Situación de la zona de estudio en la costa norte de España (Mar Cantábrico).

2.2. Variables atmosféricas

Para el conjunto de datos atmosféricos se trabajó con 4 estaciones climatológicas de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), situadas en distintas ubicaciones costeras a lo largo de todo el tramo de estudio (Tabla 2).

Tabla 3. Estaciones climatológicas (AEMET) utilizadas para llevar a cabo el estudio, junto con sus características más destacables y el porcentaje disponible de la serie de datos (1981-2019).

Estación	Identificador climatológico	Altitud (m)	Latitud	Longitud	Datos disponibles de la serie
A Coruña	1387	58	43° 21' 57" N	8° 25' 17" O	100%
Gijón	1207U	26	43° 31' 23" N	5° 37' 16" O	99,5%
Santander	1109	3	43° 25' 26" N	3° 49' 32" O	99,97%
Hondarribia	1014	4	43° 21' 25" N	1° 47' 32" O	99,83%

Todas las estaciones anteriores disponen de series de datos con resolución diaria. En nuestro caso, ha sido necesaria la extracción de las siguientes variables:

- Precipitación (mm)
- Temperatura atmosférica (°C)

- Velocidad media del viento (m/s)
- Dirección media del viento (°)

Para la obtención de las series temporales asociadas a las estaciones y parámetros anteriores, así como el tratamiento de los datos, se ha utilizado la herramienta de programación Matlab, mediante el cual se diseñó un código que permitía realizar grandes solicitudes de datos de forma automática, y almacenarlos con resolución diaria. Este paso fue necesario debido a que la base de datos OPEN Data de AEMET (<https://opendata.aemet.es>) permite, como máximo, la obtención de un mes completo de datos en cada solicitud. Finalmente se obtuvieron las series temporales entre los años 1981 y 2019 para cada estación.

2.3. Variables oceánicas

En el ámbito marino, se ha trabajado en primer lugar con la temperatura superficial del mar (SST), obtenida de la base de datos OSTIA (<https://marine.copernicus.eu>) a través del Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS). Esta base de datos dispone de una resolución temporal diaria, mientras que la resolución espacial es de $0,05^\circ \times 0,05^\circ$ de latitud-longitud. La SST fue solicitada en un rango de $43 - 45^\circ$ Norte y $1 - 10^\circ$ Oeste, entre los años 1981 y 2019.

Dada la resolución espacial utilizada en las variables atmosféricas (estaciones climatológicas), en el caso de la SST se seleccionaron 4 zonas del océano próximas a cada estación (Tabla 3). En cada una de estas zonas se hizo una media aritmética de los valores de SST, que se utilizó como representativa de la estación correspondiente. Cabe destacar que, con el objetivo de evitar la interferencia de fenómenos locales costeros (afloramiento, aportes de agua dulce...), las áreas fueron seleccionadas a una distancia media de la costa de unos de 15-20 km.

Tabla 4. Áreas oceánicas utilizadas para el análisis de la SST (equivalente a cada estación meteorológica), junto con el porcentaje disponible de la serie de datos (1981-2019).

Zona	Latitud	Longitud	Datos disponibles de la serie
A Coruña	44 – 44,5° N	8,5 – 8,75° O	95,5%
Gijón	43,75 – 44° N	5,5 – 5,75° O	95,5%
Santander	43,75 – 44° N	3,75 – 4° O	95,5%
Hondarribia	43,75 – 44° N	1,75 – 2° O	95,5%

Por otro lado, y con el objetivo de realizar un análisis más completo de la situación en el Cantábrico, se ha añadido la variable salinidad a la caracterización climatológica, así como a la posterior búsqueda de relaciones. Dada la escasa disponibilidad de datos in situ en el CMEMS, se ha procedido a solicitar las series temporales de esta variable a Puertos del Estado (<https://portus.puertos.es/Portus/html/info/infohist.html>).

El organismo anterior nos proporcionó, con resolución horaria (3h), las series temporales de salinidad superficial resumidas en la Tabla 4. Estos datos fueron transformados a resolución diaria; sin embargo, debido a la existencia de amplios periodos de lagunas de datos, las series de datos se redujeron de manera considerable.

Tabla 5. Boyas oceánicas (Puertos del Estado) utilizadas para llevar a cabo el análisis de la salinidad, junto con sus características más destacables y el porcentaje disponible de la serie de datos en cada caso.

Zona	Boya	Latitud	Longitud	Serie temporal	Datos disponibles de la serie
A Coruña	Villano-Sisargas	43,50° N	9,21° O	2002 – 2019	68,86%
Gijón	Cabo de Peñas	43,75° N	6,16° O	2002 – 2019	66,66%
Santander - Hondarribia	Bilbao-Vizcaya	43,63° N	3,04° O	2006 – 2019	75,45%



Figura 4. Mapa de la zona de estudio con las boyas oceánicas y las estaciones meteorológicas correspondientes a cada punto de estudio.

2.4. Climatología en el Cantábrico

En esta parte del trabajo se ha llevado a cabo un análisis y caracterización del comportamiento general en cada una de las variables descritas anteriormente.

En primer lugar, se ha realizado un climograma para los 4 puntos de la zona de estudio, donde se representaron la precipitación, temperatura atmosférica y SST en medias mensuales. Con esta representación se logra una visión general de la evolución de estas variables en toda la costa cantábrica, así como los diferentes patrones de precipitación y temperatura que tienen lugar.

Por otro lado, el viento de cada estación se ha representado y analizado a través de una modificación de la función de Matlab “WindRose” (Pereira, 2020). Esta herramienta permite crear un histograma de dirección-intensidad, también conocido como rosa de vientos. En nuestro caso, los 360° de dirección se dividieron en 36 direcciones principales (cada 10°) y 5 intensidades distintas. Con esto, se pueden observar fácilmente los vientos predominantes en cada estación analizada, así como las intensidades asociadas a cada dirección.

Para finalizar, en el caso de la salinidad se hizo una representación de la media diaria para las 3 boyas de estudio. Además, se ha añadido la desviación estándar correspondiente a cada día del año. El gráfico resultante ayudará, al igual que los climogramas, a caracterizar el comportamiento y evolución de esta variable a lo largo del periodo de estudio.

2.4.1. Tendencias

El enfoque habitual al considerar el análisis de tendencias consiste en una estimación de un modelo lineal para la serie de tiempo ajustada estacionalmente (Astor et al., 2013) donde el histórico de los datos tiene un comportamiento estable a lo largo del horizonte temporal. Para realizar esto, se ha aplicado un ajuste de curva polinomial al conjunto de medidas medias anuales. Gracias a este ajuste hemos obtenido la tendencia tomada a lo largo de los 39 años de datos para las variables de precipitación, temperatura atmosférica y SST.

Para llevar a cabo el proceso de incorporación, filtrado de datos y cálculo de tendencias, así como la posterior búsqueda de relaciones y representación de gráficos, se utilizó la herramienta de programación Matlab. Además, se eliminó la tendencia en la SST, precipitación y temperatura atmosférica media para evitar que ésta dominase las correlaciones.

- **Test de Mann-Kendall**

La prueba de Mann-Kendall se ha utilizado para determinar si existe una tendencia lineal estadísticamente significativa en las series de datos anuales. Se trata de una prueba no paramétrica, estrechamente relacionada con el coeficiente de correlación de Kendall y con gran solidez en el análisis de series climatológicas.

Para la realización de esta prueba se han asumido y comprobado las siguientes sentencias:

- No existe correlación significativa entre las medidas anuales de las variables analizadas.
- En ausencia de tendencia las medias anuales se distribuirían de forma independiente.
- Las medidas (en este caso la media de las medidas) representan los valores observados en el mismo momento.
- Los métodos utilizados para la recolección de medidas son imparciales.

En este caso, la hipótesis nula (H_0) establece que no hay ninguna tendencia en la serie de medias anuales, donde el nivel de significación (α) utilizado ha sido el 15%. Para llevar a cabo la prueba de Mann-Kendall se ha utilizado la herramienta de programación RStudio, concretamente, el paquete “Trend” desarrollado por Pohlert (2015).

2.4.2. NAO

Por último, se trabajó con el índice NAO anual y mensual. Los datos de índice NAO fueron obtenidos de la base de datos “Climate Prediction Center's” (CPC), donde ya han sido calculados mediante el “Rotated Principal Component Analysis” (RPCA) de Barnston and Livezey (1987) a partir de la diferencia de anomalía de presión al nivel del mar entre las Azores e Islandia.

Los índices finalmente utilizados en este estudio han sido la NAO anual y una media de los índices de noviembre y diciembre para cada año. El proceso de representación y tratamiento de datos ha sido realizado con la herramienta de programación Matlab.

2.5. Búsqueda de relaciones anuales

Previamente a la caracterización de eventos determinados, se ha realizado un estudio cualitativo de los patrones a escala anual. Un correcto análisis en este apartado nos proporcionará una visión global de la interacción de variables en la zona de estudio, ayudándonos a entender el papel de cada una de ellas.

En esta parte del trabajo utilizaremos los valores medios anuales para buscar relaciones basadas en la interacción atmósfera-océano. Además, dada la importante precipitación ocurrida durante los meses de noviembre y diciembre, se han tenido en cuenta las medidas de estos dos meses por separado. Para enfrentar unas variables con otras, utilizaremos unos gráficos de incrementos, realizados a partir del cálculo de diferencias entre años consecutivos. Éstos han sido divididos en 4 cuadrantes para facilitar su interpretación, indicando el primer y tercer cuadrante una correlación positiva, mientras que el segundo y el cuarto indican una correlación negativa (Figura 4). En este análisis cualitativo

estableceremos el umbral 60-40% para comenzar a considerar que los valores de los porcentajes son informativos. Por último, se ha añadido un coeficiente de correlación (R) así como su significancia estadística al 85%. En este caso, el nivel de significancia ha sido reducido debido a la utilización de series de datos relativamente cortas.

Los pares de variables analizados en este apartado han sido: SST – Precipitación; NAO – Precipitación; NAO – Salinidad, NAO – Viento y Viento – Precipitación. Además, se ha añadido un estudio de algunas variables de interés durante los meses de noviembre y diciembre. Para el tratamiento de datos, representación y cálculo de coeficientes y significancias se utilizó la herramienta de programación Matlab.

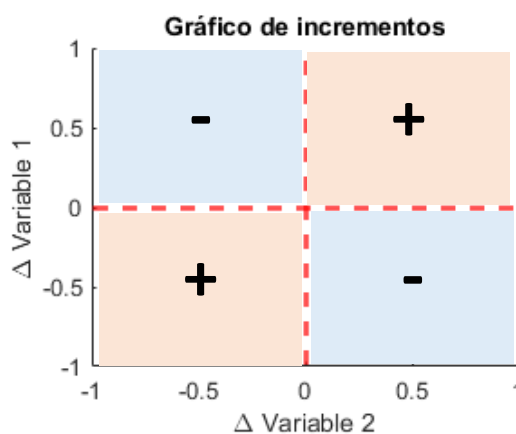


Figura 5. Estructura del diagrama de diferencias utilizado en la búsqueda de relaciones anuales. Los signos de los cuadrantes indican la correlación.

2.6. Identificación de eventos y búsqueda de relaciones

El objetivo principal de este trabajo está relacionado con la ocurrencia de eventos de precipitación extrema en el norte de España. Para la selección de estos eventos se utilizó un valor umbral de 50 mm/día, localizado a partir de las medidas pluviométricas de cada estación meteorológica. Una vez seleccionados, se representaron a lo largo de un mismo año climatológico, donde se puede observar aquellas estaciones con un mayor número de eventos, así como las épocas del año con mayor probabilidad de ocurrencia. Por otro lado, el sumatorio de la cantidad de precipitación asociada a estos eventos durante los 39 años de estudio nos proporcionará una idea de dónde se concentra una mayor intensidad de precipitación.

Tras esta cuantificación, se realizó una búsqueda de las fechas de ocurrencia de estos eventos, así como las condiciones atmosféricas y oceánicas de los días previos. Con esto, se conseguirá caracterizar las condiciones climatológicas propias de este tipo de eventos, así como los cambios repentinos en el comportamiento de las variables analizadas (anomalías). Cabe destacar que se eliminará la tendencia en las variables cuya tendencia anual asociada resulte significativa estadísticamente.

Para analizar la importancia relativa de la SST se ha calculado, a partir de la media diaria, un promedio de la anomalía en los 3 días previos a la ocurrencia del evento. Además, con el objetivo de estimar si el efecto del calor latente es significativo en rangos de SST mayores, se ha realizado el mismo proceso para aquellos episodios de precipitación en los que la SST se situó por encima de los 18°C.

Por otro lado, se ha calculado la anomalía de salinidad presente en el día de ocurrencia de cada evento de precipitación. Las variaciones de salinidad pueden estar ligadas a varios factores, como inyecciones de agua con una distinta concentración bien a través de los ríos o por episodios de precipitación intensos, así como eventos con una gran liberación de calor latente debido a la evaporación. En este estudio centraremos nuestra atención en el último caso.

Por último, en el caso del viento, las velocidades y direcciones asociadas a estos eventos han sido representadas a través de una modificación de la función de Matlab “WindRose” (Pereira, 2020). Este histograma de intensidad-dirección permite conocer qué condiciones de viento son más frecuentes durante estos eventos, lo que nos facilitará la búsqueda de una relación con la circulación atmosférica a gran escala (NAO) y el paso de borrascas.

Para el análisis estacional, los meses del año fueron agrupados de acuerdo con las estaciones climatológicas habituales de la zona: invierno (enero, febrero, marzo), primavera (abril, mayo, junio), verano (julio, agosto, septiembre) y otro (octubre, noviembre, diciembre).

