

Galicia upwelling revisited: out-of-season events in the rias (1967–2009)

Revisión de los eventos de afloramiento en Galicia: eventos fuera de temporada en las rías (1967–2009)

I Álvarez^{1,2}, R Prego^{3*}, M deCastro¹, M Varela⁴

¹ EPhysLab, Environmental Physics Laboratory, Facultad de Ciencias, Universidad de Vigo, 32004 Orense, Spain.

² CESAM, Departamento de Física, Universidade de Aveiro, 3810-193, Aveiro, Portugal.

³ Marine Research Institute (CSIC), 36208 Vigo, Spain.

⁴ Oceanographic Center of A Coruña (IEO), 15001 A Coruña, Spain.

* Corresponding author. E-mail: prego@iim.csic.es

ABSTRACT. Over the last decades several studies have been conducted on upwelling along the Galician coast that have significantly improved the knowledge of this process. These investigations showed that upwelling along this coast is a frequent phenomenon during the spring and summer months, pumping colder Eastern North Atlantic Central Water into the rias. Nevertheless, several upwelling events in autumn and winter have been characterized in the Galician rias, indicating that the upwelling process along the Galician coast is not a phenomenon restricted to spring and summer. In this study the recurrence of these upwelling events has been reviewed from published articles and analyzed from 1967 to 2009 along the western and northern Galician coasts in terms of an upwelling index. The highest mean number of days under favorable upwelling conditions per month was observed during spring and summer on the western (18–26 days) and northern (12–14 days) coasts. During autumn and winter the number of days was lower (11–18 days, western coast; 8–10 days, northern coast) although not negligible, showing the possibility of observing upwelling events during this period. In fact, during these months a significant probability of observing favorable upwelling conditions along both coasts (26%) was found, though the most probable situation corresponded to unfavorable upwelling conditions (44%). The results thus revealed that these events cannot be considered isolated episodes. Upwelling processes in the rias should be observed under favorable conditions, such as prevalence of northerly wind at the adjacent western Galician shelf, independently of the season.

Key words: upwelling, autumn, winter, ría, NW Iberian Peninsula.

RESUMEN. Durante las últimas décadas se han llevado a cabo varios estudios relacionados con el fenómeno de afloramiento a lo largo de la costa de Galicia que han mejorado significativamente el conocimiento de este proceso. De los resultados de estos trabajos se ha encontrado que el afloramiento a lo largo de esta costa es un fenómeno frecuente durante los meses de primavera y verano, introduciendo Agua Central del Atlántico Norte en el interior de las rías. Sin embargo, en las rías gallegas se han caracterizado varios eventos de afloramiento durante otoño e invierno que indican que este proceso no es un fenómeno exclusivo de las estaciones de primavera y verano. En este estudio se hace una revisión de estos eventos teniendo en cuenta artículos ya publicados y también se analiza su recurrencia a lo largo de las costas oeste y norte de Galicia a partir de datos de índice de afloramiento de 1967 a 2009. El número medio de días por mes con condiciones favorables de afloramiento más elevado se observó durante los meses de primavera y verano en la costa oeste (18–26 días) y costa norte (12–14 días). Durante otoño e invierno este número de días fue menor (11–18 días, costa oeste; 8–10 días, costa norte) aunque no despreciable, indicando la posibilidad de observar eventos de afloramiento durante este periodo. De hecho, durante estos meses se observó una cierta probabilidad de obtener condiciones favorables de afloramiento a lo largo de ambas costas (26%), aunque la situación más probable correspondió a condiciones desfavorables (44%). Estos resultados revelaron que estos eventos no se pueden considerar como episodios aislados. De esto se deduce que los procesos de afloramiento en las rías deberían ser observados bajo condiciones favorables, tales como vientos predominantes del norte en la plataforma adyacente, independientemente de la estación.

Palabras clave: afloramiento, otoño, invierno, ría, Península Ibérica.

INTRODUCTION

The Galician coast (NW Iberian Peninsula) is the northernmost limit of the Eastern North Atlantic Upwelling System, which extends from 10° N to about 44° N (Wooster *et al.* 1976). Capes Finisterre and Ortegal mark abrupt changes in coastline orientation, splitting this region mainly

INTRODUCCIÓN

La costa noroeste de la Península Ibérica es el límite norte del Sistema de Afloramiento del Atlántico Noreste, el cual se extiende desde 10° N hasta 44° N (Wooster *et al.* 1976). Los cabos Finisterre y Ortegal marcan cambios abruptos en la orientación de la costa de Galicia, dividiéndola en tres

in three different domains: the western Galician coast (south of Cape Finisterre), the northern Galician coast (east of Cape Ortegal) and the middle or northwestern Galician coast between these two capes (fig. 1). Several studies have been carried out in terms of wind-driven upwelling in this area. The first study analyzing the upwelling process in depth was carried out by Fraga (1981). This author described the upwelling off the Galician coast using scattered measurements obtained from 1974 to 1977 and emphasized the key question of the high concentrations of nitrate arising from upwelling inside the rias. Before this article, two scientific contributions related to upwelling stand out, although both were published in Spanish and had little diffusion. The first one connected the appearance of cold seawater along the Galician coast in summer (July–August) to the arrival of sardine in the Vigo Ria (Margalef and Andreu 1958). Some years later, the first study on thermohaline characteristics along the Galician shelf was published (Molina 1972).

Since Fraga's (1981) article the western Galician coast has received considerable attention due to the presence of four coastal systems known as Rías Baixas (western rias of Galicia). Numerous studies have characterized different upwelling events off the western rias, basically at the adjacent shelf (Blanton *et al.* 1984; Tenore *et al.* 1984; McClain *et al.* 1986; Alvarez-Salgado *et al.* 1993, 2000; Pérez *et al.* 1995; Prego and Bao 1997; Prego *et al.* 1999; Barton *et al.* 2001; Alvarez *et al.* 2008a) and also inside the rias (Blanton *et al.* 1987; Prego and Fraga 1992; Prego 1993a, 1993b, 1994; Rosón *et al.* 1995; Nogueira *et al.* 1997a, 1997b; Doval *et al.* 1998; Pardo *et al.* 2001; Prego *et al.* 1995, 2001; deCastro *et al.* 2004; Alvarez *et al.* 2005). From these studies it can be summarized that upwelling along this coast is a frequent phenomenon during the spring and summer months characterized by favorable northerly winds blowing along the shelf. This upwelling pumps colder nutrient-rich deeper water known as Eastern North Atlantic Central Water (ENACW; Fiuza 1984, Ríos *et al.* 1992) into the rias, generating great primary productivity that can support the high fishery and aquaculture yields in this region (Tenore *et al.* 1995).

North of Cape Finisterre, upwelling events also occur although they are less common than along the western Galician coast. Some articles have shown that during spring and summer, upwelling in this area is discontinuous and remains distant from the coast, near the edge of the continental shelf (Prego and Bao 1997, Prego and Varela 1998, Varela *et al.* 2005). These different upwelling conditions along the Galician coast can be explained by the change in shoreline orientation that modulates wind direction and intensity (Torres *et al.* 2003, Gómez-Gesteira *et al.* 2006, Alvarez *et al.* 2008b). As a result, favorable upwelling conditions are generally prevalent during the spring and summer months south of Cape Finisterre but not north of it. In addition, wind patterns in summer and winter are not necessarily representative of particular years and they may alternate producing

dominios: la costa oeste (al sur de cabo Finisterre), la costa norte (al este de cabo Ortegal) y la costa intermedia o costa noroeste comprendida entre ambos cabos (fig. 1). En esa región geográfica se han llevado a cabo diversos estudios sobre el afloramiento generado por viento. La primera investigación que analizó en profundidad el proceso de afloramiento fue realizada por Fraga (1981). Este autor describió la surgencia frente a la costa de Galicia usando mediciones obtenidas desde 1974 a 1977 en campañas oceanográficas e hizo hincapié en las altas concentraciones de nitrato derivadas de dichos eventos dentro de las rías. Anteriormente a esa labor, destacan dos trabajos científicos relacionados con el afloramiento que fueron publicados en español y tuvieron menor difusión. El primer trabajo relacionó la aparición de agua oceánica fría a lo largo de la costa gallega durante el verano (julio–agosto) con la llegada de la sardina a la ría de Vigo (Margalef y Andreu 1958); el otro, atendía a las características termohalinas en la plataforma gallega (Molina 1972).

Desde el artículo publicado por Fraga (1981) la costa oeste de Galicia ha recibido una atención considerable debido a la presencia de las Rías Baixas (las rías de la costa oeste de Galicia). Numerosos estudios han caracterizado diferentes eventos de afloramiento en la plataforma adyacente a estas rías (Blanton *et al.* 1984; Tenore *et al.* 1984; McClain *et al.* 1986; Alvarez-Salgado *et al.* 1993, 2000; Prego *et al.* 1995; Prego y Bao 1997; Prego *et al.* 1999; Barton *et al.* 2001; Alvarez *et al.* 2008a) y también en su interior (Blanton *et al.* 1987; Prego y Fraga 1992; Prego 1993a, 1993b, 1994; Rosón *et al.* 1995; Nogueira *et al.* 1997a, 1997b; Doval *et al.* 1998; Pardo *et al.* 2001; Prego *et al.* 1995, 2001; deCastro *et al.* 2004; Alvarez *et al.* 2005). Consecuentemente, se puede resumir que el afloramiento en esta costa occidental gallega es un fenómeno frecuente durante los meses de primavera y verano que es resultado del régimen de vientos de componente norte que soplan a lo largo de la plataforma. El afloramiento introduce en el interior de las rías un agua subsuperficial, más fría y rica en nutrientes que la que desplazan. La surgencia de Agua Central del Atlántico Noroccidental (ENACW; Fiuza 1984, Ríos *et al.* 1992) genera una alta producción primaria que es, en buena parte, responsable de la elevada pesca y acuicultura que caracteriza a esta región (Tenore *et al.* 1995).

Al norte del cabo de Finisterre, también ocurren eventos de afloramiento durante los meses de primavera y verano, pero suelen ser discontinuos y se mantienen lejos de la costa, cerca del borde de la plataforma continental (Prego y Bao 1997, Prego y Varela 1998, Varela *et al.* 2005). Estas diferentes condiciones de afloramiento a lo largo de la costa de Galicia se pueden explicar por un cambio de orientación en la línea de costa que modula la dirección y la intensidad del viento (Torres *et al.* 2003, Gómez-Gesteira *et al.* 2006, Alvarez *et al.* 2008b). Como resultado, las condiciones favorables de afloramiento son generalmente más frecuentes durante los meses estivales al sur del cabo de Finisterre que a su norte. Además, los patrones de viento en verano e

brief episodes of upwelling on the northern or western coast, or a combined pattern may occur producing weak upwelling on both coasts.