3. Resultados

En la caracterización climatológica de la zona de estudio, nos centramos en aquellas variables que pueden tener una mayor importancia relativa en la precipitación (Emanuel and Sobel, 2013), principalmente la SST y temperatura atmosférica. Además, tal y como hemos anunciado en la principal hipótesis de nuestro trabajo, nos centraremos en analizar la ocurrencia de eventos de precipitación extrema (>50 mm/día).

3.1. Análisis climatológico

3.1.1. SST + Precipitación + Temperatura atmosférica

En la Figura 5 podemos observar la precipitación mensual media en cada estación de la zona de estudio, así como la temperatura atmosférica y SST mensuales medias. Cabe destacar que, como término medio, durante otoño e invierno tiene lugar la mayor descarga de la precipitación anual, dejando el 64% durante este periodo (36% en otoño y 28% en invierno). En toda la franja cantábrica, el máximo de precipitación tiene lugar durante el mes de noviembre, mientras que el mes más seco se corresponde con el mes de julio. Además, se aprecia un claro aumento de la precipitación mensual a medida que nos desplazamos hacia el este; en otras palabras, hacia el Golfo de Vizcaya llueve más. Este factor queda mejor representado en la Tabla 5, donde se resume de forma numérica algunas características de los gráficos anteriores.

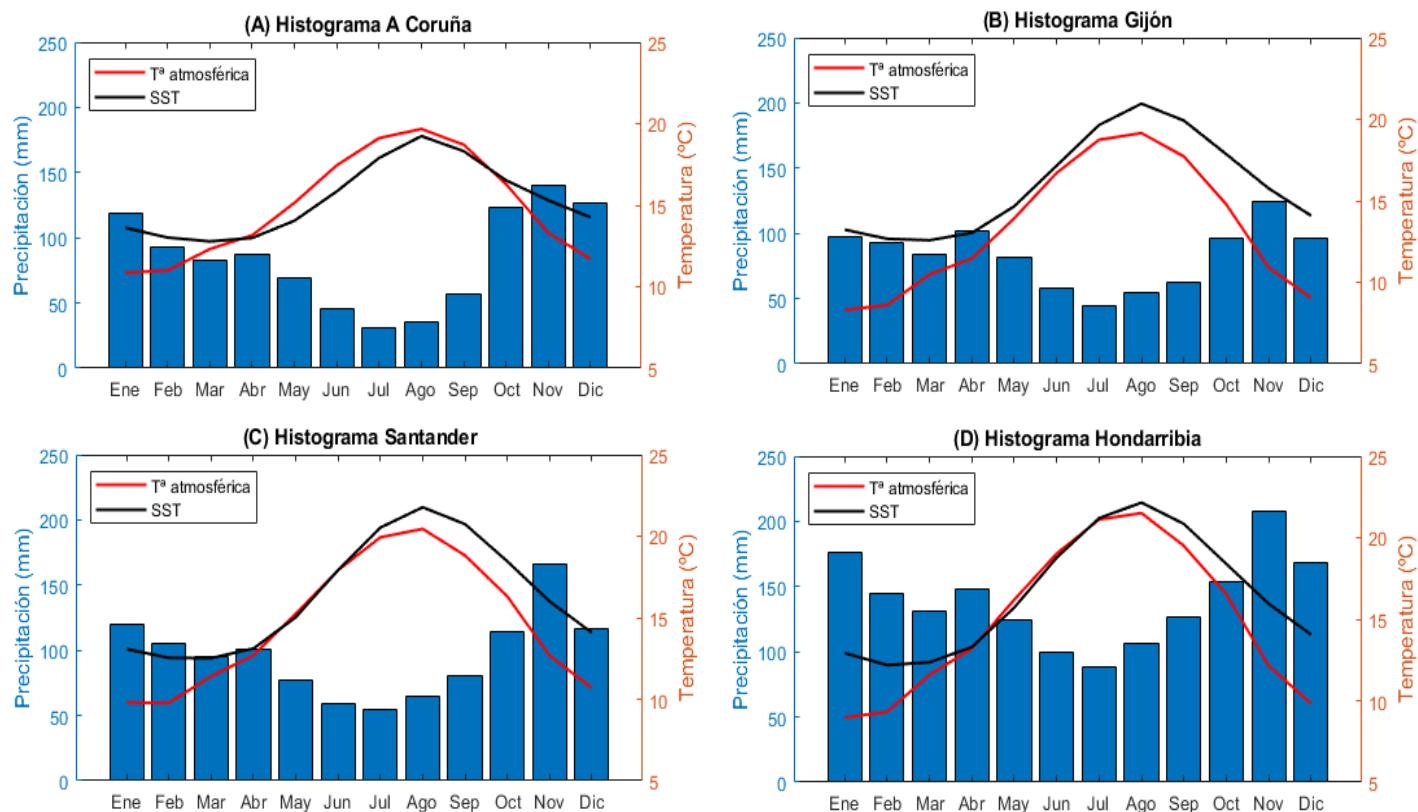


Figura 6. Histogramas de precipitación, temperatura atmosférica y SST medias mensuales en las estaciones meteorológicas de: (A) A Coruña, (B) Gijón, (C) Santander y (D) Hondarribia, entre los años 1981-2019.

Por otro lado, cabe destacar el comportamiento muy similar de la temperatura atmosférica y la SST. Estas dos variables alcanzan su máximo valor durante el mes de agosto, donde la SST suele ser ligeramente superior a la temperatura atmosférica (debido al elevado calor específico del océano y las medidas nocturnas en las estaciones climatológicas). Sin embargo, el mínimo de temperatura atmosférica y SST no coincide en el tiempo, siendo en enero y marzo, respectivamente.

En la Tabla 5 se recoge también la amplitud anual de cada variable, la cual aumenta considerablemente a medida que nos aproximamos al Golfo de Vizcaya. Esto es debido a que, pese a que los valores mínimos de estas variables son muy similares a lo largo de toda la costa cantábrica, en los meses de verano se produce un calentamiento más intenso en la zona del Golfo.

Tabla 6. Caracterización de la precipitación, temperatura atmosférica y SST medias mensuales para las estaciones de A Coruña, Gijón, Santander y Hondarribia. La temperatura atmosférica y SST presentan la variación anual media. Las series temporales abarcan los años 1981-2019.

		A Coruña	Gijón	Santander	Hondarribia
Precipitación media (mm)	Mínima (Jul)	30,6	45	54,3	88,2
	Máxima (Nov)	140,7	124,3	166,5	207,8
T^a atmosférica media (°C)	Mínima (Ene)	10,9	8,3	9,8	9
	Máxima (Ago)	19,7	19,2	20,5	21,5
	Variación anual	8,8	10,9	10,7	12,5
SST media (°C)	Mínima (Mar)	12,8	12,6	12,5	12,4
	Máxima (Ago)	19,2	21	21,8	22,2
	Variación anual	6,4	8,4	9,3	9,8

• Tendencias

Como factor complementario al análisis de estas variables, se analizaron las tendencias (1981 – 2019) de las medias anuales, estimando su significancia estadística al 95%.

En primer lugar, en la Tabla 6 se representa la tendencia obtenida para la precipitación anual en los 4 puntos analizados. Podemos observar que, en los extremos este y oeste de la costa norte española, la precipitación anual se ha mantenido prácticamente constante desde el inicio de la serie temporal. Este comportamiento no se cumple en la zona central del tramo de estudio, donde tanto Gijón como Santander presentan una tendencia significativamente mayor, superando en el caso de Gijón los 250 mm en los 39 años de la serie. Ninguna tendencia de precipitación es significativa estadísticamente, a excepción de Gijón.

En el caso de la SST, todas las estaciones presentan un incremento superior a los 0,5°C desde el año 1981 (Tabla 6). Este resultado es un indicador claro del calentamiento global que, en el caso de nuestra zona de estudio, alcanza su máximo en la zona central

(Santander y Gijón) al igual que la precipitación. En estas estaciones, el calentamiento se aproxima a 1°C. Todas las tendencias de SST son significativas estadísticamente.

Por último, en la Tabla 6 se representan las tendencias asociadas a la temperatura atmosférica, la cual sigue un patrón muy similar al de la SST. En este caso, el máximo incremento corresponde a la estación de Santander, con más de 1°C en 39 años. Por el contrario, Gijón es la estación donde este incremento ha sido menor, con 0,6°C. Todas las tendencias de temperatura atmosférica son significativas estadísticamente.

Tabla 7. Tendencias anuales de precipitación, temperatura atmosférica y SST asociadas a las estaciones de A Coruña, Gijón, Santander y Hondarribia. Tendencia anual media para la zona de estudio. () El asterisco indica la comprobación estadística según la prueba Mann-Kendal a un nivel significativo del 95%.*

	TENDENCIAS ANUALES				
	A Coruña	Gijón	Santander	Hondarribia	Media
Precipitación (mm/década)	11	68*	36	13	32
Temperatura atmosférica (°C/década)	0,24*	0,16*	0,27*	0,21*	0,22*
SST (°C/década)	0,17*	0,24*	0,25*	0,25*	0,22*

3.1.2. Salinidad

En el caso de la salinidad, podemos observar en la Figura 6 una media diaria de los datos correspondientes a las 3 boyas disponibles, junto con la desviación estándar aplicada a cada día del año. La principal característica que se puede apreciar en estos gráficos es la relativa estabilidad de los niveles de salinidad en la costa cantábrica, destacando sobre todo en la zona oeste (A Coruña). A medida que nos desplazamos hacia el Golfo de Vizcaya, se puede observar una mayor variabilidad en los niveles de salinidad (mayor desviación en cada dato diario). Además, en este desplazamiento hacia el este resalta una significativa disminución de la salinidad en los meses de verano (Tabla 7), alcanzando los valores máximos durante diciembre-enero.

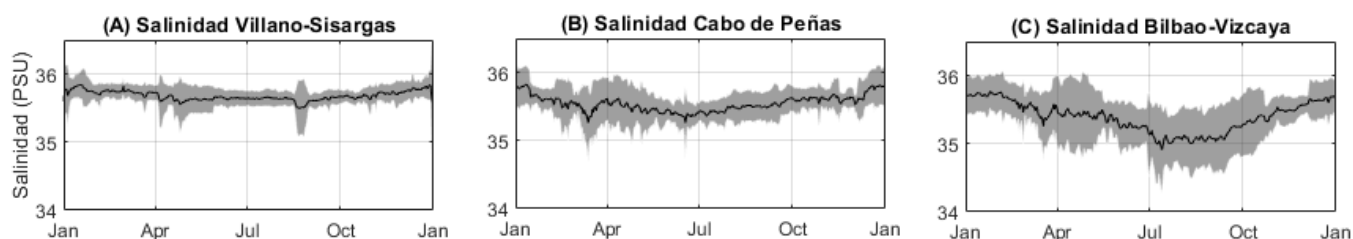


Figura 7. Salinidad diaria media junto con desviación estándar en las boyas oceánicas de: (A) Villano Sisargas (2002-2019), (B) Cabo de Peñas (2002-2019) y (C) Bilbao-Vizcaya (2006-2019).

Tabla 8. Caracterización de la salinidad media mensual para las boyas de Villano Sisargas (2006-2019), Cabo de Peñas (2006-2019) y Bilbao-Vizcaya (2002-2019). Variación anual media para cada boya.

		Villano - Sisargas	Cabo de Peñas	Bilbao - Vizcaya
Salinidad (PSU)	Mínima (Jul)	35,50	35,26	34,91
	Máxima (Nov)	35,84	35,82	35,77
	Media	35,75	35,56	35,44
	Variación anual	0,34	0,56	0,86

Cabe destacar que, debido a la significativa falta de datos en las series temporales de salinidad, puede haber determinados cambios en el comportamiento de esta variable que no estén correctamente representados, así como desviaciones estándar demasiado altas. Además, la tendencia no fue calculada para esta variable, dada la escasa longitud de la serie temporal.

3.1.3. Viento

Por último, se han tratado de caracterizar los vientos predominantes en cada estación de estudio. Para ello se ha diseñado una rosa de vientos, donde se ha estimado la frecuencia de ocurrencia en función tanto de la velocidad media diaria como de la dirección (Figura 7).

Si dividimos la representación anterior en 8 sectores (cada 45°) y asignamos a cada dirección de las series temporales uno de estos sectores, obtenemos la Tabla 8, donde podemos comparar las direcciones predominantes en cada una de las estaciones estudiadas. En primer lugar, cabe destacar que el viento procedente del oeste (W) es predominante a lo largo de toda la costa, debido a la situación de la zona de estudio en las “jet streams”, azotadas por trenes de borrascas que se mueven en dirección oeste-este, como mencionamos anteriormente. Por otro lado, en el caso de los extremos este y oeste

(Hondarribia y A Coruña) observamos que, mientras una de las direcciones predominantes es del norte (N), en la zona central de la costa pasa a rolar a noreste (NE). Este fenómeno, el cual discutiremos más adelante, podría estar relacionado con el régimen de brisas marinas.

Para finalizar, cabe destacar que los vientos procedentes del sureste (SE) son minoritarios en toda la zona de estudio, debido a que la circulación atmosférica de esta zona, así como la circulación de las borrascas en el hemisferio norte (sentido contrario de las agujas del reloj), no favorecen estas condiciones.