All these studies mentioned have significantly improved the knowledge of the upwelling process along the Galician coast; nevertheless, the initial idea of one upwelling season (i.e., upwelling occurring only during spring and summer) needs to be revised. In fact, several out-of-season upwelling events have been analyzed in the Galician rias from hydrographical, biogeochemical, and planktonic points of view. For example, a winter upwelling event (January 1998) was described in the Pontevedra Ria, characterized by the entrance into the estuary of warm and salty water driven by the Iberian Poleward Current (IPC) (Álvarez *et al.* 2003, Prego *et al.* 2007). ENACW was also observed in the Pontevedra Ria in late winter (March 1998, Prego *et al.* 2007), in the Vigo Ria during autumn (November 2001, deCastro *et al.* 2006a), and in Corcubión Sound in mid-winter (February 2005, Varela *et al.* 2010). Finally, evidence of winter upwelling was described for the first time in the northern Galician rias (February 2008, Álvarez *et al.* 2009), characterized by the presence of upwelled shelf bottom seawater not associated with ENACW or IPC.

These autumn-winter upwelling events indicate that the upwelling process along the Galician coast cannot be considered a phenomenon limited to spring and summer and they should be observed under favorable conditions independently of the season. In addition, the entrance of these different water types inside the rias can have implications for biogeochemical and phytoplankton patterns. Some articles have already emphasized the impact of winter upwelling on fisheries off western Iberia (Santos *et al.* 2004) and the Bay of Biscay (Borja *et al.* 1996, Koutsikopoulos and Le Cann 1996). The IPC can make the water more salty and poor in nutrient salts, while ENACW can turn the ria more productive, although to a lesser extent than during a summer upwelling event (Prego *et al.* 2007). These circumstances indicate that further research is necessary in order to clarify the occurrence of these phenomena and, consequently, to determine their possible impact on coastal ecosystems.

Thus, this study aimed to characterize the recurrence of these autumn-winter upwelling events along the Galician coast. The research was carried out in terms of an upwelling index calculated from 1967 to 2009, analyzing upwelling frequency and variability. In the next section the data and methods used in this article are described. The results and discussion section is organized in four subsections. First, the variability of upwelling conditions will be analyzed along the Galician coast over the period 1967–2009 considering the upwelling index calculated from Ekman transport data and the most representative atmospheric modes in the North Atlantic region. Second, several autumn-winter upwelling events characterized over the last years along the western and northern Galician coasts will be considered to describe the factors responsible for the occurrence of these events in

invierno se pueden alternar produciendo breves episodios de afloramiento en la costa norte u oeste, aunque también puede ocurrir un patrón combinado en ambas costas.

Los estudios citados han mejorado significativamente el conocimiento del proceso de afloramiento a lo largo de la costa de Galicia; sin embargo, la idea inicial de un afloramiento estacional (i.e., que se produzca solamente durante la primavera y el verano) debe ser revisada. De hecho, recientemente se han analizado en las rías gallegas varios eventos de afloramiento “fuera de estación” desde puntos de vista hidrográficos, biogeoquímicos y planctónicos. Por ejemplo, en la ría de Pontevedra se ha descrito un evento invernal (enero de 1998) caracterizado por la entrada en la ría de agua cálida y salina transportada por la corriente ibérica hacia el polo (IPC) (Álvarez *et al.* 2003; Prego *et al.* 2007). También hubo constancia de la presencia de ENACW en dicha ría a finales del invierno (marzo de 1998, Prego *et al.* 2007), así como en la ría de Vigo durante el otoño (noviembre de 2001, deCastro *et al.* 2006a) y en el estrecho de Corcubión a mediados del invierno (febrero de 2005, Varela *et al.* 2010). Por primera vez en las rías del Norte de Galicia se describió en febrero de 2008 un afloramiento en invierno (Álvarez *et al.* 2009), que se caracterizó por la presencia de agua oceánica subsuperficial procedente de la plataforma continental que no estaba asociada a ENACW o IPC.

Los referidos eventos de afloramiento en otoño e invierno a lo largo de la costa de Galicia indican que dicho fenómeno no se puede considerar limitado a las estaciones de primavera y verano, esto es, que un afloramiento debe acontecer siempre que las condiciones meteorológicas sean favorables, independientemente de la época del año. La entrada de distintos tipos de agua dentro de las rías conlleva implicaciones en los patrones bioquímicos y el fitoplancton. Algunos artículos ya han destacado el impacto de los afloramientos en invierno sobre la pesca frente a la costa oeste de la Península Ibérica (Santos *et al.* 2004.) y del golfo de Vizcaya (Borja *et al.* 1996, Koutsikopoulos y Le Cann 1996). El agua transportada por la IPC aporta a las rías agua más salina y pobre en sales nutrientes, mientras que la correspondiente al ENACW ocasiona que el agua de las rías sea más productiva, aunque durante el invierno en menor medida que en verano (Prego *et al.* 2007). Estas circunstancias indican la necesidad de profundizar sobre la aparición de estos fenómenos y determinar su posible impacto sobre los ecosistemas costeros.

Así, el objetivo de este estudio es caracterizar la recurrencia de los eventos de afloramiento de otoño e invierno a lo largo de la costa de Galicia. La investigación se plantea con base en el índice de afloramiento calculado desde 1967 hasta 2009, analizando la frecuencia y la variabilidad del afloramiento. En la siguiente sección se describen los datos y métodos utilizados en este artículo. La sección de resultados y discusión está organizada en cuatro subsecciones. En primer lugar se analizará la variabilidad de las condiciones de afloramiento en la costa de Galicia durante el periodo 1967–2009 teniendo en cuenta el índice de afloramiento

terms of atmospheric conditions. Third, the recurrence of autumn-winter upwelling events will be analyzed over the period 1967–2009 taking into account the mean number of days per month under favorable upwelling conditions and the probability of finding consecutive days under these favorable conditions. This subsection also includes an analysis of the daily upwelling index to compare the occurrence of upwelling along the western and northern Galician coast. Fourth, the possible oceanographic implications of autumn-winter upwelling events will be analyzed considering the thermohaline properties corresponding to events previously characterized along the Galician coast. Finally, a last section including the main conclusions of this study is presented.

MATERIAL AND METHODS

In this section the different databases used in this article are described. An upwelling index (UI) will be calculated using data from the Pacific Fisheries Environmental Laboratory (PFEL) and from the QuikSCAT satellite. The most representative atmospheric modes in the Northern Hemisphere, obtained from the Climate Prediction Center (CPC) at the National Center of Environmental Prediction (NCEP), will also be considered to analyze upwelling variability. In addition, several cruises carried out along the Galician coast over the last years will be considered to characterize the thermohaline variables corresponding to different autumn-winter upwelling events observed inside the estuaries located in the area.

Ekman transport data provided by PFEL (<http://www.pfeg.noaa.gov>) were considered from 1967 to 2009. The PFEL distributes environmental index products and time series databases to cooperating researchers, taking advantage of its long association with the US Navy's Fleet Numerical Meteorology and Oceanography Center (FNMOC). The FNMOC produces operational forecasts of the state of the atmosphere and the ocean several times daily and maintains archives of several important parameters. These parameters are model-derived products that are routinely distributed to researchers. For our purposes, six-hourly Ekman transport data were downloaded from PFEL using the Live Access Server (LAS) at two points selected along the western Galician coast (42.5° N and 41.5° N along 10.5° W) and two points selected along the northern one (8.5° W and 7.5° W along 45.5° N) (fig. 1, crosses) on an approximately 1° × 1° grid. A control point was also considered at 43.5° N, 10.5° W (fig. 1, black square). These data sets were averaged to obtain daily series. The long time resolution of PFEL data allows analyzing upwelling variability. Thus, the UI was calculated from Ekman transport data.

Surface wind fields provided by the QuikSCAT satellite were also considered (http://podaac.jpl.nasa.gov/DATA_CATALOG/quikscatinfo.html). The data set is available from 1999 to 2009 and consists of global grid values of meridional and zonal components of wind measured twice daily on an approximately 0.25° × 0.25° grid with global coverage.

calculado a partir de los datos del transporte de Ekman y de los modos atmosféricos más representativos de la región del Atlántico Norte. En segundo lugar se considerarán varios eventos de afloramiento de otoño e invierno que han sido caracterizados en los últimos años a lo largo de la costa oeste y norte de Galicia para describir los factores responsables de la ocurrencia de estos eventos en términos de las condiciones atmosféricas. En tercer lugar se analizará la recurrencia de los eventos de afloramiento de otoño e invierno durante el periodo 1967–2009, teniendo en cuenta el número medio de días por mes con condiciones favorables de afloramiento y la probabilidad de encontrar días consecutivos bajo estas condiciones favorables. Esta subsección también incluye un análisis del índice de afloramiento diario para comparar la ocurrencia del afloramiento a lo largo de la costa oeste y la costa norte de Galicia. En cuarto lugar se analizarán las posibles implicaciones oceanográficas de los eventos de afloramiento de otoño e invierno conforme sus propiedades termohalinas. Finalmente, se presenta una última sección que incluye las conclusiones de este estudio.

MATERIALES Y MÉTODOS

En esta sección se describen las diferentes bases de datos utilizadas en este artículo. El índice de afloramiento (IA) se calculará utilizando los datos obtenidos del Laboratorio Ambiental de Pesca del Pacífico (PFEL) y del satélite QuikSCAT. Los modos atmosféricos más representativos en el hemisferio Norte, obtenidos del Centro de Predicción Climática (CPC) en el Centro Nacional de Predicción Ambiental (NCEP), se considerarán para analizar la variabilidad del afloramiento. Además, se tendrán en cuenta varias campañas oceanográficas realizadas en las costas gallegas durante los últimos años para caracterizar las variables termohalinas en diferentes eventos de afloramiento otoño-inviernales en rías.

Los datos del transporte de Ekman obtenidos del PFEL (<http://www.pfeg.noaa.gov>) se consideraron desde 1967 hasta 2009. El PFEL distribuye diversos índices medioambientales y series temporales de diferentes bases de datos para cooperar con los investigadores, aprovechando su larga asociación con el Centro Numérico de Meteorología y Oceanografía (FNMOC) de la Armada de los Estados Unidos. El FNMOC produce predicciones operativas del estado de la atmósfera y del océano varias veces al día y mantiene archivos de varios parámetros importantes. Estos parámetros son productos derivados de modelos que se distribuyen habitualmente a los investigadores. Para nuestros propósitos, los datos del transporte de Ekman obtenidos cada seis horas se descargaron mediante el servidor de acceso directo (LAS) en dos puntos seleccionados en la costa oeste de Galicia (42.5° N y 41.5° N en 10.5° W) y dos puntos seleccionados a lo largo de la costa norte (8.5° W y 7.5° W en 45.5° N; fig. 1, cruces) en una malla de aproximadamente 1° × 1°. También se consideró un punto de control a 43.5° N, 10.5° W (fig. 1, cuadrado negro). Estos conjuntos de datos se promediaron para obtener series

QuikSCAT data are given in an ascending and descending pass. Data corresponding to one pass present numerous shadow areas; therefore, an average between both passes was considered to increase the coverage. Wind speed measurements range from 3 to 20 m s⁻¹ (accuracy: 2 m s⁻¹ and 20° in direction) (see the user manual at ftp://podaac.jpl.nasa.gov/ocean_wind/quikscat/L3/doc/qscat_L3.pdf). The reference height of wind data is 10 m. In addition, it is necessary to take into account that wind data close to the coast (<25 km) are not available due to the existence of a small land mask. However, previous studies have shown that QuikSCAT data are comparable to modeled data in this area (Gómez-Gesteira *et al.* 2006, Álvarez *et al.* 2008b). A statistical comparison between satellite wind measurements and high resolution numerical models was carried out (Penabad *et al.* 2008), revealing similar results between models and satellite data. Ekman transport was calculated using wind data from the QuikSCAT satellite (Álvarez *et al.* 2008b) along the whole Galician coast and at two control points located at 42° N, 10° W (western coast) and 44.25° N, 8° W (northern coast). The high spatial resolution of this data set allows determining the possible effect of coastal topographic features on wind variability and can be used to characterize favorable upwelling conditions in detail along the western and northern Galician coast.

The UI is calculated from the Ekman transport vector, $Q \equiv (Q_x, Q_y)$, as the component in the direction perpendicular to the shoreline (Bakun 1973, Nykjaer and Van Camp 1994, Gómez-Gesteira *et al.* 2006). Although the shoreline angle along the western and northern Galician coast changes slightly from the northern to the southern limit and from the western to the eastern limit, at regional scales it may be considered to approximately follow meridian and parallel lines. Thus, $-Q_x$ can be directly considered the UI along the western coast and Q_y along the northern one. Positive (negative) UI values mean favorable (unfavorable) upwelling conditions.

The most representative teleconnection indices in the Northern Hemisphere (NAO, EA, SCA, EA/WR, and POL) were obtained from CPC/NCEP at monthly time scales from 1967 to 2009. The North Atlantic Oscillation (NAO) consists of a north-south dipole of geopotential anomalies with one center located over Iceland and the other spanning between 35° N and 40° N in the central North Atlantic. The East Atlantic (EA) pattern consists of a north-south dipole that spans the entire North Atlantic Ocean with the centers near 55° N, 20–35° W and 25–35° N, 0–10° W. The anomaly centers of the EA pattern are displaced southeast from the NAO pattern centers. The Scandinavian (SCA) pattern consists of a primary circulation center over Scandinavia with a weaker center of opposite sign over western Europe. The East Atlantic/West Russia (EA/WR) pattern is one of three prominent teleconnection patterns that affect Eurasia throughout the year. This pattern consists of four main anomaly centers. The Europe Polar/Eurasia (POL) pattern consists of one center over the polar region and centers of opposite sign over

diarias. La elevada resolución temporal de los datos de PFEL permite analizar la variabilidad del afloramiento. Así, el IA se calculó a partir de los datos del transporte de Ekman.

También se consideraron los campos de viento en superficie proporcionados por el satélite QuikSCAT (http://podaac.jpl.nasa.gov/DATA_CATALOG/quikscatinfo.html). Esta base de datos está disponible desde 1999 hasta 2009 y consiste en valores de las componentes meridional y zonal del viento medidos dos veces al día en una malla de aproximadamente 0.25° × 0.25° con cobertura mundial. Los datos de QuikSCAT se dan en una pasada ascendente y descendente. Los datos correspondientes a una sola pasada presentan numerosas zonas de sombra, por lo tanto, se consideró un promedio entre ambas pasadas para aumentar la cobertura. Las medidas de la velocidad del viento varían entre 3 y 20 m s⁻¹ (precisión: 2 m s⁻¹ y 20° en dirección) (consultar el manual de usuario en ftp://podaac.jpl.nasa.gov/ocean_wind/quikscat/L3/doc/qscat_L3.pdf). La altura de referencia de los datos de viento es de 10 m. Es necesario tener en cuenta que los datos de viento cerca de la costa (<25 km) no están disponibles debido a la existencia de una pequeña máscara causada por la proximidad de la tierra. Sin embargo, estudios previos han demostrado que los datos de QuikSCAT son comparables con los datos modelados en esta área (Gómez-Gesteira *et al.* 2006, Álvarez *et al.* 2008b). Se llevó a cabo una comparación estadística entre las mediciones de viento de satélite y modelos numéricos de alta resolución (Penabad *et al.* 2008), revelando resultados similares entre los modelos y los datos del satélite. El transporte de Ekman se calculó utilizando los datos de viento del satélite (Álvarez *et al.* 2008b) a lo largo de toda la costa gallega y en dos puntos de control situados en 42° N, 10° W (costa oeste) y 44.25° N, 8° W (costa norte). La alta resolución espacial de esta base de datos permite determinar el posible efecto de las características topográficas de la costa en la variabilidad del viento y, por lo tanto, estos datos pueden ser usados para caracterizar en detalle las condiciones favorables de afloramiento a lo largo de la costa oeste y costa norte de Galicia.

El IA se calcula a partir del vector del transporte de Ekman, $Q \equiv (Q_x, Q_y)$, como la componente en la dirección perpendicular a la costa (Bakun 1973, Nykjaer y Van Camp 1994, Gómez-Gesteira *et al.* 2006). Aunque el ángulo de la línea costera oeste y norte de Galicia cambia ligeramente del límite norte al sur y del límite oeste al este, a escala regional se puede considerar que aproximadamente sigue las líneas de los meridianos y paralelos. Por lo tanto, $-Q_x$ puede considerarse directamente como el IA a lo largo de la costa oeste y Q_y a lo largo de la costa norte. Los valores positivos (negativos) del IA indican condiciones favorables (desfavorables) de afloramiento.

Los índices de teleconexión más representativos en el hemisferio Norte (NAO, EA, SCA, EA/WR y POL) se obtuvieron del CPC/NCEP a una escala temporal mensual de 1967 a 2009. La Oscilación del Atlántico Norte (NAO) consta de un dipolo norte-sur de anomalías de geopotencial

Europe and northeastern China. A detailed description of these teleconnection indices can be found on the NCEP website (<http://www.cpc.noaa.gov>). The upwelling variability will also be analyzed in terms of these atmospheric modes.

Thermohaline variables measured during 11 cruises conducted in autumn and winter between 1998 and 2008 along the western and northern Galician coasts were also considered. These cruises correspond to the occurrence of several autumn-winter upwelling events and their thermohaline properties will allow identifying the different subsurface seawater upwelled inside the estuaries located in the area. QUIKSCAT data were used to compute the UI before and during these cruises.

RESULTS AND DISCUSSION

Variability of upwelling conditions

In this section, the variability of upwelling conditions is analyzed in terms of the UI calculated from Ekman transport

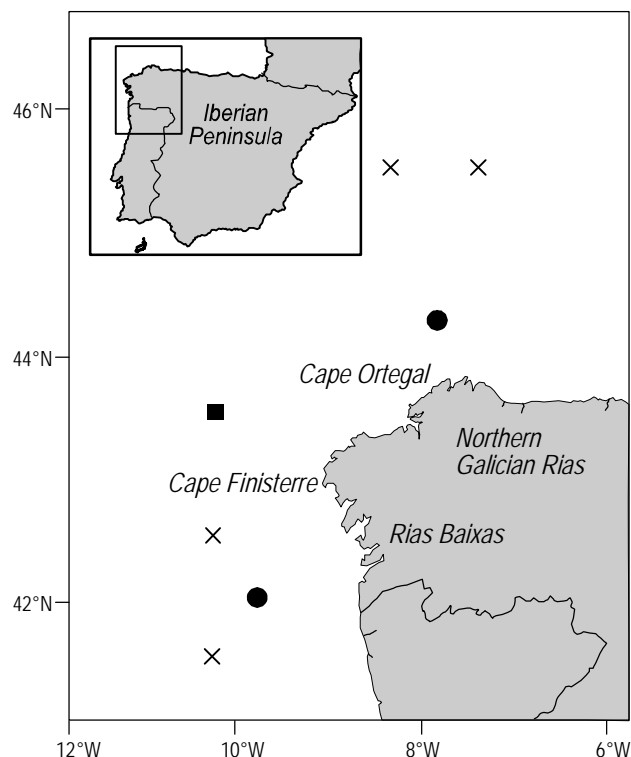


Figure 1. Map of the Galician coast. The black square and crosses represent the points where data from the PFEL database were obtained, and black circles represent the two control points considered to analyze wind data provided by the QuikSCAT satellite.

Figura 1. Mapa de la costa de Galicia. El cuadrado negro y las cruces representan los puntos donde se obtuvieron los datos de la base de PFEL y los círculos negros representan los dos puntos de control considerados para analizar los datos de viento proporcionados por el satélite QuikSCAT.

con un centro ubicado en Islandia y el otro entre los 35° N y 40° N en el centro del Atlántico Norte. El patrón del Atlántico Este (EA) consiste en un dipolo norte-sur que se extiende por todo el océano Atlántico del Norte con los centros cerca de 55° N, 20–35° W y 25–35° N, 0–10° W. Los centros de anomalías del patrón EA están desplazados hacia el sureste con respecto a los centros del patrón NAO. El patrón Escandinavo (SCA) se compone de un centro de circulación primaria sobre los países escandinavos, con un centro débil de signo opuesto sobre Europa occidental. El patrón del Atlántico Este/Rusia Occidental (EA/WR) es uno de los tres patrones de teleconexión que afectan a Eurasia a lo largo del año. Este patrón consta principalmente de cuatro centros de anomalía. El patrón Europa Polar/Eurasia (POL) se compone de un centro sobre la región polar y centros de signo opuesto sobre Europa y el noreste de China. Una descripción detallada de estos índices de teleconexión se puede encontrar en la página web de NCEP (<http://www.cpc.noaa.gov>). La variabilidad del afloramiento también se analiza en términos de estos modos atmosféricos.