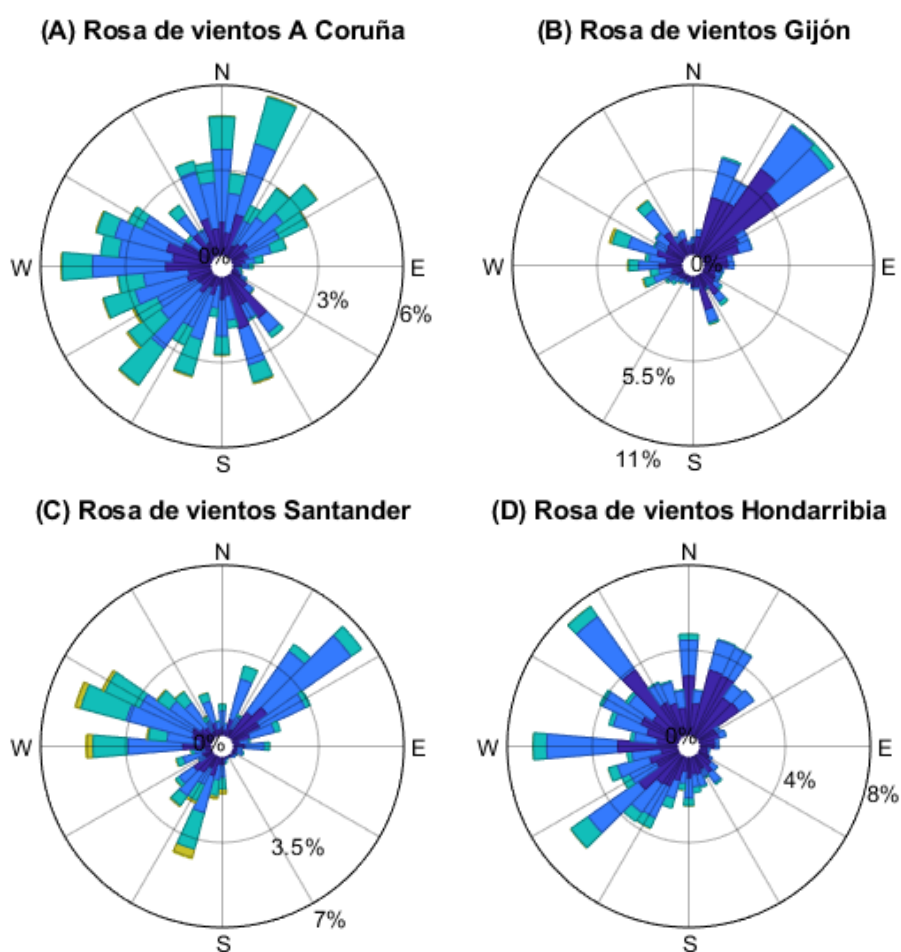


Figura 8. Intensidad y dirección medias del viento en las estaciones de (A) A Coruña, (B) Gijón, (C) Santander y (D) Hondarribia. Las series temporales abarcan los años 1981-2019. Las direcciones se encuentran divididas en 36 sectores (cada 10°).

Tabla 9. Izquierda: Leyenda asociada a Figura 6. Derecha: Frecuencia asociada (%) a cada dirección de viento en las estaciones de (A) A Coruña, (B) Gijón, (C) Santander y (D) Hondarribia. Las series temporales abarcan los años 1981-2019. Las direcciones se encuentran divididas en 8 sectores (cada 45°).

Velocidad viento (m/s)	Frecuencia (%)							
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
$W_S \geq 15$								
$10 \leq W_S < 15$								
$5 \leq W_S < 10$								
$2.5 \leq W_S < 5$								
$0 \leq W_S < 2.5$								
A Coruña	20	12	5	6	14	15	21	7
Gijón	13	33	11	7	5	4	16	11
Santander	10	23	7	1	11	10	23	15
Hondarribia	18	12	4	5	10	16	19	16

3.2. Búsqueda de relaciones anuales

En esta sección del trabajo se ha realizado un estudio de la existencia de patrones significativos en variables de interés, para los 39 años de serie temporal climatológica. Se han eliminado aquellas tendencias anuales estadísticamente significativas (SST y temperatura atmosférica) con el objetivo de eliminar interferencias debidas a factores externos, como lo es el calentamiento global. El umbral utilizado en el análisis cualitativo de porcentajes ha sido 60-40%. La significancia estadística de las correlaciones, por su parte, es del 85%.

3.2.1. SST – Precipitación

En la Figura 8 se representan los incrementos de la SST y precipitación medias anuales, donde podemos apreciar una ligera correlación negativa en la zona de A Coruña, que se torna positiva en el resto del tramo de estudio. Si nos fijamos en los datos numéricos, comprobamos que, en A Coruña, no hay una clara tendencia, en tanto que un 51,4% de los años con SST anual mayor indica que llueve más mientras en un 48,6% indica que llueve menos. Este patrón se aclara hacia la zona del Golfo, donde en Gijón, Santander y Hondarribia un 62,2% y un 75,7% y 67,6% de los años con una SST anual mayor, llueve menos, respectivamente.

En este caso, los coeficientes de correlación (R) indican que el patrón observado en el análisis cualitativo solo se puede respaldar estadísticamente en las estaciones de Gijón y Santander.

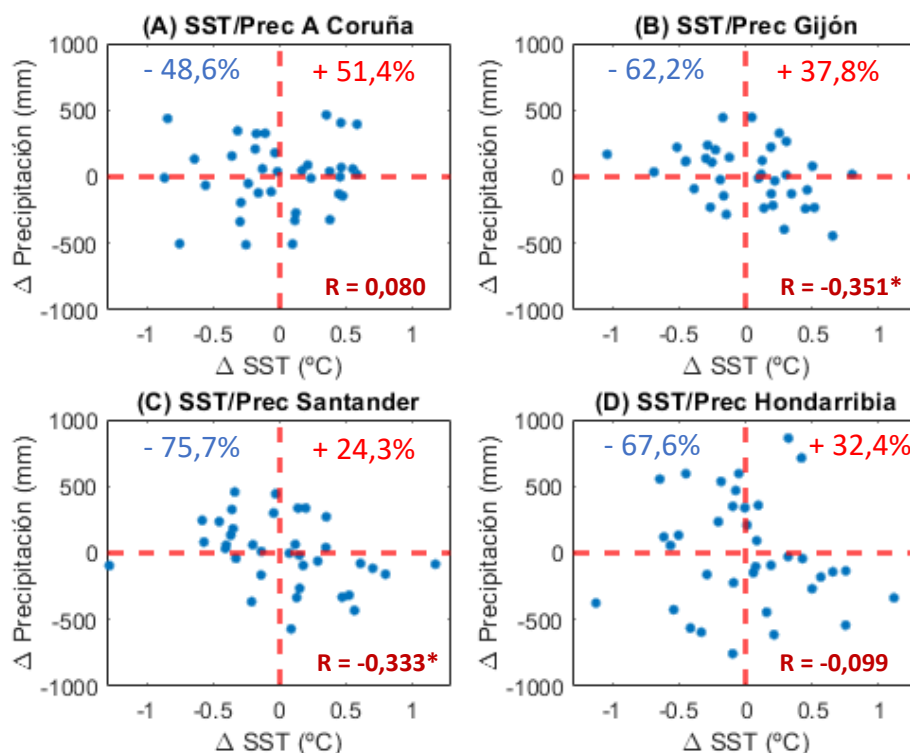


Figura 9. Diagrama de incrementos para la precipitación y la SST medias anuales en las estaciones de (A) A Coruña, (B) Gijón, (C) Santander, (D) Hondarribia. Abajo a la derecha de cada diagrama se muestra el coeficiente de correlación entre las dos variables. (*) El asterisco indica la comprobación estadística de la correlación a un nivel significativo del 85%.

Por otro lado, en el caso de la precipitación y SST anuales medias en los meses de noviembre y diciembre (Figura 9), tenemos un comportamiento muy similar en la zona de A Coruña, que en este caso se extiende a las estaciones de Gijón y Santander, sin indicar una tendencia destacable. Sin embargo, sí que se aprecia una correlación positiva en Hondarribia, donde el 66,7% de los años con una SST otoñal mayor reciben una mayor cantidad de precipitación durante noviembre y diciembre.

Los coeficientes de correlación (R) de la Figura 9 manifiestan que las correlaciones obtenidas son solo significativas en la estación de A Coruña.

En resumen, los resultados obtenidos muestran que una SST anual mayor suele implicar menor precipitación en la costa cantábrica. Por el contrario, un otoño con una SST mayor de lo normal en A Coruña y Hondarribia podría traer una mayor cantidad de precipitación en estos meses, pero los resultados no son del todo significativos.

3.2.2. NAO – Precipitación

Por otro lado, se ha procedido al análisis de la precipitación frente al comportamiento de la NAO, tanto anual como estacional. En primer lugar, en la Figura 10 se representa la NAO frente a la precipitación anual en cada una de las estaciones. A Coruña es la única

estación que sigue un patrón distinto al resto, en el que el 54% de los casos una NAO anual negativa indica mayor lluvia. Por el contrario, Gijón y Santander cumplen este patrón el 35,1% de las veces, mientras que Hondarribia el 40,5%. Pese a que el porcentaje de años solo supera el umbral establecido en Santander, los coeficientes de correlación (R) de la Figura 10 manifiestan que las únicas correlaciones significativas las encontramos en A Coruña (negativa) y Hondarribia (positiva), con lo que se confirma el cambio de patrón mencionado anteriormente, a lo largo de la costa cantábrica.

Este resultado nos da información de la situación de A Coruña en la costa atlántica, la cual tiene una mayor exposición para recibir borrascas que el resto de la costa norte española.

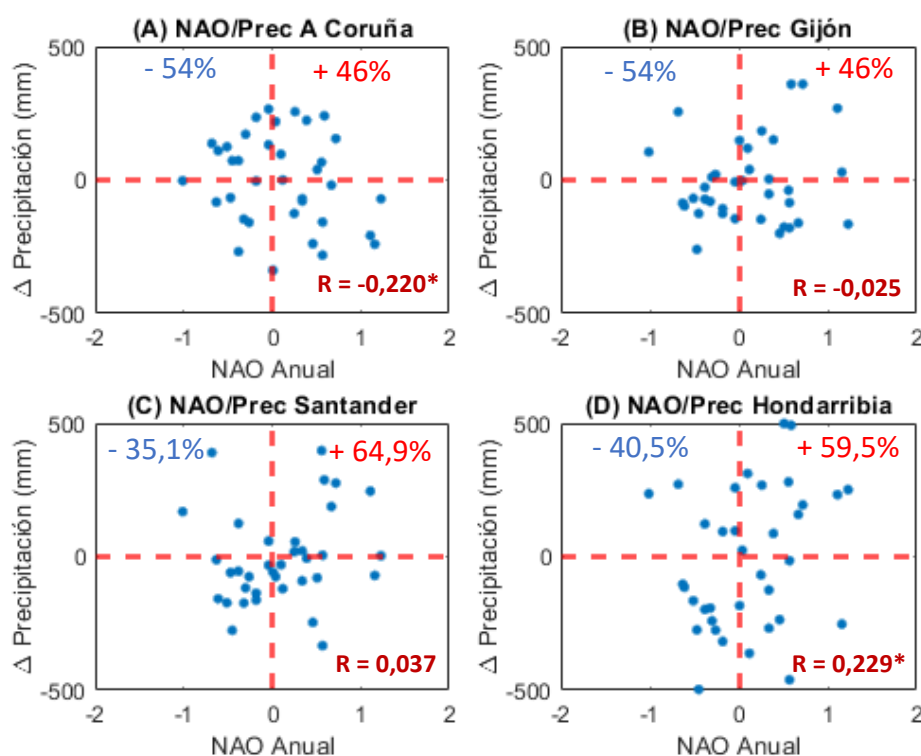


Figura 10. Diagrama de incrementos para la precipitación media anual y el índice NAO anual en las estaciones de (A) A Coruña, (B) Gijón, (C) Santander, (D) Hondarribia. Abajo a la derecha de cada diagrama se muestra el coeficiente de correlación entre las dos variables. (*) El asterisco indica la comprobación estadística de la correlación a un nivel significativo del 85%.

Dada la gran importancia que tienen las lluvias durante el otoño en esta zona, hemos hecho un análisis específico del índice NAO medio en noviembre y diciembre, representándolo frente a la precipitación en estos meses (Figura 11). Los resultados de este gráfico indican que, en la zona de A Coruña, el 78,4% de los otoños con una NAO negativa, son más lluviosos. Para el resto de la costa, se mantiene el mismo patrón en el 59,5% de los años de la serie temporal. Una vez más, se recalca la mayor influencia de la estación de A Coruña por el índice NAO.

En este caso, los coeficientes de correlación (R) indican que el patrón observado en el análisis cualitativo se puede respaldar estadísticamente en las estaciones de A Coruña, Gijón y Hondarribia.