También se consideraron las variables termohalinas medidas en 11 campañas oceanográficas realizadas durante el otoño e invierno entre 1998 y 2008 en las costas oeste y norte de Galicia. Estas campañas se corresponden con la ocurrencia de varios eventos de afloramiento en otoño-invierno y las propiedades termohalinas permitirán identificar el agua subsuperficial aflorada en el interior de las rías situadas en la zona. Los datos de QuikSCAT se utilizaron para calcular el IA antes y durante los días en los que se realizaron estas campañas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Variabilidad de las condiciones de afloramiento

En esta sección se analiza la variabilidad de las condiciones de afloramiento en términos del IA calculado a partir de datos del transporte de Ekman y de los modos atmosféricos más representativos de la región del Atlántico Norte (NAO, EA, SCA, EA/WR y POL). Este análisis se llevó a cabo de forma individual para la costa oeste y norte de Galicia durante el periodo 1967–2009.

En la figura 2a–b se muestra la evolución interanual del IA promediado espacialmente en los puntos de control (fig. 1, cruces) durante este periodo de 43 años. Ambas señales mostraron un comportamiento macroscópico similar con valores máximos (condiciones favorables de afloramiento) en primavera y verano y mínimos en otoño e invierno, con importantes diferencias entre años. Sin embargo, para la costa oeste (fig. 2a), la señal tiende a estar desplazada hacia valores positivos, mientras que para la costa norte (fig. 2b) dicha señal se desplaza hacia valores negativos. La evolución temporal del IA que se muestra en la figura 2a está de acuerdo con el patrón obtenido por Alvarez *et al.* (2008a) a lo largo de toda la costa occidental de la Península Ibérica

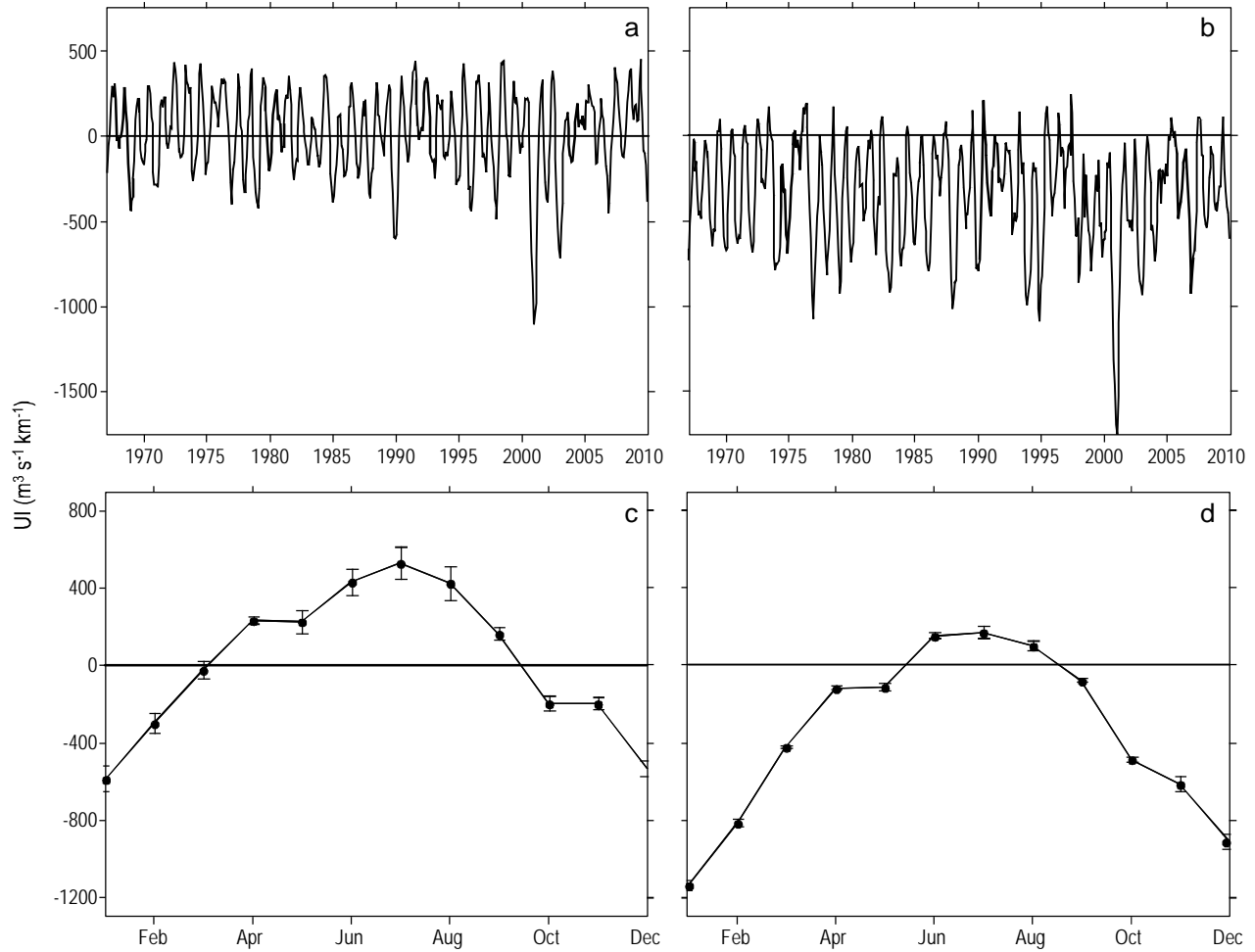


Figure 2. Interannual evolution of the upwelling index (UI) spatially averaged using monthly averages from 1967 to 2009 along the (a) western and (b) northern coasts of Galicia. Annual cycle of the UI spatially averaged from 1967 to 2009 along the (c) western and (d) northern coasts of Galicia. The UI was calculated from PFEL data.

Figura 2. Evolución interanual del índice de afloramiento (IA) promediado espacialmente con medias mensuales de 1967 a 2009 a lo largo de (a) la costa oeste y (b) la costa norte de Galicia. Ciclo anual del IA promediado espacialmente de 1967 a 2009 a lo largo de (c) la costa oeste y (d) la costa norte de Galicia. El IA se ha calculado a partir de los datos de PFEL.

data and the most representative atmospheric modes in the North Atlantic region (NAO, EA, SCA, EA/WR, and POL). This analysis is carried out individually along the western and northern Galician coasts over the period 1967–2009.

The interannual evolution of the spatially averaged UI at the control points (fig. 1, crosses) during these 43 years is shown in figure 2a–b. Both signals were grossly similar with maximum values (favorable upwelling conditions) in spring and summer and minimum values in autumn and winter, showing important differences among years. Nevertheless, along the western coast (fig. 2a) the signal tended to be displaced toward positive values, whereas along the northern coast (fig. 2b) the signal was displaced toward negative values. The temporal evolution of UI shown in figure 2a agrees with the pattern obtained by Álvarez *et al.* (2008a) along the whole western coast of the Iberian Peninsula (37°–43° N),

(37°–43° N), aunque los valores del IA cambian ligeramente debido a las diferentes áreas consideradas en cada estudio. El comportamiento observado en la costa norte (fig. 2b) está de acuerdo con los resultados recientes obtenidos por Álvarez *et al.* (2010).

Los valores del IA se promediaron mensualmente durante el periodo de estudio para determinar la estación con las condiciones más favorables de afloramiento en ambas costas (fig. 2c–d). Ambas costas mostraron un ciclo anual con condiciones favorables de afloramiento en la zona oeste durante primavera y verano, pero sólo en verano en la zona norte. El valor máximo del IA se observó en julio en ambas costas, aunque con valores mayores en la costa oeste (600 m³ s⁻¹ km⁻¹) que en la norte (200 m³ s⁻¹ km⁻¹). Para el resto del año, el IA mostró valores negativos o prácticamente nulos, indicando que los eventos de afloramiento en otoño e

although the UI values change slightly due to the different area considered in each study. The behavior observed on the northern coast (fig. 2b) also agrees with the recent results obtained by Alvarez *et al.* (2010).

The UI values were monthly averaged over the period of study to determine the season with most favorable upwelling conditions on both coasts (fig. 2c–d). Both coasts showed a marked annual cycle with favorable upwelling conditions from spring to summer along the western coast but only in summer along the northern one. The maximum UI value was observed in July on both coasts, although the highest values were close to $600 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ km}^{-1}$ along the western coast and close to $200 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ km}^{-1}$ along the northern one. For the rest of the year, the UI presented negative or practically null values showing that upwelling in autumn and winter was absent. Nevertheless, in the next section it will be shown that episodic events can occur during these seasons. Error bars, as standard deviation of the monthly data, were observed to be negligible compared to the amplitude of the annual cycle calculated on each coast. These annual cycles also agree with the results obtained by Alvarez *et al.* (2008a) for the whole western coast of the Iberian Peninsula and by Alvarez *et al.* (2010) along the western Cantabrian coast.

The upwelling variability can also be analyzed using the most representative atmospheric modes in the North Atlantic region (NAO, EA, SCA, EA/WR, and POL). These atmospheric modes are often the phenomenon responsible for abnormal weather patterns occurring simultaneously over vast distances (Rodríguez-Puebla *et al.* 1998, Lorenzo and Taboada 2005, deCastro *et al.* 2006b) and can influence the upwelling variability. Thus, the correlation coefficient between these patterns and the UI was calculated for the most favorable and unfavorable upwelling periods at the four control points (table 1). Taking into account the pattern observed in figure 2c–d, the favorable upwelling period was considered from June to August (JJA) and the unfavorable period from November to February (NDJF).

Along the western Galician coast, during NDJF the most important atmospheric pattern was EA showing the highest correlation coefficient value (–0.60). During JJA, the UI

invierno no son comunes. Sin embargo, en la siguiente sección se mostrará que estos eventos pueden ocurrir durante esas estaciones. Las barras de error (desviación estándar de los datos mensuales) revelan valores despreciables en comparación con la amplitud del ciclo anual calculado en cada costa. Estos ciclos anuales son congruentes con los resultados obtenidos por Alvarez *et al.* (2008a) en la costa atlántica de la Península Ibérica y por Alvarez *et al.* (2010) en la cantábrica.