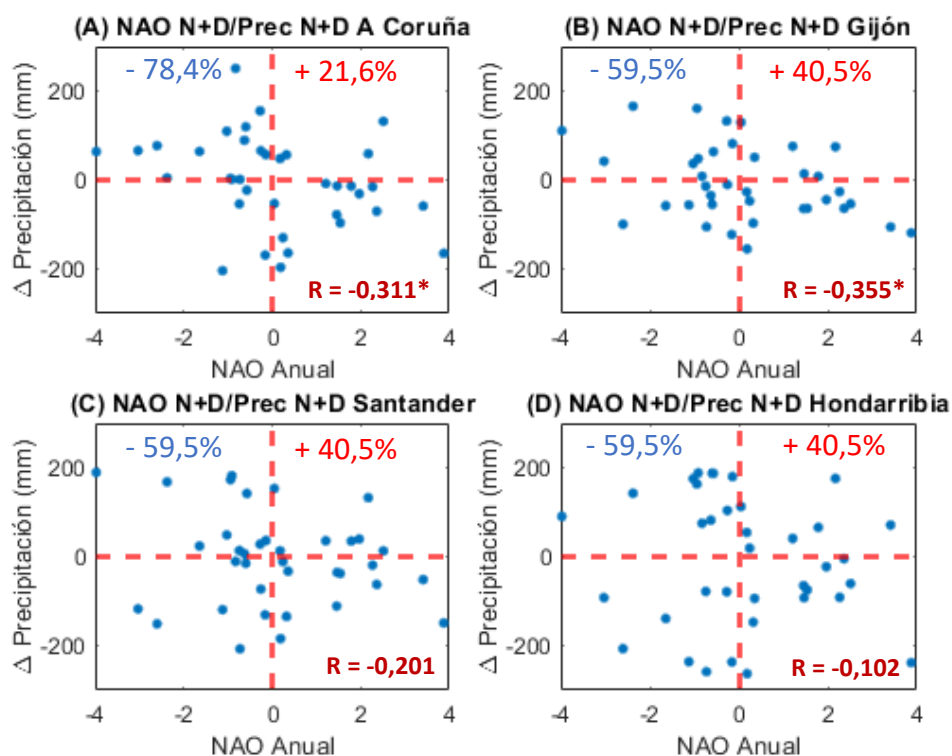


Figura 11. Diagrama de incrementos para la precipitación y el índice NAO medios en los meses de noviembre y diciembre, en las estaciones de (A) A Coruña, (B) Gijón, (C) Santander, (D) Hondarribia. Abajo a la derecha de cada diagrama se muestra el coeficiente de correlación entre las dos variables. (*) El asterisco indica la comprobación estadística de la correlación a un nivel significativo del 85%.

3.2.3. NAO – Salinidad

En el caso de la salinidad, con los años disponibles se ha establecido una relación entre la NAO anual y los incrementos de la salinidad anual respecto a la media. En la Figura 12 podemos observar una ligera correlación entre estas dos variables, donde los años con un índice NAO positivo tienden a ser años con una salinidad anual por debajo de la media, y viceversa. De hecho, el 66,7% de los años en Villano-Sisargas y Cabo de Peñas cumplen el patrón anterior, mientras que, si nos desplazamos hacia el Golfo, en la boya de Bilbao-Vizcaya esta relación se acentúa, cumpliéndose en el 78,6% de los años.

Este resultado puede tener una relación directa con el comportamiento de la salinidad anual a lo largo del tramo de estudio. Las variaciones de salinidad anual son más marcadas hacia el este, mientras que se reducen significativamente en la zona Atlántica. Además, en la Figura 12 se puede apreciar una mayor dispersión entorno al eje y en la zona del Golfo de Vizcaya.

Los coeficientes de correlación (R) de la Figura 12 manifiestan que la correlación negativa que equivale a la estación de Gijón y la correlación negativa que equivale a Hondarribia son muy significativas estadísticamente.

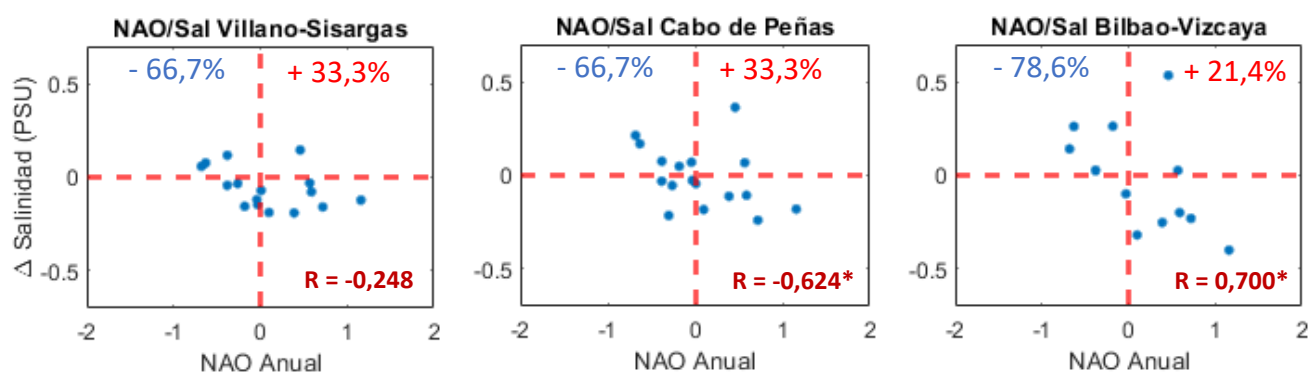


Figura 12. Diagrama de incrementos para la salinidad media anual y el índice NAO anual en las estaciones de (A) Villano-Sisargas, (B) Cabo de Peñas y (C) Bilbao-Vizcaya. Abajo a la derecha de cada diagrama se muestra el coeficiente de correlación entre las dos variables. (*) El asterisco indica la comprobación estadística de la correlación a un nivel significativo del 85%.

3.2.4. NAO – Viento

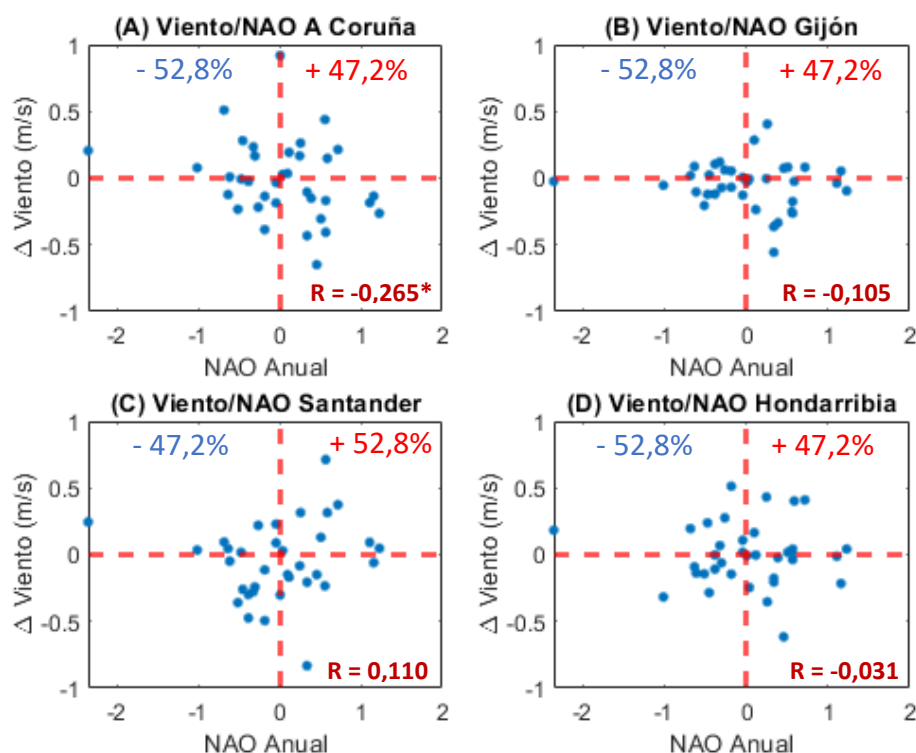


Figura 13. Diagrama de incrementos para la velocidad del viento media anual y el índice NAO anual en las estaciones de (A) A Coruña, (B) Gijón, (C) Santander, (D) Hondarribia. Abajo a la derecha de cada diagrama se muestra el coeficiente de correlación entre las dos variables. (*) El asterisco indica la comprobación estadística de la correlación a un nivel significativo del 85%.

En primer lugar, en la Figura 13 hemos analizado la velocidad media del viento e índice NAO anuales. Las relaciones cualitativas de porcentajes no nos indican una tendencia clara en los incrementos anuales, ya que en todas las estaciones existe una relación prácticamente aleatoria. Sin embargo, si nos fijamos en los coeficientes de correlación podemos observar una correlación negativa significativa en la estación de A Coruña.

En el caso de la relación entre la velocidad media del viento y el índice NAO anual, ambos durante los meses de noviembre y diciembre, el 69,4%; 61,1%; 58,3%; y 61,1% de años indican una correlación negativa de las dos variables en A Coruña, Gijón, Santander y Hondarribia, respectivamente (Figura 14). Por otro lado, atendiendo a los coeficientes de correlación y su significancia podemos afirmar que esta relación es significativa en las dos estaciones situadas más al oeste.

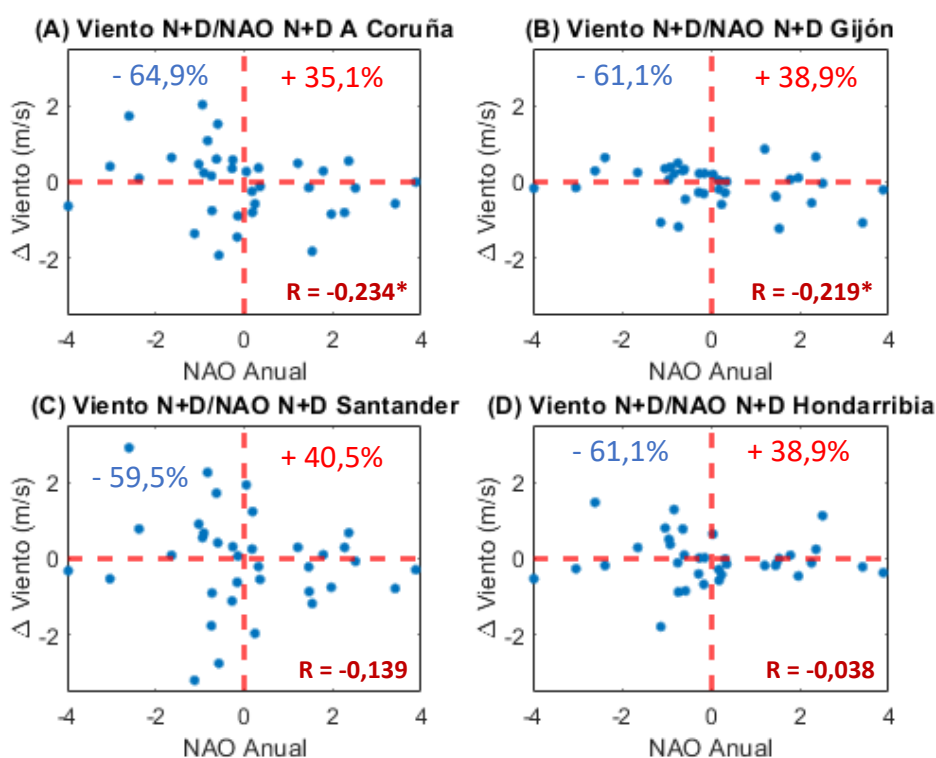


Figura 14. Diagrama de incrementos para la velocidad del viento y el índice NAO medios en los meses de noviembre y diciembre, en las estaciones de (A) A Coruña, (B) Gijón, (C) Santander, (D) Hondarribia. Abajo a la derecha de cada diagrama se muestra el coeficiente de correlación entre las dos variables. (*) El asterisco indica la comprobación estadística de la correlación a un nivel significativo del 85%.

3.2.5. Viento – Precipitación

En la Figura 15 hemos representado los incrementos anuales de la velocidad media del viento y la precipitación. El patrón observado en la mayoría de las estaciones consiste en que, a mayor velocidad del viento, mayor lluvia, manifestado en A Coruña, Santander y

Hondarribia en un 58,3%, 72,2% y 55,6% de los años. La estación de Gijón no cumple este comportamiento, probablemente debido a la orografía de la zona. Sin embargo, dado que la correlación fuertemente positiva de Santander es la única significativa, nos centraremos en ese dato.

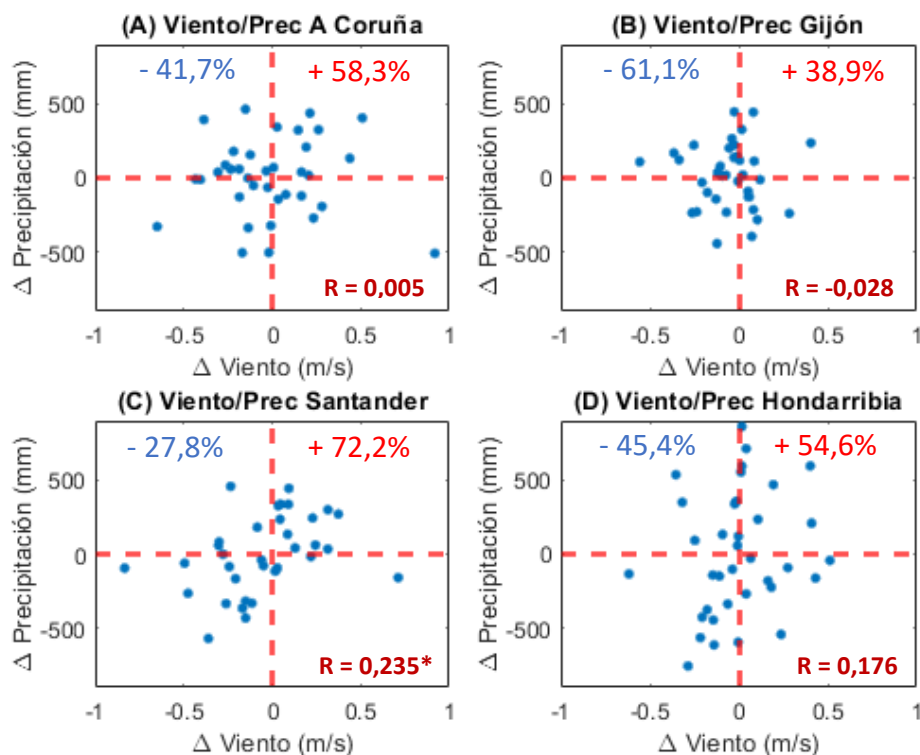


Figura 15. Diagrama de incrementos para la velocidad del viento y precipitación anuales medias en las estaciones de (A) A Coruña, (B) Gijón, (C) Santander, (D) Hondarribia. Abajo a la derecha de cada diagrama se muestra el coeficiente de correlación entre las dos variables. (*) El asterisco indica la comprobación estadística de la correlación a un nivel significativo del 85%.

Para finalizar, en la Figura 16 se ha realizado una representación del viento y la precipitación medios asociados a los meses de noviembre y diciembre. En ella, se puede comprobar muy claramente que los años con precipitación otoñal intensa suelen venir acompañados de velocidades de viento elevadas. De todos los años analizados, el 75% en A Coruña; 66,7% en Gijón; 69,4% en Santander; y 66,7% en Hondarribia siguen el patrón explicado anteriormente. Además, la significancia estadística de estas correlaciones se cumple en todas las estaciones, a excepción de Santander.

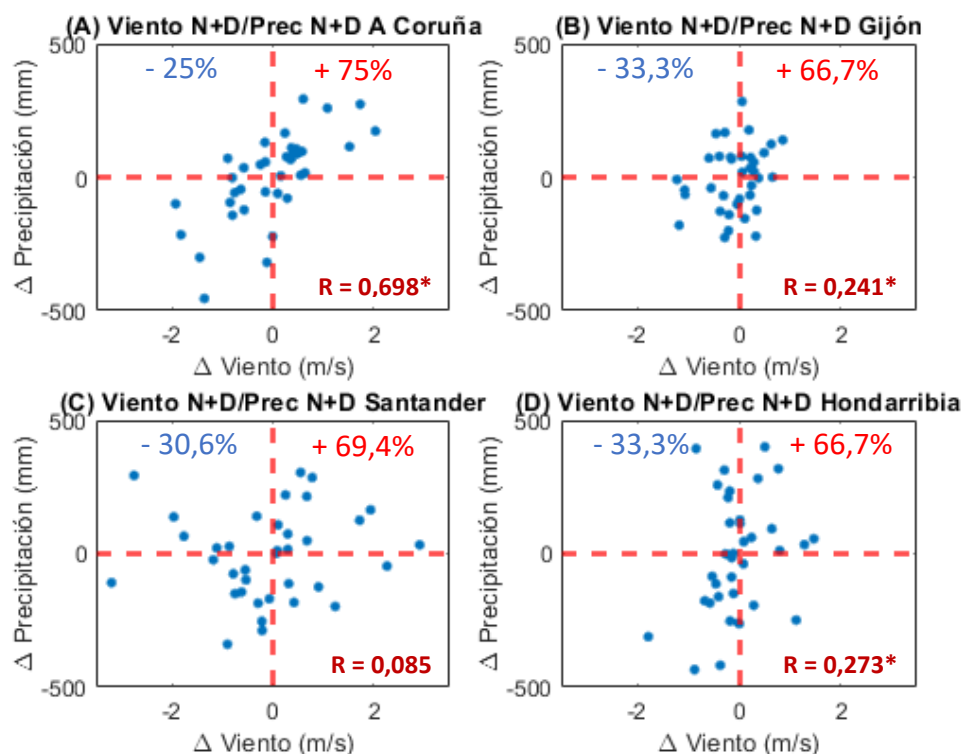


Figura 16. Diagrama de incrementos para la intensidad del viento y la precipitación medias en los meses de noviembre y diciembre, en las estaciones de (A) A Coruña, (B) Gijón, (C) Santander, (D) Hondarribia. Abajo a la derecha de cada diagrama se muestra el coeficiente de correlación entre las dos variables. (*) El asterisco indica la comprobación estadística de la correlación a un nivel significativo del 85%.

3.3. Eventos de precipitación extrema (>50 mm)

Como explicamos anteriormente, los eventos de precipitación fueron seleccionados en función del umbral de los 50 mm diarios. Una vez obtenidos los eventos, se construyó la Figura 17, donde quedan representados los eventos de precipitación en función de las 4 estaciones de estudio y el día del año en el que tuvieron lugar.

Una vez más, en esta figura queda reflejada la mayor cantidad de precipitación anual en la zona este del Cantábrico, donde el 8% de eventos detectados corresponden a la estación de A Coruña, el 10% a Gijón, el 22% a Santander y el 60% a Hondarribia. Además, del total de 189 eventos detectados, 118 (62%) han tenido lugar durante los meses de otoño (septiembre – diciembre).

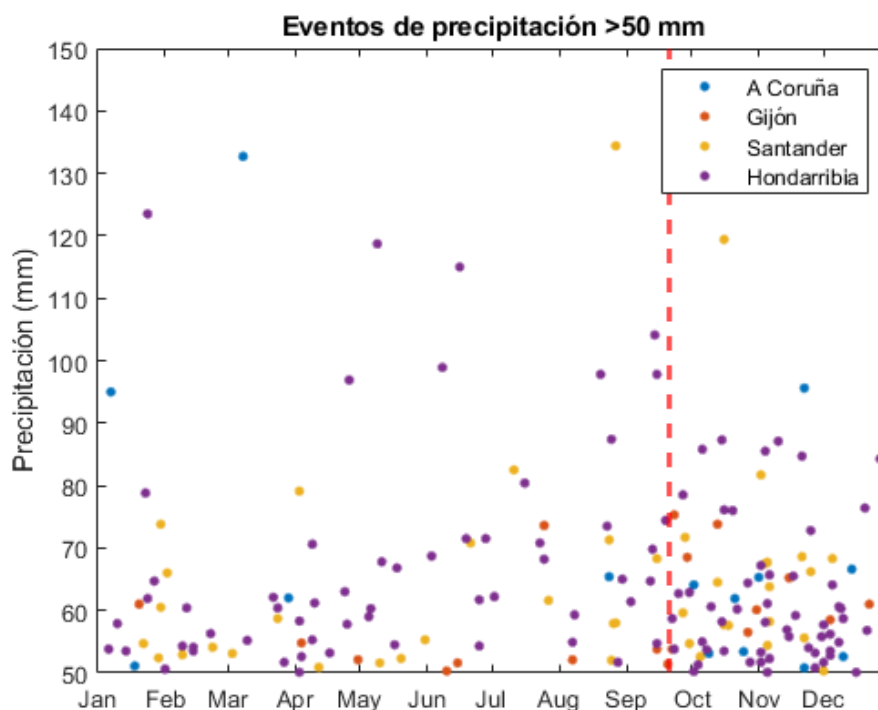


Figura 17. Distribución de los eventos de precipitación extrema ($>50\text{mm/día}$) detectados en las estaciones de A Coruña, Gijón, Santander y Hondarribia. Disposición de los eventos a lo largo de un año hidrológico medio. La línea roja indica el comienzo del otoño (hasta el extremo derecho del gráfico), donde han ocurrido el 62% de los eventos. La serie temporal abarca los años 1981-2019.

Por otro lado, en la Figura 18 podemos observar la cantidad de precipitación acumulada debido a estos eventos en las distintas estaciones. Mientras que en A Coruña se han acumulado únicamente 1024,7 litros en los últimos 40 años (debido a eventos de precipitación extrema), en Hondarribia se han acumulado 7536,4 litros, un 735% más. Por último, de la precipitación acumulada por eventos extremos, el 60,4%, 65%, 48,2% y el 52,3% han ocurrido durante los meses de otoño en A Coruña, Gijón, Santander y Hondarribia, respectivamente.

Por último, merece la pena distinguir aquellos eventos de precipitación mayor a 90 mm diarios, ya que ocurren fundamentalmente en Hondarribia en cualquier momento del año, especialmente en primavera. Pese a que no vamos a centrarnos en esta estación concreta, sería de especial importancia el análisis de estos eventos realmente extremos en trabajos futuros.

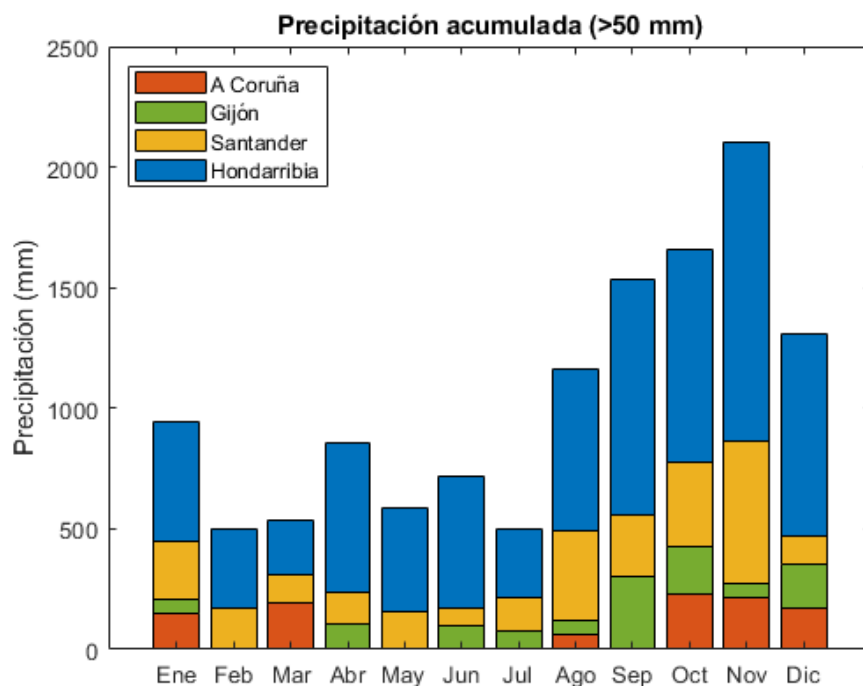


Figura 18. Precipitación total acumulada durante eventos de precipitación extrema (>50mm/día) en las estaciones de A Coruña, Gijón, Santander y Hondarribia. El sumatorio de la precipitación en estos eventos abarca los años 1981-2019.

3.4. Búsqueda de relaciones durante eventos

3.4.1. Anomalías de SST

En primer lugar, se buscó relación directa con la SST, calculando la anomalía media de los 3 días previos a cada evento de precipitación extrema. Los resultados obtenidos, en función de la zona de estudio y la época de ocurrencia, quedan resumidos numéricamente en la Tabla 9, donde se resaltan aquellos porcentajes con diferencias significativas. Estas diferencias han sido establecidas teniendo en cuenta el umbral 40-60% respecto del total.

Con relación a los resultados obtenidos, cabe destacar que, anualmente, existe una tendencia de anomalías negativas en A Coruña, mientras que en el resto de las estaciones no hay ninguna relación significativa, con un porcentaje anual muy igualado. En casos determinados, podríamos destacar las anomalías negativas de Gijón (otoño y verano) u Hondarribia (otoño). Sin embargo, igualmente deberíamos mencionar aquellas anomalías positivas de Gijón (invierno) o Santander (otoño), a las que no hemos encontrado explicación en este trabajo, y podrían ser objeto de estudio en un futuro.

Por lo tanto, en la Tabla 9 se resume a su vez el porcentaje total según la época de ocurrencia, que nos aclara los patrones seguidos en el conjunto del tramo de estudio. En esta sección, observamos que el invierno no está marcado por unas anomalías

determinadas. Por el contrario, la primavera sí ha mostrado una tendencia de anomalías positivas, coincidiendo con la época de mayor calentamiento del agua, ya que es la transición entre el invierno y verano. Además, la mayoría de las anomalías negativas durante el verano y el otoño indican que los eventos detectados tienden a reducir la SST, probablemente por la diferencia de temperatura de los frentes asociados.

Tabla 10. Cuantificación de anomalías de SST medias (positivas o negativas) detectadas durante los 3 días anteriores a cada episodio de precipitación extrema. Estas anomalías se encuentran distribuidas según la época de ocurrencia del evento (invierno, primavera, verano y otoño) y para las estaciones de A Coruña, Gijón, Santander y Hondarribia.

	A Coruña		Gijón		Santander		Hondarribia		Total	
	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+
Invierno	13,3%	13,3%	0%	5,2%	11,9%	9,5%	8,8%	6,3%	50%	50%
Primavera	0%	0%	5,3%	15,8%	7,1%	7,1%	8,8%	11,5%	41%	59%
Verano	6,7%	0%	26,3%	10,5%	11,9%	14,3%	10,6%	11,5%	60%	40%
Otoño	53,3%	13,3%	21,1%	15,8%	16,7%	21,4%	23,9%	18,6%	62%	38%
Total	73,3%	26,6%	52,7%	47,3%	47,6%	52,3%	52,1%	47,9%	56%	44%

- **SST > 18°C**

Para finalizar el estudio de anomalías de SST, se han seleccionado aquellos eventos de precipitación extrema en los que la temperatura del océano superaba los 18°C, y donde podría tener una mayor influencia durante estos episodios. El resto del proceso para su análisis ha sido el mismo que el utilizado en el apartado anterior.

En la Tabla 10, se representan las anomalías medias de los 3 días anteriores a un evento en el que la SST superaba los 18°C. Podemos observar que, en este caso, la tendencia de anomalías negativas es mucho más marcada en A Coruña (100% de los eventos), y se extiende a la estación de Gijón. Por el contrario, Santander y Hondarribia siguen sin demostrar un patrón significativo.