La variabilidad del afloramiento también se puede analizar utilizando los modos atmosféricos más representativos de la región del Atlántico Norte (NAO, EA, SCA, EA/WR y POL). Estos modos atmosféricos son a menudo los fenómenos responsables de los patrones climáticos anormales que ocurren al mismo tiempo sobre grandes distancias (Rodríguez-Puebla *et al.* 1998, Lorenzo y Taboada 2005, deCastro *et al.* 2006b) y pueden influir en la variabilidad del afloramiento. Así, se ha calculado el coeficiente de correlación entre dichos patrones e IA para el periodo de afloramiento más favorable y desfavorable en los cuatro puntos de control (tabla 1). Teniendo en cuenta el patrón observado en la figura 2c–d, el periodo favorable de afloramiento se consideró desde junio a agosto (JJA) y el periodo desfavorable entre noviembre y febrero (NDEF).

En la costa oeste de Galicia, el patrón atmosférico más importante durante NDEF fue EA, que mostró el valor más alto del coeficiente de correlación (–0.60). Durante JJA el IA sólo mostró una correlación significativa con el patrón EA/WR (–0.20). El comportamiento observado durante NDEF concuerda con las correlaciones entre los patrones atmosféricos y Q_x calculadas por deCastro *et al.* (2008) en el punto oceánico 43° N , 11° W durante la estación húmeda (NDEF). La mejor correlación se obtuvo para el patrón EA (0.65).

En la costa norte, el patrón EA demostró ser el modo atmosférico con mayor influencia en la variabilidad del afloramiento durante ambas estaciones (–0.45). Además, durante NDEF el patrón EA/WR también mostró cierta influencia en el IA con una correlación positiva (0.40). No se encontraron correlaciones significativas para los modos POL y SCA. Estos resultados también se pueden comparar con los obtenidos por Alvarez *et al.* (2010) a lo largo de la costa cantábrica.

Table 1. Correlation coefficient between atmospheric patterns and the upwelling index (UI) calculated during the most upwelling favorable (June to August, JJA) and unfavorable (November to February, NDJF) periods from 1967 to 2009 at the four control points (significance level > 95%). The UI was calculated from PFEL data.

Tabla 1. Coeficiente de correlación entre los patrones atmosféricos y el índice de afloramiento (IA) calculado para el periodo más favorable (de junio a agosto, JJA) y desfavorable (de noviembre a febrero, NDEF) al afloramiento entre 1967 y 2009 en los cuatro puntos de control (nivel de significancia > 95%). El IA se ha calculado a partir de los datos de PFEL.

Pattern*	42.5° N		41.5° N		8.5° W		7.5° W	
	JJA	NDJF	JJA	NDJF	JJA	NDJF	JJA	NDJF
NAO	–	0.20	–	0.28	0.32	–0.23	0.33	–0.22
EA	–	–0.62	–	–0.58	–0.43	–0.46	–0.42	–0.44
EA/WR	–0.18	–	–0.22	–	–	–0.39	–	0.41

* NAO, North Atlantic Oscillation; EA, East Atlantic; EA/WR, East Atlantic/West Russia.

only showed significant correlation with the EA/WR pattern (−0.20). The behavior observed during NDJF agrees with the correlations between atmospheric patterns and Q_x calculated by deCastro *et al.* (2008) at the ocean point 43° N, 11° W also during the wet season (NDJF). The best correlation was obtained for the EA pattern (0.65).

Along the northern coast, the EA pattern was the atmospheric mode with most influence on upwelling variability during both periods (−0.45). In addition, during NDJF the EA/WR pattern also showed some influence on the UI with a positive correlation (0.40). No significant correlations were found for the POL and SCA modes. These results can also be compared with those obtained by Álvarez *et al.* (2010) along the Cantabrian coast of the Iberian Peninsula. They found that during winter (NDJ), the EA/WR and EA patterns explained the main variance of UI, while during summer (JJA) the UI variability was explained in terms of the EA pattern.

Factors responsible for autumn-winter upwelling events

In this section, several autumn-winter upwelling events characterized between 1998 and 2008 along the Galician coast are considered to describe the factors responsible for their occurrence. This analysis is carried out in terms of atmospheric conditions.

As previously mentioned, the period of most favorable upwelling conditions along the Galician coast corresponds to the spring and summer months. Nevertheless, several autumn-winter upwelling events have been characterized over the last years along the western coast (Álvarez *et al.* 2003; deCastro *et al.* 2006a, 2008; Prego *et al.* 2007; Varela *et al.* 2010) and along the northern coast (Álvarez *et al.* 2009). The mechanism driving these autumn-winter

Estos autores encontraron que durante la estación de invierno (NDE) los patrones EA/WR y EA explicaban la mayor variabilidad del IA, mientras que durante el verano (JJA) la variabilidad se explicaba en términos del patrón EA.

Factores responsables de los eventos de afloramiento de otoño e invierno

En esta sección se consideran varios eventos de afloramiento caracterizados en otoño e invierno entre 1998 y 2008 en la costa de Galicia para describir los factores responsables de su ocurrencia. Este análisis se lleva a cabo en términos de las condiciones atmosféricas.

Como se mencionó anteriormente, el periodo con las condiciones más favorables de afloramiento en Galicia corresponde a primavera y verano. No obstante, en los últimos años se han caracterizado varios eventos de afloramiento en otoño e invierno en la costa oeste (Álvarez *et al.* 2003; deCastro *et al.* 2006a, 2008; Prego *et al.* 2007; Varela *et al.* 2010) y la costa norte (Álvarez *et al.* 2009) de Galicia. El mecanismo responsable de la aparición de estos eventos es similar al observado en primavera y verano; es decir, vientos del norte a lo largo de la costa oeste y vientos del este a lo largo de la costa norte. En la tabla 2 se muestra un resumen de las condiciones atmosféricas correspondientes a los eventos de afloramiento caracterizados en otoño e invierno. DeCastro *et al.* (2008) caracterizaron diferentes casos durante ambas estaciones en la ría de Pontevedra desde 2000 hasta 2005. A modo de ejemplo, sólo se ha considerado una campaña por año en la tabla 2.

Los parámetros que se analizaron son la duración de las condiciones favorables de afloramiento hasta la fecha de cada una de las campañas y el valor medio del IA durante estos periodos. Estos parámetros se calcularon mediante los datos

Table 2. Atmospheric conditions corresponding to the autumn-winter upwelling events characterized along the Galician coast. Duration and upwelling index (UI) were calculated using wind data provided by PFEL for 1998 and by the QuikSCAT satellite for the rest of the years.

Tabla 2. Condiciones atmosféricas correspondientes a los eventos de afloramiento caracterizados en otoño e invierno a lo largo de la costa de Galicia. La duración y el índice de afloramiento (UI) se han calculado a partir de los datos de viento proporcionados por el PFEL para 1998 y por el satélite QuikSCAT para el resto del año.

Geographical zone	Date of event	Duration (days)	<UI> ($\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{km}^{-1}$)	Reference
Pontevedra Ria	27 January 1998	7	680	Álvarez <i>et al.</i> (2003)
	24 March 1998	14	800	Prego <i>et al.</i> (2007)
Vigo Ria	15 November 2001	16	2080	deCastro <i>et al.</i> (2006a)
Pontevedra Ria	25 February 2000	17	919	deCastro <i>et al.</i> (2008)
	27 November 2001	28	1820	
	22 February 2002	10	1784	
	10 February 2003	19	1549	
	16 November 2004	19	1655	
	31 January 2005	14	1736	
	18 February 2005	31	1610	Varela <i>et al.</i> (2010)
Northern rias	20 February 2008	9	1718	Álvarez <i>et al.</i> (2009)

upwelling events is similar to the one observed in spring and summer; namely, northerly winds along the western coast and easterly winds along the northern coast. A summary of the atmospheric conditions corresponding to these autumn-winter upwelling events characterized along the Galician coast is shown in table 2. DeCastro *et al.* (2008) characterized different autumn-winter upwelling events in Pontevedra Ria from 2000 to 2005. As an example, only one cruise per year was considered in table 2.

The analyzed parameters are the duration of favorable upwelling conditions until the date of each cruise and the mean UI value during these periods. These parameters were calculated using wind data provided by the QuikSCAT satellite (fig. 1, black circles), except for the events characterized in 1998 (Alvarez *et al.* 2003, Prego *et al.* 2007). The UI of the 1998 events was calculated using Ekman transport data provided by PFEL for the control point 43.5° N, 10.5° W. Taking into account this table it is possible to see that most of the autumn-winter events occurred along the western Galician coast. The duration of these events ranged from 7 to 31 days with UI values ranging from 680 to 2080 m³ s⁻¹ km⁻¹. Along the northern coast only one event was recently characterized (Alvarez *et al.* 2009) with a duration of 9 days and a mean UI value of around 1700 m³ s⁻¹ km⁻¹.

The different autumn-winter upwelling conditions on the western and northern Galician coasts were also characterized by means of an example of the atmospheric conditions corresponding to two autumn-winter upwelling events (fig. 3). The first one corresponds to November 2004 on the western coast (deCastro *et al.* 2008) and the second one to February 2008 on the northern coast (Alvarez *et al.* 2009). Favorable upwelling conditions were characterized taking into account the Ekman transport calculated using QuikSCAT wind data for each coast. In addition, Ekman transport was averaged for four days before each date. On the western coast (fig. 3a), Ekman transport was characterized by a northwestward direction all along the shelf with maximum intensity values (2800 m³ s⁻¹ km⁻¹) over all the area. On the contrary, on the northern coast (fig. 3b), the Ekman transport pattern pointed northward with maximum intensity (2600 m³ s⁻¹ km⁻¹) in the western area. Taking into account the temporal evolution of the Ekman transport (table 2), it was found that the cruise on the western Galician coast was carried out after 19 consecutive days of favorable upwelling conditions, while on the northern coast the cruise was carried out after 9 consecutive days of favorable conditions.

Autumn-winter upwelling recurrence

In this section, the recurrence of autumn-winter upwelling events is analyzed over the period 1967–2009 taking into account the mean number of days per month during favorable upwelling conditions and the probability of finding consecutive days with these favorable conditions. In addition, a

de viento proporcionados por el satélite QuikSCAT (fig. 1, círculos negros), a excepción de los eventos caracterizados en 1998 (Alvarez *et al.* 2003, Prego *et al.* 2007). El IA de los eventos de 1998 se calculó con los datos del transporte de Ekman proporcionados por el PFEL en el punto de control 43.5° N, 10.5° W. La mayoría de los eventos de otoño e invierno se produjeron en la costa oeste de Galicia con una duración entre 7 y 31 días y valores de IA desde 680 hasta 2080 m³ s⁻¹ km⁻¹. En la costa norte sólo se caracterizó, recientemente, un evento (Alvarez *et al.* 2009) que tuvo una duración de 9 días y un valor medio del IA próximo a 1700 m³ s⁻¹ km⁻¹.

Las condiciones de los eventos de afloramiento en otoño e invierno en ambas costas de Galicia se caracterizaron por medio de un ejemplo de las condiciones atmosféricas correspondientes a dos eventos particulares de afloramiento (fig. 3). El primero corresponde a noviembre de 2004 para la costa oeste (deCastro *et al.* 2008) y el segundo a febrero de 2008 para la costa norte (Alvarez *et al.* 2009). Las condiciones favorables de afloramiento se caracterizaron teniendo en cuenta el transporte de Ekman calculado a partir de los datos de viento proporcionados por el satélite QuikSCAT en cada costa; además, el transporte de Ekman se promedió durante los cuatro días anteriores a cada fecha. En la costa oeste (fig. 3a) el transporte de Ekman mostró una dirección hacia el noroeste a lo largo de la plataforma con valores máximos de intensidad (2800 m³ s⁻¹ km⁻¹) en toda la zona. Por el contrario, en la costa norte (fig. 3b) el patrón de transporte fue hacia el norte con la máxima intensidad (2600 m³ s⁻¹ km⁻¹) en la zona occidental. Según la evolución temporal del transporte de Ekman (tabla 2) durante la campaña de la costa oeste, ésta se realizó después de 19 días consecutivos de condiciones favorables de afloramiento, mientras que en la costa norte la campaña se llevó a cabo después de sólo 9 días consecutivos.

Recurrencia de los afloramientos de otoño e invierno

En esta sección se analiza la recurrencia de los eventos de afloramiento en otoño-invierno para el periodo 1967–2009, teniendo en cuenta el número medio de días por mes bajo condiciones favorables de afloramiento y la probabilidad de encontrar días consecutivos con estas condiciones favorables. Además, se lleva a cabo una comparación de la ocurrencia de eventos de afloramiento en las costas oeste y norte de Galicia según el IA diario.

La frecuencia del afloramiento se puede analizar teniendo en cuenta el número medio de días por mes bajo condiciones favorables de afloramiento (IA > 16 m³ s⁻¹ km⁻¹) entre 1967 y 2009 en los puntos de control (fig. 4a). Hay que tener en cuenta que el umbral elegido corresponde a vientos con intensidades menores que 1 m s⁻¹ para eliminar las calmas. En la costa oeste el número de días fue ligeramente superior en el punto más al sur, mientras que en la costa norte los dos puntos de control mostraron valores similares. El mayor número de días con condiciones favorables tuvo lugar en los

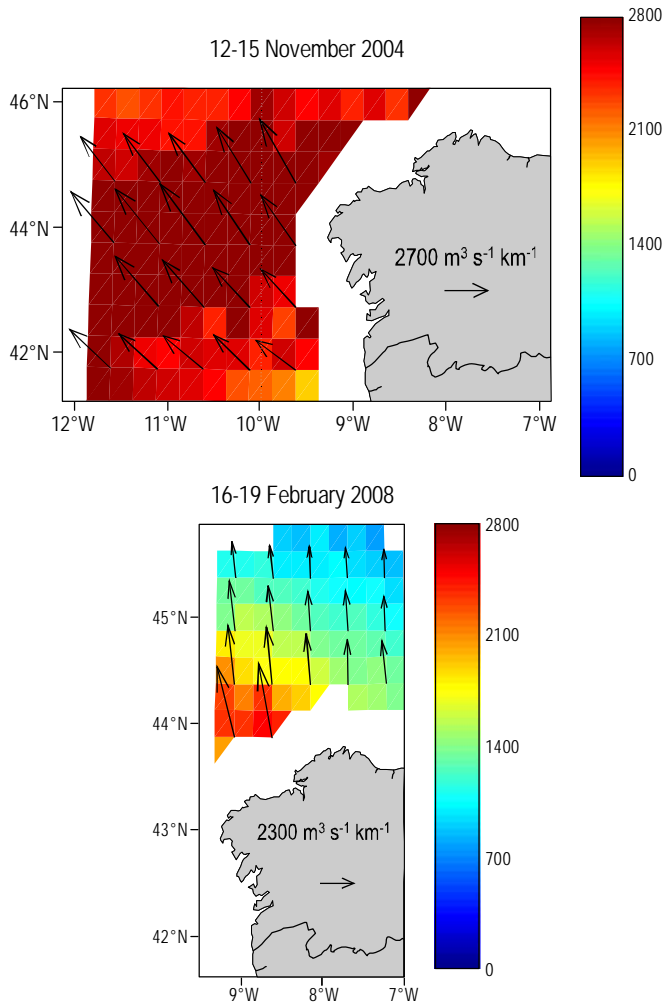


Figure 3. Ekman transport along the Galician coast calculated from QuikSCAT data corresponding to the cruises carried out on (a) 16 November 2004 and (b) 20 February 2008. Data were averaged for four days before each cruise.

Figura 3. Transporte de Ekman calculado a partir de los datos de QuikSCAT a lo largo de la costa de Galicia correspondiente a las campañas llevadas a cabo (a) el 16 de noviembre de 2004 y (b) el 20 de febrero de 2008. Los datos fueron promediados a los cuatro días anteriores a cada campaña.

comparison of the upwelling occurrence along the western and northern Galician coasts is carried out considering the daily UI.

Upwelling prevalence can be analyzed taking into account the mean number of days per month with favorable upwelling conditions ($UI > 16 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ km}^{-1}$) from 1967 to 2009 at the control points (fig. 4a). Note that the threshold ($16 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ km}^{-1}$) corresponds to winds with intensity less than 1 m s^{-1} to remove calms. Along the western coast the number of days was slightly higher at the southernmost point, while along the northern coast both control points showed similar values. The highest number of days with favorable

meses de primavera y verano en ambas costas, con valores más altos en la costa oeste (18–26 días por mes) que en la norte (12–14 días por mes). Consecuentemente, es posible corroborar que el periodo más favorable para las condiciones de afloramiento en Galicia corresponde a primavera y verano. Sin embargo, durante el otoño y el invierno, el número de días con condiciones favorables no fue despreciable: 11–18 días por mes al oeste y 8–10 días por mes al norte. Los resultados obtenidos para la costa oeste se pueden comparar con la situación observada por Cabanas y Álvarez (2005) y deCastro *et al.* (2008), quienes emplearon datos de transporte de Ekman en el océano (punto 43° N , 11° W) para un periodo de 40 años (1966–2005). Esos autores reflejaron que el mayor número de días seguidos favorables al afloramiento ocurrieron en verano, hasta 22–25 días por mes. Durante el periodo invernal también fue posible observar un número de días con condiciones favorables en ese punto (10–12 días por mes). La situación observada en la costa norte fue parecida a la obtenida por Álvarez *et al.* (2010) con dos puntos de control situados en la parte central de la zona oeste de la costa cantábrica.

La duración del afloramiento también se puede caracterizar por la probabilidad de encontrar días consecutivos con condiciones favorables de afloramiento durante su periodo más desfavorable (NDEF, fig. 4b). Las probabilidades encontradas siempre fueron menores en la costa norte. Al oeste la probabilidad aumentó hacia el sur, mientras que en la costa norte la variación entre puntos fue prácticamente despreciable. Los valores de probabilidad más altos se observaron entre 1 y 6 días en ambas costas, con valores que disminuyeron aproximadamente del 50% al 30% al oeste y del 30% al 20% en el norte.

El IA diario también se analizó desde 1967 hasta 2009 en el punto de control 43.5° N , 10.5° W (fig. 1, cuadrado negro) para comparar mejor la ocurrencia del afloramiento oeste-norte durante el periodo más desfavorable al afloramiento (NDEF). La figura 5 muestra el IA para las costas oeste (IA_O) y norte (IA_N) separado en cuadrantes. El mayor porcentaje de datos (44%) se observó en la situación correspondiente a condiciones desfavorables para el afloramiento en las dos costas (cuadrante III), indicando que esta situación era la más probable. Los valores positivos del IA_O y el IA_N (cuadrante I) corresponden a condiciones favorables al afloramiento en ambas costas, incluyendo al 26% de los datos, que fueron más favorables en la costa oeste ($IA_N/IA_O = 0.65$). El cuadrante II corresponde a condiciones favorables de afloramiento en la costa norte (IA_N positivo) y condiciones desfavorables en la costa oeste (IA_O negativo), con probabilidad baja (11%). El cuadrante IV (IA_N negativo, IA_O positivo) corresponde al patrón opuesto al cuadrante II, con una probabilidad similar (19%). Además, el ajuste lineal en ambos cuadrantes presentó valores de $IA_N/IA_O = -0.34$ y $IA_N/IA_O = -0.60$, mostrando que los valores del IA eran más importantes en la costa oeste. Esta situación contrasta con la correspondiente al periodo más favorable al afloramiento (MJJAS)