Si hacemos referencia a las épocas del año, los patrones observados en el apartado anterior vuelven a resaltarse. En este caso, el total de los eventos ocurridos durante la primavera presenta una anomalía positiva, mientras que en verano y otoño dominan las reducciones de la temperatura oceánica. De hecho, las únicas anomalías positivas registradas han tenido lugar en Hondarribia durante la primavera, ya que el calentamiento es más intenso en esta zona.

En resumen, las SST por encima de la media no dominan en ningún evento, lo que indica que los episodios de lluvia intensa están mayormente influenciados por factores externos,

tales como la estructura atmosférica de los frentes fríos, más que por la liberación de calor latente del océano.

Tabla 11. Cuantificación de anomalías de SST medias (positivas o negativas) detectadas durante los 3 días anteriores a cada episodio de precipitación extrema donde la SST superaba los 18°C. Estas anomalías se encuentran distribuidas según la época de ocurrencia del evento (invierno, primavera, verano y otoño) y para las estaciones de A Coruña, Gijón, Santander y Hondarribia.

	A Coruña		Gijón		Santander		Hondarribia		Total	
	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+
Invierno	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Primavera	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	7,2%	0%	100%
Verano	50%	0%	60%	20%	38,5%	34,6%	35,7%	27,1%	69%	31%
Otoño	50%	0%	20%	0%	15,4%	11,5%	15,7%	14,3%	80%	20%
Total	100%	0%	80%	20%	53,9%	46,1%	51,4%	48,6%	71%	29%

3.4.2. Anomalías de salinidad

En el caso de la salinidad, los cálculos de anomalía durante los episodios de lluvia estudiados (y con datos disponibles) quedan representados en la Tabla 11. Al igual que ocurre con la SST, la salinidad en los extremos este y oeste tiende a disminuir durante este tipo de eventos (60%). Sin embargo, en la zona central de la costa Cantábrica (Gijón/Cabo de Peñas) el patrón se invierte, dando lugar a una anomalía positiva de salinidad en el 75% de los eventos de precipitación registrados. Si nos fijamos, este último dato es debido a un conjunto de anomalías positivas ocurridas durante el verano, periodo de intenso calentamiento y evaporación.

Tabla 12. Cuantificación de anomalías de salinidad medias (positivas o negativas) detectadas durante los 3 días anteriores a cada episodio de precipitación extrema. Estas anomalías se encuentran distribuidas según la época de ocurrencia del evento (invierno, primavera, verano y otoño) para las boyas oceánicas de Villano-Sisargas (A Coruña), Cabo de Peñas (Gijón) y Bilbao-Vizcaya (Santander y Hondarribia).

	A Coruña		Gijón		Santander - Hondarribia		Total	
	-	+	-	+	-	+	-	+
Invierno	20%	20%	0%	0%	20%	20%	50%	50%
Primavera	0%	0%	0%	0%	0%	10%	0%	100%
Verano	0%	0%	0%	50%	20%	-	29%	71%
Otoño	40%	20%	25%	25%	20%	10%	61%	39%
Total	60%	40%	25%	75%	60%	40%	48%	52%

Por otro lado, si hacemos hincapié en la época en la que han ocurrido estas anomalías, podemos observar que durante el invierno no hay ninguna tendencia destacable, ya que los aumentos o descensos de esta variable se reparten en un 50% de los casos. No ocurre lo mismo durante la primavera y el verano, periodos de calentamiento, donde la gran mayoría de los eventos han presentado una anomalía positiva de salinidad. Por otro lado, durante el otoño, cuando los eventos asociados a la llegada de borrascas se hacen más numerosos e intensos, las anomalías de salinidad detectadas presentan una tendencia negativa, probablemente debido a la influencia de la precipitación en la superficie oceánica.

3.4.3. Viento

Finalmente, en el caso del viento se encuentran representadas las direcciones y velocidades asociadas a los eventos de precipitación extrema detectados en cada una de las estaciones (Figura 19), donde podemos apreciar la predominancia de direcciones con componente oeste (W). Además, las velocidades medias asociadas se reducen a medida que nos desplazamos hacia el Golfo de Vizcaya, con excepción de Gijón, donde el Cabo de Peñas actúa como pantalla frente a estos vientos.

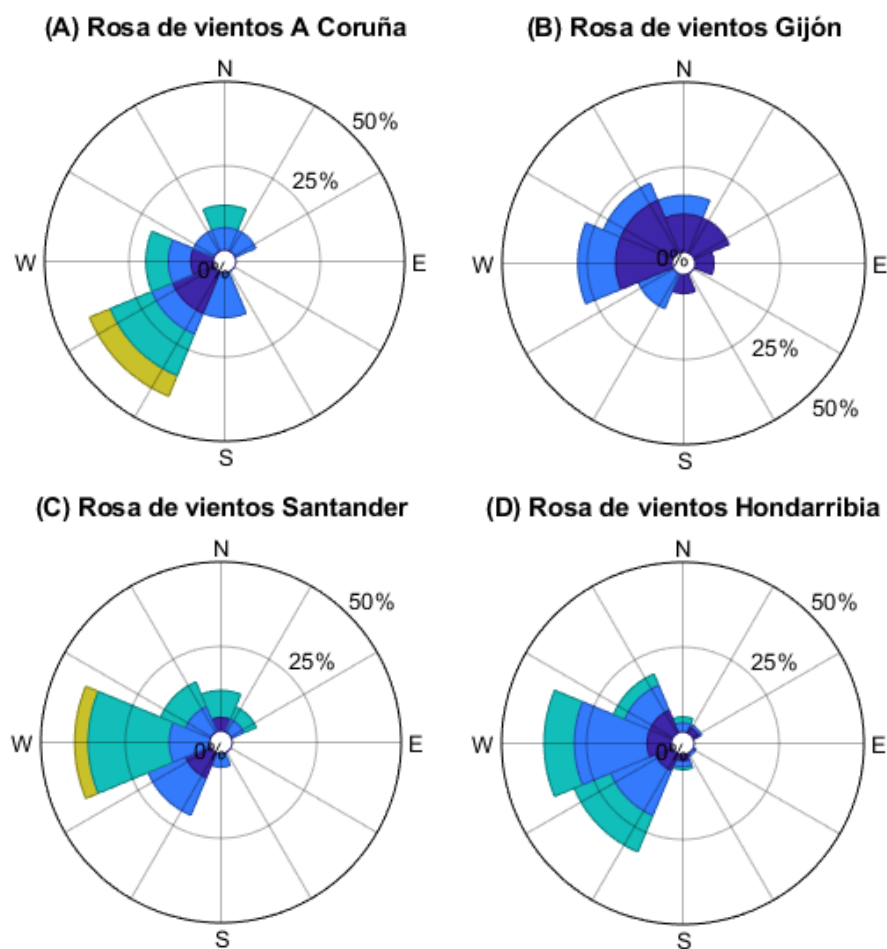


Figura 19. Intensidad y dirección medias diarias del viento ocurridas durante los eventos de precipitación extrema en las estaciones de (A) A Coruña, (B) Gijón, (C) Santander y (D) Hondarribia. Las direcciones se encuentran divididos en 8 sectores (cada 45°).

Por otro lado, en la Figura 20 queda resumida la frecuencia de ocurrencia de estas direcciones anteriores, donde el viento procedente del oeste (W) y del suroeste (SW) dominan en más del 60% de estos eventos. En el caso de Gijón, y dada su situación geográfica, los vientos del noroeste (NW) superan en frecuencia a los del suroeste (SW), evitando atravesar la orografía de la zona. En la tabla también queda reflejada la práctica ausencia de estos eventos durante escenarios de viento este (E) y sureste (SE).



Figura 20. Izquierda: Leyenda asociada a Figura 16. Derecha: Frecuencia asociada (%) a cada dirección de viento durante los eventos detectados en las estaciones de (A) A Coruña, (B) Gijón, (C) Santander y (D) Hondarribia. Las direcciones se encuentran divididas en 8 sectores (cada 45°).

4. Discusión

4.1. Análisis climatológico

4.1.1. Efecto regulador

Los resultados obtenidos en la caracterización climatológica tienden a destacar un efecto regulador del océano sobre la atmósfera, debido a su elevado calor específico. La atmósfera es un medio diatermo que se ve influenciado por la transferencia de calor del océano (Stewart, 2008). Esto hace que tanto el océano como la atmósfera se encuentren en una constante transición hacia el equilibrio térmico (Hu et al., 2017). Por lo tanto, es lógico que la temperatura atmosférica y la SST adquieran unos valores mensuales medios muy similares.

Además, a excepción de A Coruña, en todas las estaciones la SST se mantiene ligeramente superior a la temperatura atmosférica. Esto puede ser debido a que, en el medio atmosférico, la temperatura suele descender bruscamente durante la noche, al contrario que en el océano. En el caso de A Coruña, cabe destacar que se trata de una zona de afloramiento, donde la SST no es capaz de almacenar gran cantidad de calor debido a las constantes inyecciones de agua fría profunda (Casabella et al., 2014). Justo lo contrario ocurre a medida que nos desplazamos hacia el Golfo de Vizcaya, donde la frecuencia de afloramiento costero disminuye hasta prácticamente desaparecer y se

favorece una estratificación de la columna de agua, haciendo que las SST adquieran valores cada vez mayores (Urrutia et al., 1990; deCastro et al., 2009).

4.1.2. Influencia en la precipitación

En el caso de la precipitación, se ha comprobado en toda la franja de estudio que noviembre es el mes más lluvioso del año, seguido normalmente de diciembre. Las lluvias de esta época del año se asocian principalmente a frentes y borrascas procedentes del Atlántico Norte, ajenos a la meteorología local. Sin embargo, existe un claro incremento del volumen de precipitación, tanto anual como mensual, a medida que nos desplazamos hacia el Golfo de Vizcaya.

Dado que la SST adquiere valores ligeramente mayores hacia el este, y que estos meses coinciden en ser la época durante la cual se pierde mayor energía del océano (en forma de calor), es probable que este incremento de la precipitación se vea afectado por dos factores:

- La liberación de calor latente del océano en forma de evaporación.
- Lluvia orográfica. El choque y acumulación de los frentes contra los sistemas montañosos del Golfo (Pirineos) (Uriarte et al., 1977).

El primero de estos puntos lo discutiremos más adelante. Por otro lado, en estudios anteriores se ha planteado la influencia en la persistencia de la lluvia debido al factor orográfico (Uriarte et al., 1977). Este fenómeno consiste en el choque y acumulación de los frentes contra los sistemas montañosos, generando una precipitación significativamente mayor en la zona de barlovento. En nuestro caso, los Pirineos se sitúan justo a continuación del Golfo. Por lo tanto, es probable que esta orografía tienda a estancar la nubosidad, aumentando la duración e intensidad de las precipitaciones tras el paso de una borrasca. Este fenómeno disminuye a medida que nos desplazamos hacia el este, debido a la ausencia de grandes cordilleras, y con él la intensidad de la precipitación.

4.1.3. Salinidad

En la variable salinidad, uno de los comportamientos más notables ha sido que, mientras los valores máximos son muy parecidos a lo largo del tramo de estudio, el mínimo es significativamente menor hacia el este, provocando que la variación anual en aguas del Golfo de Vizcaya sea mayor.

El hecho de que la variación de la salinidad sea mínima en la zona de A Coruña es debido a que se trata de una zona del océano Atlántico con gran energía, donde el viento, las corrientes y el oleaje hacen que la estratificación de la columna de agua sea prácticamente inexistente a lo largo del año (Fraga et al., 1982). Esto hace que, pese al

gran aporte de masas de aguas fluviales y lluvias durante el otoño, el agua esté en una constante capa de mezcla, homogeneizando los valores de salinidad (Castro et al., 1994).

Por otro lado, a medida que nos desplazamos hacia el Golfo ocurre justo lo contrario, donde la estratificación de la columna de agua es mucho más habitual (Urrutia et al., 1990; deCastro et al., 2009) y los aportes de aguas fluviales junto con episodios de lluvia tienden a aumentar la desviación estándar diaria de la salinidad. Un indicador clave de este comportamiento es el mínimo que se observa en las boyas de Cabo de Peñas y Bilbao-Vizcaya durante el mes de marzo, correspondiente a la época del deshielo, que hace disminuir bruscamente el valor diario medio de salinidad en esta zona.

Por último, es destacable que hacia el Golfo el valor de salinidad medio es mínimo durante el verano y mayor durante el invierno. En principio, una reducción de salinidad podría ser debida al aporte fluvial de finales de primavera, o el afloramiento de la zona. Sin embargo, no hemos encontrado una explicación a que el mínimo de salinidad se mantenga durante todo el verano en el Golfo de Vizcaya.

4.1.4. Viento

Respecto al viento se puede comprobar en la Tabla 7 que existen dos sectores de direcciones predominantes. En primer lugar, el sector este (E), con una mayor frecuencia de direcciones del norte-noreste (N-NE), corresponde a situaciones anticiclónicas, de altas presiones y tiempo estable. Durante estas situaciones atmosféricas, se favorece el régimen de brisas marinas, producido por la diferencia de temperatura entre el océano y el continente, que conlleva la formación de una baja presión local en la zona continental (OMM, 1992). Dado que estamos en el hemisferio norte, los vientos de este tipo tienden a adquirir una componente Este (E) debida al efecto de Coriolis (Stewart, 2008). Por otro lado, el sector oeste (W), con una mayor frecuencia de direcciones del oeste-suroeste (W-SW), se corresponde con situaciones de bajas presiones y paso de borrascas.

4.2. Relaciones anuales

En primer lugar, la relación SST-precipitación anual (Tabla 12) ha demostrado que las SST mayores no se corresponden a una mayor precipitación por liberación de calor latente hacia la atmósfera, sino todo lo contrario. Por norma general, la menor precipitación se corresponde con altas presiones y tiempo más estable (Stewart, 2008), que conlleva menor nubosidad y, por lo tanto, habrá un incremento de la radiación solar capaz de calentar la superficie oceánica. Por otro lado, hemos visto que en Galicia este patrón se invierte durante el otoño, indicando que una mayor SST en esta época del año traerá una mayor cantidad de precipitación. Cabe destacar que, en estudios anteriores, se ha descrito el otoño como la época del año con una menor intensidad de afloramiento, debido a la relajación de los vientos del este y las calmas (Castro et al., 1994). Tal vez el afloramiento

pueda tener un cierto efecto de bloqueo en la intensidad de precipitación. El efecto de bloqueo de los afloramientos es algo muy evidente en las grandes zonas de afloramiento globales (Canarias, Chile, California, Australia), donde justo al lado del afloramiento se genera una zona desértica. Es decir, las aguas afloradas más frías no facilitan una alta evaporación, con lo que las borrascas que pasan por ahí son poco productivas desde el punto de vista de la precipitación.

Tabla 13. Correlaciones obtenidas en las relaciones anuales de las variables enfrentadas, en función de las estaciones de estudio. Los símbolos (-), (+) y 0 son indicativos de correlación negativa, positiva y sin tendencia destacable, respectivamente. Las celdas sombreadas en verde indican que la correlación es significativa estadísticamente al 85%.

	A Coruña	Gijón	Santander	Hondarribia
	Anual			
SST – Precipitación	0	-	-	-
NAO – Precipitación	-	0	+	+
NAO - Viento	-	0	0	0
Viento – Precipitación	0	-	+	0
NAO – Salinidad	-	-	-	
	Noviembre + Diciembre			
SST N+D – Precipitación N+D	+	0	0	+
NAO N+D – Precipitación N+D	-	-	-	-
NAO N+D – Viento N+D	-	-	-	-
Viento N+D – Precipitación N+D	+	+	+	+

Por otro lado, como mencionamos anteriormente, un índice NAO negativo implica la debilidad del anticiclón de las Azores (Barnston and Livezey., 1987), con las borrascas de Islandia generando vientos y frentes fríos que se desplazan hacia el sur, impactando en la zona de estudio. La relación NAO-Precipitación anual (Tabla 12) comprueba la ocurrencia de este comportamiento en A Coruña, pero se invierte en Hondarribia. Estudios anteriores han encontrado relaciones muy similares a la nuestra en Galicia (García et al., 2005), pero no hay antecedentes significativos en la zona del Golfo de Vizcaya. La razón más probable detrás de este cambio de tendencia se basa en los siguientes factores:

- El efecto del calor latente en aguas de Hondarribia (el cual discutiremos en el apartado de anomalías).
- La dirección de los vientos asociados a las borrascas.

Como vimos en los resultados, la mayoría de estas borrascas entran con vientos provenientes de las direcciones suroeste-oeste-noroeste (SW-W-NW). Estos frentes impactan con A Coruña en todo su rango, pero Hondarribia (y el resto de las estaciones en menor medida) queda protegida frente a las direcciones suroeste-oeste (SW-W), ya que la orografía de la Cordillera Cantábrica y los cabos costeros se interponen en el camino. Sin embargo, durante los meses de noviembre y diciembre (Tabla 12), cuando la mayor parte de la precipitación está asociada a los frentes fríos de las borrascas que marcan el comienzo la temporada de invierno, la correlación negativa es significativa en la mayor parte de la región. Quizás, en un futuro se podría clasificar la precipitación asociada a las distintas direcciones de viento durante estos meses, y así obtener un análisis más preciso de la situación.

Este comportamiento que acabamos de explicar adquiere mayor cohesión cuando analizamos la relación NAO-viento (Tabla 12). En todas las situaciones donde estas variables son significativas, un índice de NAO positivo implica menor velocidad del viento, asumiendo que esta menor velocidad implica menos vientos de componente oeste, ya que son los más intensos. Además, si observamos la relación viento-precipitación (Tabla 12) podemos comprobar que todas las correlaciones significativas son positivas, por lo que una mayor cantidad de precipitación implica mayor velocidad del viento (de componente oeste).

Por último, nos queda destacar la fuerte correlación negativa encontrada en la relación NAO-salinidad anual (Tabla 12). Anteriormente comprobamos que el patrón NAO-precipitación se invertía hacia aguas del Golfo, con una mayor precipitación durante los años NAO positivos. En este caso, la reducción de la salinidad vendría asociada al aumento de esta precipitación, junto con los aportes de aguas fluviales que conlleva. Este comportamiento ya ha sido detectado por varios autores, como Schmitt (2008). Por otro lado, el efecto del calor latente no queda reflejado en esta relación anual, ya que en ese caso se produciría un aumento de la salinidad debido a la evaporación. Eso no quiere decir que no exista este fenómeno, ya que en tal caso tendría relevancia en determinados eventos (como veremos a continuación) más que anualmente.

4.3. Eventos de precipitación extrema

Una vez analizados los comportamientos anuales de la zona de estudio, nos centramos en los eventos de precipitación mayor a 50 mm/día. La característica principal de estos eventos sigue la misma tendencia que la precipitación anual: incrementa hacia aguas del

Golfo de Vizcaya. Este incremento se basa en un aumento de la frecuencia e intensidad, con una media de 0,4 eventos/año en A Coruña frente a 3 eventos/año en Hondarribia. Esta diferencia supone que Hondarribia reciba, por término medio, 167 mm/año más que A Coruña, asociados a estos eventos.

Además, el 62% del conjunto de eventos registrados en las 4 estaciones ha tenido lugar durante el otoño (Figura 17), lo que encaja perfectamente con la caracterización previa, donde más de la mitad de la precipitación anual ocurre en este periodo.

4.3.1. Anomalías de SST

Los valores medios de SST calculados durante los 3 días previos a la ocurrencia de estos eventos (Tabla 9) han mostrado una mayoría de anomalías negativas en A Coruña. Este resultado indica que las precipitaciones extremas vienen acompañadas de reducciones de SST, provocadas por la llegada de frentes fríos (más intensos en A Coruña), donde la atmósfera, con ayuda del viento, actúa como forzador de la SST mediante la liberación de calor sensible (Diego et al., 2018).

Con una visión más global, la tendencia de anomalías positivas de la primavera indica que el calentamiento del agua tiene una mayor importancia que la liberación de calor por estos eventos, probablemente asociado al calentamiento de la atmósfera. Por su parte, durante el verano y el otoño, con unas SST mayores, estos eventos son responsables de una gran pérdida de calor sensible.

Finalmente, con el análisis de SST mayores a 18°C (Tabla 10) hemos conseguido centrar nuestra atención en los eventos que pueden tener una alimentación potencial por efecto de la evaporación. Sin embargo, los resultados obtenidos refuerzan el comportamiento explicado previamente, con unas significancias mucho mayores. De hecho, las anomalías negativas se extienden a la estación de Gijón.

4.3.2. Anomalías de salinidad

Con relación a las anomalías de salinidad ocurridas durante los eventos de precipitación extrema (Tabla 11), cabe destacar que muchos de estos eventos no se han analizado debido a los grandes periodos de lagunas de datos en las boyas oceánicas. Todas las estaciones, a excepción de Gijón, han presentado una mayoría de anomalías negativas, probablemente debida a la intensa precipitación y aportes de aguas fluviales que esto conlleva (Schmitt, 2008). En el caso de Gijón, el dato de verano hace que destaque una mayoría de anomalías negativas anualmente. Este comportamiento tal vez pueda asociarse a un periodo en el que la evaporación haya sido especialmente intensa, haciendo que la salinidad aumente, y sin que esto implique una relación causa-efecto entre la anomalía de salinidad y la ocurrencia de eventos extremos de precipitación.

Por otro lado, haciendo referencia a la época de ocurrencia, los aumentos de salinidad durante primavera y verano ponen de manifiesto el efecto de la evaporación mencionado anteriormente. Además, el hecho de que el resultado de la primavera dependa en su totalidad de Hondarribia es una señal de que, pese a no tener una relación directa con la intensidad de precipitación, este fenómeno está presente. Por el contrario, el otoño, con mayor presencia de estos eventos, se caracteriza por una reducción de la salinidad debida a la precipitación y aportes fluviales (Schmitt, 2008).

En un futuro (o con una base de datos de salinidad más larga) se podría completar esta parte del análisis, con el objetivo de registrar los cambios de salinidad en un mayor número de eventos.

4.3.3. Anomalías de viento

Por último, las direcciones e intensidades de viento asociadas a los eventos de precipitación extrema se han representado en la Figura 19 y Figura 20. Estos resultados indican que, en toda la región, las cuantiosas precipitaciones llegan acompañadas de vientos de componente oeste. Es decir, y corroborando así los resultados anteriores, la mayoría de los eventos de precipitación extrema llegan asociados a frentes fríos de las borrascas atlánticas.

Por otro lado, hay dos factores para tener en cuenta en este apartado: la variación de la intensidad y dirección de estos vientos a lo largo de la costa. En primer lugar, A Coruña es, junto con Santander, gobernada por intensidades bastantes altas (10-15 m/s), mientras que en Hondarribia no se superan los 10 m/s, y en Gijón los 5 m/s. A esto le sumamos las variaciones de las direcciones observadas en la Figura 20, donde aparece un gran peso del viento del suroeste (SW) en A Coruña y el viento del noroeste (NW) en Gijón. En esta representación, se ha hecho hincapié en la orografía costera de cada estación meteorológica estudiada. Podemos observar que las flechas naranjas marcan una clara tendencia del viento a bordear la costa, circulando paralela a ella. Estas direcciones coinciden con las obtenidas durante los eventos de precipitación extrema.

Además, el hecho de que el viento circule paralelo a la costa puede provocar una aceleración de este, como ya ha sido comprobado en estudios previos (Polvorinos et al., 2012). Por ello, es probable que este comportamiento se corresponda con las altas intensidades de A Coruña y Santander. En el caso de Gijón, el Cabo de Peñas y su relieve actúa como protector a elevadas velocidades, lo que hace más fácil la llegada del viento por mar y con pérdida de fuerza. En Hondarribia, por su parte, pese a que no existe un cabo o relieve significativo para frenar el viento, se encuentra la cordillera pirenaica. La elevada orografía muy próxima a la costa produce lo que se llama un “efecto de la condición de no deslizamiento” o “no-slip condition” (Day, 1990) a gran escala. Este efecto afirma que, en un límite sólido (Cordillera Pirenaica), la velocidad de un fluido

(viento) tenderá a cero en relación con el límite (base de la montaña) y ya ha sido descrito en estudios anteriores en este contexto (Sun et al., 2005).

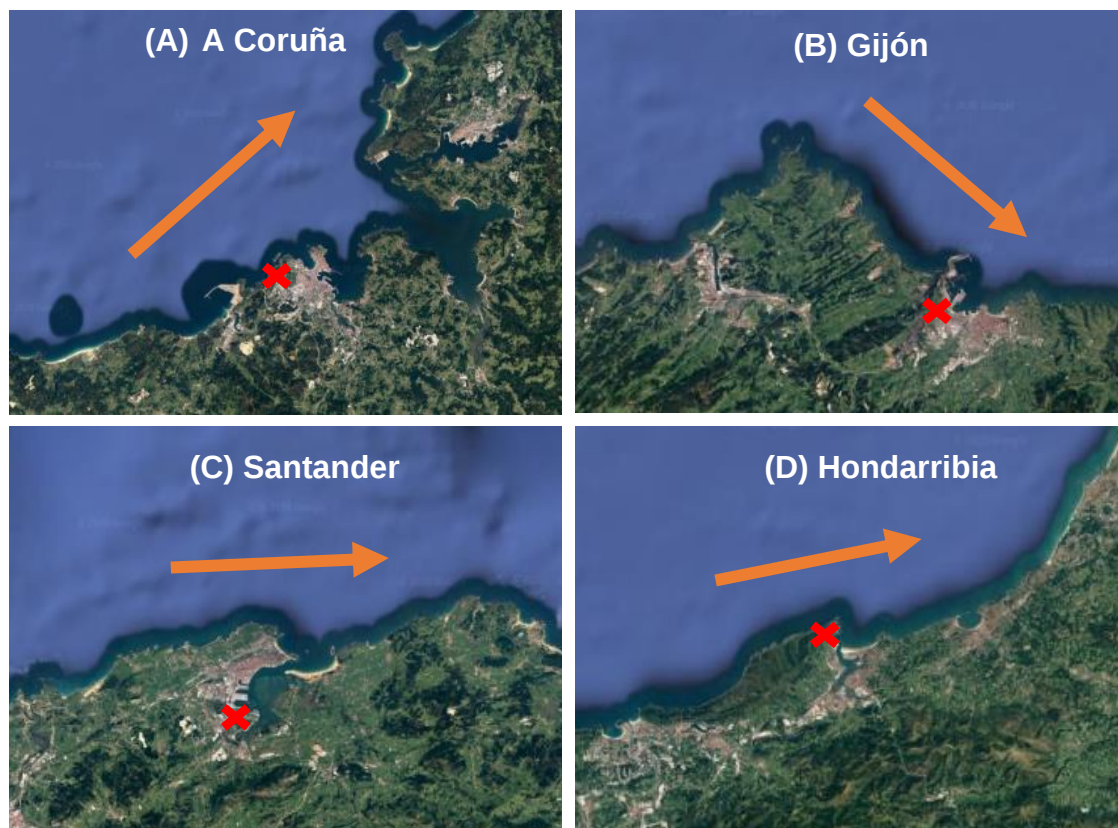


Figura 21. Dirección de viento predominante las estaciones de (A) A Coruña, (B) Gijón, (C) Santander y (D) Hondarribia; durante las borrascas provenientes del sector oeste. Las flechas naranjas indican la dirección que tiende a tomar el viento debido a la orografía local. Las "X" rojas indican la localización de cada estación climatológica.