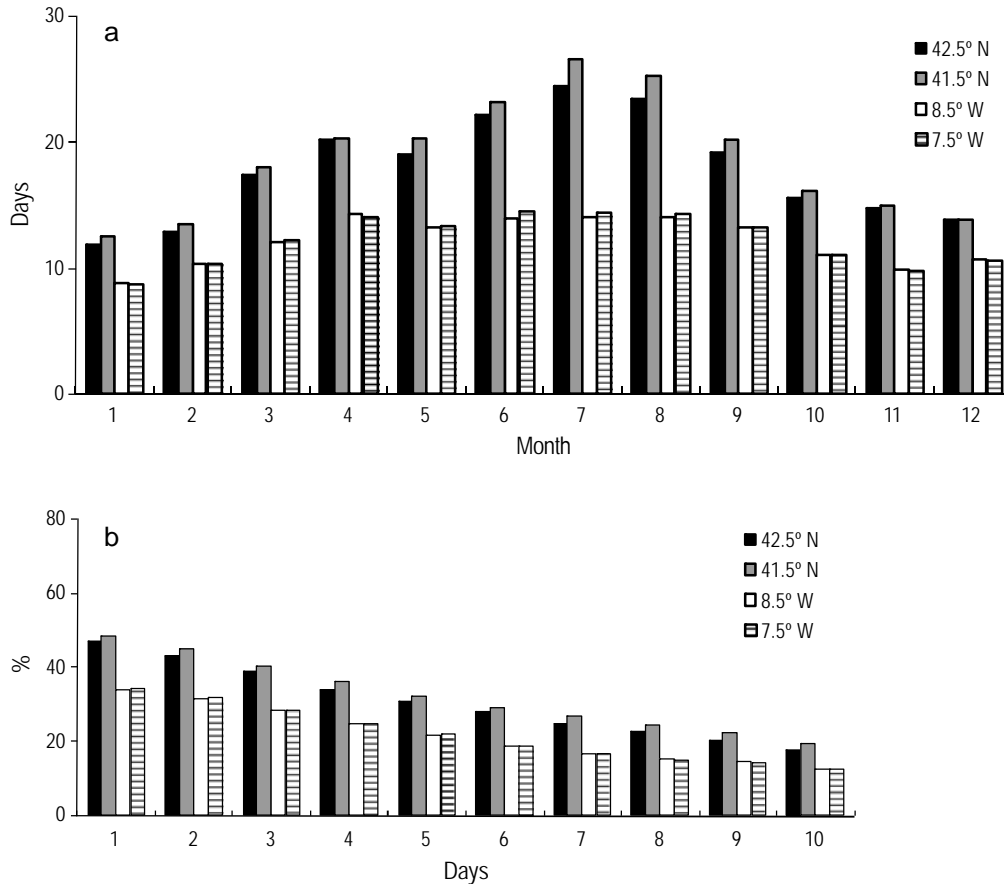


Figure 4. (a) Number of days per month with upwelling index (UI) values $>16 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ km}^{-1}$ averaged from 1967 to 2009 along the western (42.5° N , 41.5° N) and northern (8.5° W , 7.5° W) coasts of Galicia. (b) Probability of finding consecutive days under favorable upwelling conditions (UI $> 16 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ km}^{-1}$) from 1967 to 2009 during the most unfavorable upwelling period (November to February) along the western (42.5° N , 41.5° N) and northern (8.5° W , 7.5° W) coasts of Galicia. The UI was calculated from PFEL data.

Figura 4. (a) Número de días por mes con índice de afloramiento (IA) $>16 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ km}^{-1}$ promediados de 1967 a 2009 a lo largo de la costa oeste (42.5° N , 41.5° N) y la costa norte (8.5° W , 7.5° W) de Galicia. (b) Probabilidad de encontrar días consecutivos bajo condiciones favorables de afloramiento (IA $> 16 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ km}^{-1}$) entre 1967 y 2009 durante el periodo más desfavorable de afloramiento (noviembre a febrero) a lo largo de la costa oeste (42.5° N , 41.5° N) y la costa norte (8.5° W , 7.5° W) de Galicia. El IA se ha calculado a partir de los datos de PFEL.

conditions was observed during the spring and summer months on both coasts, with higher values along the western coast (18–26 days per month) than along the northern one (12–14 days per month). Taking into account these results, it is possible to corroborate that the period for most favorable upwelling conditions along the Galician coast corresponds to the spring and summer months. Nevertheless, during autumn and winter the number of days with favorable conditions was not negligible with values around 11–18 days per month along the western coast and around 8–10 days per month along the northern one. The results obtained along the western coast can be compared with the situation observed by Cabanas and Alvarez (2005) and deCastro *et al.* (2008) using Ekman transport data for the ocean point 43° N , 11° W for a 40-year period (1966–2005). The highest number of days with favorable upwelling conditions obtained at the ocean point was also observed during the summer months although

caracterizada por Ospina-Alvarez *et al.* (2011). Estos autores encontraron que durante la época típica de afloramiento la situación más probable correspondía a condiciones favorables de afloramiento a lo largo de ambas costas (44%), seguida por condiciones desfavorables también en ambas (29%).

Implicaciones oceanográficas

En esta sección, se analizan las posibles implicaciones oceanográficas de los eventos de afloramiento en otoño e invierno teniendo en cuenta las propiedades termohalinas medidas durante los eventos caracterizados entre 1998 y 2008 en las costas gallegas. En las secciones anteriores, se ha comprobado que el mecanismo que genera el afloramiento en otoño e invierno es similar al observado en primavera y verano; sin embargo, las propiedades termohalinas del agua

with higher values (22–25 days per month). During the winter period it was also possible to observe a number of days with favorable conditions at this point (10–12 days per month). The situation observed on the northern coast is also similar to the one reported by Álvarez *et al.* (2010) using two control points located in the central part of the western Cantabrian coast.

Upwelling duration can also be characterized by the probability of finding consecutive days with upwelling-favorable conditions during the most unfavorable upwelling period (NDJF, fig. 4b). Probabilities were always lower along the northern coast. On the western coast the upwelling probability increased southward, while on the northern coast the variation between points was practically negligible. The highest probability values were observed between 1 and 6 days on both coasts, with values decreasing from around 50% to 30% along the western coast and from 30% to 20% along the northern one.

The daily UI was also analyzed from 1967 to 2009 at the control point 43.5° N, 10.5° W (fig. 1, black square) to better compare upwelling occurrence along the western and northern coasts during the most unfavorable upwelling period (NDJF). Figure 5 shows the UI calculated for the western (UI_W) and northern (UI_N) coasts separated in quadrants. The highest percentage of data (44%) was observed for the situation corresponding to unfavorable upwelling conditions on both coasts (quadrant III), indicating that this situation was the most probable. Positive values of UI_W and UI_N (quadrant I) correspond to favorable upwelling conditions on both coasts, showing that 26% of data kept these conditions, which were more favorable on the western coast ($UI_N/UI_W = 0.65$). Quadrant II corresponds to favorable upwelling conditions on the northern coast (positive UI_N) and unfavorable upwelling conditions on the western one (negative UI_W) with a low probability (11%). Quadrant IV (negative UI_N , positive UI_W) corresponds to the opposite pattern observed in quadrant II with a similar probability (19%). In addition, the linear fit for both quadrants presented values of $UI_N/UI_W = -0.34$ and $UI_N/UI_W = -0.60$, showing that the UI values were more important on the western coast. This situation contrasts with the one corresponding to the most upwelling-favorable period (MJJAS) characterized by Ospina-Alvarez *et al.* (2011). They found that during the typical upwelling season the most probable situation corresponded to favorable upwelling conditions along both coasts (44%), followed by unfavorable upwelling conditions also along both coasts (29%).

Oceanographic implications

In this section, the possible oceanographic implications of autumn-winter upwelling events are analyzed considering the thermohaline properties measured during the events characterized between 1998 and 2008 along the Galician coast. In the previous sections, it has been observed that the

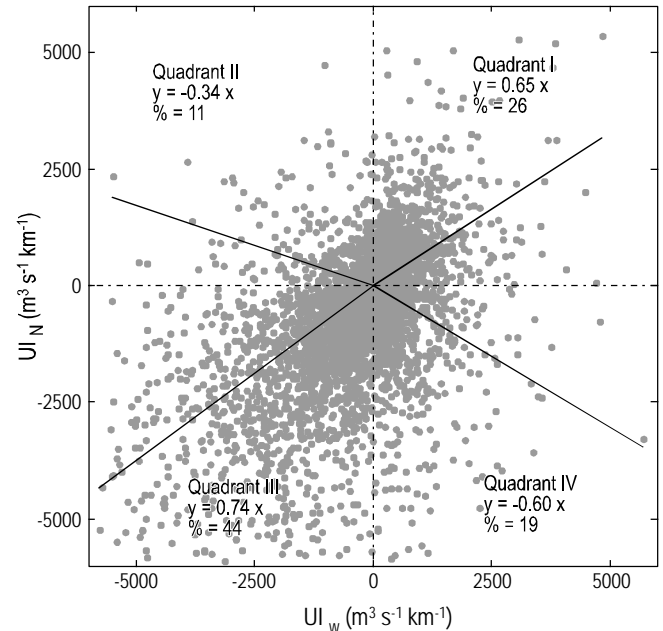


Figure 5. Daily upwelling index (UI) calculated from PFEL data for the western (UI_W) and northern (UI_N) coasts of Galicia at the control point 43.5° N, 10.5° W (fig. 1, black square) during the most upwelling-unfavorable period (November to February) from 1967 to 2009. Data are separated in quadrants, so positive values of UI_W and UI_N (quadrant I) correspond to favorable upwelling conditions on both coasts and negative values (quadrant III) correspond to unfavorable conditions. Straight lines show the linear fit for each quadrant. The percentage of total data found in each quadrant is also shown.

Figura 5. Índice de afloramiento (UI) diario calculado a partir de los datos de PFEL para la costa oeste (UI_W) y la costa norte (UI_N) de Galicia en el punto de control 43.5° N, 10.5° W (fig. 1, cuadrado negro) durante el periodo más desfavorable de afloramiento (noviembre a febrero) de 1967 a 2009. Los datos están separados en cuadrantes, por lo que los valores positivos del UI_W y UI_N (cuadrante I) corresponden a condiciones favorables de afloramiento en ambas costas y los valores negativos (cuadrante III) corresponden a condiciones desfavorables. Las líneas rectas muestran el ajuste lineal en cada cuadrante. El porcentaje total de los datos encontrados en cada cuadrante también se muestra.

aflorada pueden ser diferentes. Así, algunos autores han detectado afloramiento de agua asociada con la IPC (Alvarez *et al.* 2003, Prego *et al.* 2007), con ENACW (deCastro *et al.* 2006a, 2008; Prego *et al.* 2007; Varela *et al.* 2010) y con agua oceánica subsuperficial procedente de la plataforma (Alvarez *et al.* 2009). Para ilustrar estos diferentes tipos de agua subsuperficial, en la figura 6 se muestra el diagrama de temperatura y salinidad correspondiente a los datos medidos durante las campañas consideradas en la tabla 2. Los datos se obtuvieron de las medidas realizadas cerca del fondo en las estaciones de muestreo localizadas en la boca de cada estuario. La línea continua representa ENACW definida por Fraga (1981). El agua aflorada en el interior de la ría de Pontevedra en enero de 1998 (cuadrado negro) era más salina y más

mechanism driving the autumn-winter upwelling events is similar to the one observed in spring and summer, though the thermohaline properties of the upwelled water can be different. Thus, some authors have detected upwelled waters associated with the IPC (Alvarez *et al.* 2003, Prego *et al.* 2007), with ENACW (deCastro *et al.* 2006a, 2008; Prego *et al.* 2007; Varela *et al.* 2010), and with shelf bottom seawater (Alvarez *et al.* 2009). To exemplify this different subsurface seawater, the temperature-salinity diagram corresponding to sea data measured during the cruises considered in table 2 is shown in figure 6. Data were obtained from near-bed measurements at the sampling hydrographic stations located at the mouth of each estuary. The solid line represents ENACW defined by Fraga (1981). The upwelled water inside the Pontevedra Ria in January 1998 (black square) was saltier and warmer than ENACW, corresponding to the water driven by the IPC. Salinity and temperature measurements corresponding to the cruise carried out in February 2008 in the northern Galician rias (black triangle) showed that the upwelled water corresponded to subsurface shelf seawater not associated with ENACW or IPC. Finally, the rest of the thermohaline measurements (black circles) indicated the presence of ENACW inside the estuaries.