5. Conclusión

Integrando el conjunto de resultados de este estudio, cabe destacar que la Oscilación del Atlántico Norte (NAO) es el principal condicionante de las condiciones meteorológicas en la zona de estudio. Este índice, anualmente, tiene una gran influencia en la zona de A Coruña, que es la principal zona de impacto de las borrascas, provocando principalmente una mayor precipitación. Esta precipitación vendrá acompañada de vientos del oeste/suroeste (W/SW), provocando una reducción de la SST por la liberación de calor sensible. Sin embargo, el índice NAO anual no ha mostrado relaciones significativas similares a A Coruña en el resto de las estaciones de estudio, ya que la orografía costera interactúa con los frentes procedentes de direcciones suroeste y oeste (SW-W). Sí lo ha hecho el índice NAO medio de noviembre y diciembre, ya que, al ser la época con mayor intensidad de precipitación y afluencia de borrascas, la orografía local

no es suficiente para mitigar este efecto. Es decir, el otoño tiene una mayor dependencia de la circulación atmosférica a gran escala.

Forzado por el índice NAO, podemos afirmar que el viento es el segundo gran condicionante de las variaciones de clima a lo largo del tramo de estudio. El viento se divide en dos sectores, del oeste (borrasca) y del este (anticiclón). Estos dos vientos son capaces de reducir la SST por medio de la liberación de calor sensible en los frentes fríos (oeste) y del afloramiento costero (este). El afloramiento, sin embargo, es prácticamente inexistente en Hondarribia y aumenta en intensidad a medida que nos desplazamos hacia occidente.

Por otro lado, es destacable el gran efecto regulador del océano observado en todo el tramo de estudio. De hecho, la variación de SST es condicionante de la temperatura atmosférica a largo plazo, siendo relevantes el papel del afloramiento costero en A Coruña y el del mayor calentamiento oceánico en Hondarribia. Esto no significa que la SST no se vea afectada por la liberación de calor sensible de una atmósfera fría y enérgica, pero esto ocurre en episodios cortos de tipos, durante la incidencia de las borrascas. Además, si añadimos la energía oceánica asociada a cada zona, la zona oeste, con mayor exposición al oleaje, viento e inyecciones de agua fría del fondo posee una variación de salinidad mínima a lo largo del año. Esta variación se acrecienta hacia el este, provocada por una mayor tendencia a la estratificación de la columna de agua, que la hace más sensible a eventos de precipitación, descargas aluviales o evaporación intensa. En este estudio, hemos observado nítidamente la reducción de salinidad provocada en marzo, época de deshielo, en la mitad oriental de la costa cantábrica.

Como último punto de este trabajo, y habiendo centrado nuestra atención en la existencia de una precipitación influenciada por la liberación de calor latente del océano, al menos en los eventos de precipitación extrema, hemos de decir que en A Coruña, Gijón y Santander no existe tal relación. En estos lugares, existe una ligera pérdida de calor sensible del océano durante estos eventos, debida a la acción del viento frío sobre la superficie oceánica. Esta pérdida de calor se intensifica cuanto mayor es la SST, ya que la diferencia de temperatura entre los dos medios es más amplia. Además, viene acompañada, en otoño, de reducciones de salinidad debidas a la intensa precipitación y aportes fluviales.

Cabe destacar que la pérdida de calor sensible debida a los eventos de precipitación extrema no es lo suficiente intensa como para omitir los procesos naturales de calentamiento del agua (en primavera y comienzos de verano) o para reducir la SST por debajo de un umbral determinado. Es por ello por lo que estas épocas del año han presentado en ocasiones un aumento de la SST, en vez de una reducción, así como aumentos en la salinidad por episodios de evaporación muy intensa. En Hondarribia, por

su parte, no se han obtenido resultados significativos con relación a la evolución de la SST durante estos eventos. Por lo tanto, el papel de alimentación de la precipitación por medio de la liberación de calor latente no se descarta como una posibilidad. En un futuro, se podría realizar una investigación centrada en la interacción océano-atmósfera durante verano y otoño, además del estudio de los eventos de precipitación superiores a los 90 mm diarios, presentes a lo largo de todo el año en esta estación.

Por último, hay que mencionar que estos eventos de fuerte precipitación vienen generalmente acompañados por vientos del oeste, que pierden fuerza a medida que avanzan por el continente (debido a la “condición no-slip” en Hondarribia), rolando su dirección en función de la orografía costera y tendiendo a viajar paralelos a la costa. Estos vientos, en realidad, son los que favorecen las reducciones de SST y salinidad antes mencionadas.

6. Proyectos de trabajo futuros

En este apartado se enumeran las posibles tareas y proyectos a seguir en este estudio, con el objetivo de obtener un análisis más completo y, quizás, más exacto en algunos apartados. Son los siguientes:

- Utilización de una serie temporal más larga (en un futuro).
- Aplicación de las correcciones de Bonferroni a las “relaciones anuales”. Sin embargo, solo sería posible en el caso de disponer de una serie temporal más larga, ya que de lo contrario no obtendríamos resultados significativos.
- Estudio de los eventos de precipitación mayor a 90 mm diarios ocurridos en Hondarribia en cualquier momento del año, pero especialmente en primavera.
- Estudio de anomalías positivas de Gijón (invierno) o Santander (otoño), a las que no hemos encontrado explicación en este trabajo.
- Clasificar, con una mayor precisión, la precipitación asociada a las distintas direcciones de viento durante el otoño.
- Utilización de una base de datos de salinidad más larga (o completa) para obtener una mayor significancia en las anomalías de salinidad registradas.

7. Referencias

- Astor, Y., Lorenzoni, L., Thunell, R., Varela, R., Muller-Karger, F., Troccoli, L., Taylor, G., Scranton, M., Tappa, E., Rueda, D., (2013). Interannual variability in sea surface temperature and fCO₂ changes in the Cariaco Basin. *Deep-Sea Res. II Top. Stud. Oceanogr.* 93, 33–43.
- Barnston, A. G. (1994). Linear Statistical Short-Term Climate Predictive Skill in the Northern Hemisphere. *Journal of Climate*, 7(10), 1513-1564. doi:10.1175/1520-0442(1994)0072.0.co;2

- Barnston, A. G., & Livezey R. E. (1987). Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns. *Mon. Wea. Rev.*, 115, 1083-1126.
- Barnston, A. G., & Smith, T. M. (1996). Specification and Prediction of Global Surface Temperature and Precipitation from Global SST Using CCA. *Journal of Climate*, 9(11), 2660-2697. doi:10.1175/1520-0442(1996)0092.0.co;2
- Casabella, N., Lorenzo, M., & Taboada, J. (2014). Trends of the Galician upwelling in the context of climate change. *Journal of Sea Research*, 93, 23-27. doi:10.1016/j.seares.2014.01.013
- Castro, C. G., Pérez, F. F., Alvarez-Salgado, X. A., Rosón, G., & Ríos, A. F. (1994). Hydrographic conditions associated with the relaxation of an upwelling event off the Galician Coast (NW Spain). *Journal of Geophysical Research*, 99(C3), 5135. doi:10.1029/93jc02735
- Daniel Pereira (2020). Wind Rose MATLAB Central File Exchange. Retrieved August 24, 2020. (<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/47248-wind-rose>)
- Day, M.A. (1990). The no-slip condition of fluid dynamics. *Erkenntnis* 33, 285–296. <https://doi.org/10.1007/BF00717588>
- deCastro, M., Lorenzo, N., Taboada, J., Sarmiento, M., Álvarez, I., & Gómez-Gesteira, M. (2006). Influence of teleconnection patterns on precipitation variability and on river flow regimes in the Miño River basin (NW Iberian Peninsula). *Climate Research*, 32, 63-73. doi:10.3354/cr032063
- deCastro, M., Gómez-Gesteira, M., Álvarez, I., & Gesteira, J. (2009). Present warming within the context of cooling–warming cycles observed since 1854 in the Bay of Biscay. *Continental Shelf Research*, 29(8), 1053-1059. doi:10.1016/j.csr.2008.11.016
- Delitala, A. M., Cesari, D., Chessa, P. A., & Ward, M. N. (2000). Precipitation over Sardinia (Italy) during the 1946-1993 rainy seasons and associated large-scale climate variations. *International Journal of Climatology*, 20(5), 519-541. doi:10.1002/(sici)1097-0088(200004)20:53.0.co;2-4
- Diego J., Machín F. J., Santana A. (2018). Relative importance of the atmosphere-ocean exchanges of latent and sensible heat in the generation of rainfall in the Canary Islands environment. (*Tesis de Grado*). *Universidad de Las Palmas de Gran Canaria*.

- Emanuel, K. and Sobel, A. (2013). Response of tropical sea surface temperature, precipitation, and tropical cyclone-related variables to changes in global and local forcing. *J. Adv. Model. Earth Syst.*, 5, 447–458, 2013.
- Fraga, F., Mouriño, C., & Manríquez, M. (1982). Las masas de agua en la costa de Galicia: junio-octubre. *Res. Exp. Cient.*, 10, 51-77.
- Gallego, D., Ribera, P., García-Herrera, R., Hernández, E., & Gimeno, L. (2005). A new look for the Southern Hemisphere jet stream. *Climate Dynamics*, 24(6), 607-621. doi:10.1007/s00382-005-0006-7
- García NO, Gimeno L, De La Torre L, Nieto R, Anel JA. (2005). North Atlantic Oscillation (NAO) and precipitation in Galicia (Spain). *Atmósfera* 18: 25–32.
- Hu, X., Cai, M., Yang, S. and Wu, Z. (2017). Delineation of thermodynamic and dynamic responses to sea surface temperature forcing associated with El Niño. *Climate Dynamics*. doi:10.1007/s00382-017-3711-0
- Ibáñez, A., Ollero, A. & Ormaetxea, O. (2000). Las inundaciones en la vertiente cantábrica del País Vasco en los últimos veinte años: principales eventos, consecuencias territoriales y sistemas de prevención. *Serie Geográfica*, N°9, 177 - 186.
- Lorenzo, M. N., Taboada, J. J., & Gimeno, L. (2007). Links between circulation weather types and teleconnection patterns and their influence on precipitation patterns in Galicia (NW Spain). *International Journal of Climatology*, 28(11), 1493-1505. doi:10.1002/joc.1646
- Ollero, A. (1997): Crecidas e inundaciones como riesgo hidrológico. Un planteamiento didáctico. *Urralde investigaciones españolas*, 20, pp. 261-283.
- OMM (1992): Vocabulario Meteorológico Internacional. OMM / No. 182, *Secretaría de la OMM, Segunda Edición*.
- Phillips, I. D., & Thorpe, J. (2006). Icelandic precipitation—North Atlantic sea-surface temperature associations. *International Journal of Climatology*, 26(9), 1201-1221. doi:10.1002/joc.1302
- Pohlert, T. (2015). trend: Non-Parametric Trend Tests and Change-Point Detection, R package version 0.0.1. 10.13140/RG.2.1.2633.4243.
- Polvorinos, F., Sánchez-Laulhé, J. M., 2012: Vientos descendentes muy fuertes en la Costa del Sol con fuerte flujo frío del norte y nordeste. *XXXII Jornadas Científicas de la Asociación Meteorológica Española*

- Schmitt, R. W., 2008: Salinity and the global water cycle. *Oceanography*, 21, 12–19, doi:10.5670/oceanog.2008.63.
- Stewart, Robert H. (2008). Introduction to physical oceanography. Texas A & M University. Available electronically from <http://hdl.handle.net/1969.1/160216>
- Serreze, M. C., Carse, F., Barry, R. G., & Rogers, J. C. (1997). Icelandic Low Cyclone Activity: Climatological Features, Linkages with the NAO, and Relationships with Recent Changes in the Northern Hemisphere Circulation. *Journal of Climate*, 10(3), 453-464. doi:10.1175/1520-0442(1997)0102.0.co;2
- Sun, W.Y. & Hsu, W.R. (2005). The Effects of Surface Friction on Downslope Wind and Mountain Waves. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*. doi:16.10.3319/TAO.2005.16.2.393(A).
- Uriarte, A., (1977), "El régimen pluviométrico en San Sebastián", *Munibe*, n.º 12, San Sebastián, pp.111-164.
- Urrutia, J., C. García-Soto, Sistemas frontales costeros del Golfo de Vizcaya detectados mediante radiometría infrarroja (NOAA) (1990). *III Reunión Científica del Grupo de Trabajo en Teledetección*, edited by C. Antón Pacheco and J. L. Labrandero, pp. 317 – 325, Serv. de Publ. del Minist. de Ind. y Energía, Inst. Tecnol. y Geominero, Madrid, Spain.
- Vega, F., Covelo, E., & Andrade, M. (2006). Competitive sorption and desorption of heavy metals in mine soils: Influence of mine soil characteristics. *Journal of Colloid and Interface Science*, 298(2), 582-592. doi:10.1016/j.jcis.2006.01.012