Taking into account these results it is possible to observe that during most of the cruises the upwelled water inside the rias corresponds to ENACW. On the contrary, IPC was only observed during one cruise (January 1998) inside the Pontevedra Ria. This situation contrasts with the conditions observed in January 2005 also in the same ria, characterized by the existence of ENACW. The presence of these different water types at the same time of the year can be explained by the IPC variability. It is a well-known fact that the IPC usually reaches the Cantabrian Sea at the beginning of every winter, yet there may be years without IPC influence (Frouin *et al.* 1990, García-Soto *et al.* 2002, Gil 2003). DeCastro *et al.* (2011) have recently analyzed the interannual variability of the IPC along the northwestern coast of the Iberian Peninsula from 1985 to 2006 using the January sea surface temperature image of each year. These authors found some years with a strong IPC along the western coast of the Iberian Peninsula and some years with an inexistent IPC. In fact, 1998 corresponded to a year with a marked IPC turning eastward around Galicia, while 2005 corresponded to a year without IPC influence. On the other hand, the presence of upwelled subsurface shelf seawater observed in the northern Galician rias in February 2008 corresponded to the only winter upwelling event observed until now in this area. Thus, to clarify why these different water types were found inside the estuaries, further research should be conducted.

Due to the different thermohaline properties of the upwelled subsurface seawater, the biogeochemical and phytoplankton patterns inside rias may suffer some changes. From a circulation viewpoint, the increase in water exchange between the ria and the ocean due to fluvial forcing, typical of the wet season, joins the north-wind forcing, typical of the

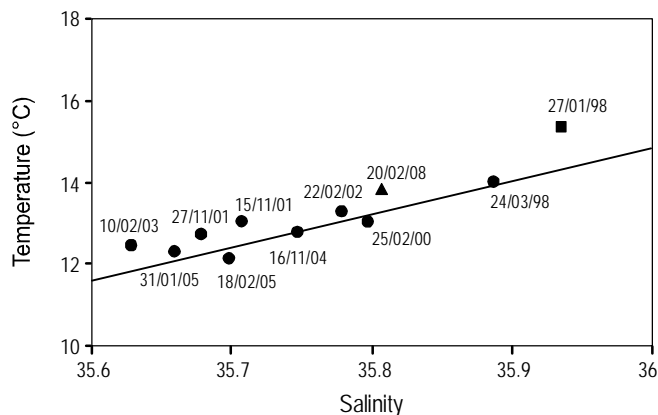


Figure 6. Temperature-salinity diagram corresponding to sea data measured during the cruises considered in table 2 at the mouth of different Galician rias. The solid line represents ENACW as defined by Fraga (1981).

Figura 6. Diagrama de temperatura y salinidad correspondiente a los datos medidos durante las campañas consideradas en la tabla 2 en la boca de diferentes rías gallegas. La línea continua representa ENACW como se define en Fraga (1981).

cálida que ENACW, correspondiendo al agua transportada por IPC. Los valores de salinidad y temperatura en la campaña de febrero 2008 en las rías del norte de Galicia (triángulo negro) indicaron que afloraba un agua subsuperficial desde la plataforma que no era ENACW o IPC. Finalmente, el resto de las medidas de las variables termohalinas (círculos negros) indicaron la presencia de ENACW dentro de las rías.

Teniendo en cuenta estos resultados, es posible señalar que durante la mayor parte de las campañas el agua aflorada en el interior de las rías corresponde a ENACW. Por el contrario, la IPC sólo se observó en una campaña (enero de 1998) dentro de la ría de Pontevedra. Esta situación contrasta con las condiciones observadas en enero de 2005 también en la misma ría, que se caracterizaron por la aparición de ENACW. La presencia de estos distintos tipos de agua en la misma época del año se puede explicar por la variabilidad de la IPC. Es un hecho bien conocido que la IPC alcanza normalmente el mar cantábrico al comienzo de cada invierno; sin embargo, puede haber años sin influencia de la IPC (Frouin *et al.* 1990, García-Soto *et al.* 2002, Gil 2003). DeCastro *et al.* (2011) analizaron recientemente la variabilidad interanual de la IPC a lo largo de la costa noroeste de la Península Ibérica desde 1985 hasta 2006 usando imágenes de la temperatura superficial del mar en enero para cada año. Estos autores encontraron años con una fuerte señal de la IPC a lo largo de la costa oeste de la Península Ibérica y otros donde la IPC no se observó. De hecho, 1998 corresponde a un año con una marcada traza de la IPC que bordea a Galicia, mientras que 2005 corresponde a un año sin influencia de la IPC. Por otra parte, el evento de afloramiento de agua subsuperficial, sin ser IPC o ENACW, en el norte de Galicia

dry season (Prego and Fraga 1992), and hence the water residence time inside rias becomes shorter than during summer upwelling events (Prego *et al.* 2007). Another consequence is the input of nutrient salts within the rias, which can vary, according to the type of subsurface seawater, from the depleted nutrient concentrations associated with the IPC to the more rich levels corresponding to ENACW. Minor changes were observed in phytoplankton populations with a uniform distribution throughout the rias as during unfavorable winter upwelling conditions (Prego *et al.* 2007). On the other hand, the entrance of ENACW inside the rias in late winter can make the coastal zone more productive, contributing to pre-bloom events. Nevertheless, these blooms can be more the result of increased environmental irradiance favored by the prevailing winds inducing upwelling than a consequence of nutrient supply (Varela *et al.* 2010). In all cases the phytoplankton presented species similar to spring blooms or to summer upwelling processes (Álvarez *et al.* 2009, Varela *et al.* 2010). To elucidate in detail all of these biogeochemical and biological processes associated with autumn-winter upwelling events, more research is advisable.

CONCLUSIONS

Taking into account most of the upwelling studies conducted along the Galician coast over the last decades, it is possible to conclude that upwelling events are a frequent phenomenon during the spring and summer months. In fact, the analysis of the UI for the period 1967–2009 showed a marked annual cycle with favorable upwelling conditions in spring and summer along the western coast but only in summer along the northern one. The maximum UI value was observed in July on both coasts. During the winter season, the EA pattern explained the main variance of the UI on both coasts, while during summer the UI variability was explained in terms of the EA pattern along the northern coast and in terms of the EA/WR pattern along the western coast.

The highest mean number of days with upwelling-favorable conditions per month was observed during the spring and summer months on both coasts, with higher values along the western coast than along the northern one. Nevertheless, during autumn and winter the number of upwelling-favorable days was not negligible, showing the possibility of observing upwelling events during this period. In fact, during the most unfavorable period (November to February) it was observed that the most probable situation corresponded to unfavorable upwelling conditions along both coasts followed by favorable upwelling conditions also along both coasts. Thus, autumn-winter upwelling events cannot be considered isolated episodes, i.e., out of season, and they should be studied under favorable conditions independently of the season.

ACKNOWLEDGEMENTS

This article was partially supported by the Interministerial Commission for Science and Technology (CICYT,

(febrero de 2008) es el único caso de afloramiento invernal observado en esa área. Por lo tanto, se deberían llevar a cabo más investigaciones para aclarar por qué estos distintos tipos de agua se encontraron dentro de los estuarios.

Debido a las diferentes propiedades termohalinas del agua subsuperficial aflorada, los patrones biogeoquímicos y abundancias de fitoplancton dentro de las rias pueden sufrir algunos cambios. Desde un punto de vista de la circulación, el aumento del intercambio de agua entre la ría y el océano debido a un forzamiento fluvial, típico de la estación húmeda, se suma al forzamiento del viento del norte, típico de la estación seca (Prego y Fraga 1992). Así, el tiempo de residencia del agua dentro de las rias se hace más corto que durante los eventos de afloramiento en verano (Prego *et al.* 2007). Otra consecuencia es el aporte de sales nutrientes al interior de las rias, que puede variar, según el tipo de agua aflorada, desde un agua pobre en nutrientes asociada con la IPC hasta concentraciones altas correspondientes a ENACW. En las poblaciones de fitoplancton se observaron cambios menores con una distribución uniforme durante el invierno (Prego *et al.* 2007). Por otro lado, una entrada de ENACW en el interior de las rias a finales del invierno puede hacer que la zona costera se vuelva más productiva, contribuyendo a un afloramiento previo de fitoplancton. Sin embargo, estos eventos pueden ser más el resultado de un aumento de la radiación ambiental favorecido por los vientos dominantes favorables al afloramiento que una consecuencia del aporte de nutrientes, ya de por sí abundante tras la mezcla invernal (Varela *et al.* 2010). En todos los casos el fitoplancton presentó especies similares a los típicos eventos correspondientes de primavera o a los procesos de afloramiento de verano (Álvarez *et al.* 2009, Varela *et al.* 2010). Se recomienda mayor investigación para elucidar a detalle todos estos procesos biogeoquímicos y biológicos asociados con los eventos de afloramiento de otoño e invierno.

CONCLUSIONES

La mayoría de los artículos publicados sobre el afloramiento en la costa de Galicia inciden en que los eventos de afloramiento son un fenómeno frecuente durante los meses de primavera y verano. A partir del análisis del IA durante el periodo 1967–2009, se observó un marcado ciclo anual de condiciones favorables al afloramiento durante la primavera y el verano para la costa oeste gallega, que se reduce a únicamente el verano para la costa norte. El valor máximo del IA ocurre en julio para ambas costas. Durante la temporada de invierno, el patrón EA permite explicar la principal variabilidad del IA en ambas costas, mientras que durante el verano ha de referirse en términos del patrón EA para la costa norte y del patrón EA/WR para la costa oeste de Galicia.

El número promedio de días seguidos con condiciones favorables al afloramiento tiene lugar durante la primavera y el verano en ambas costas, siendo superior en la costa oeste que en la norte; no obstante, durante el otoño y el invierno el número de días favorables al afloramiento permite también la

Spain, project “Influence of meteorological forcing, land geochemistry and estuarine zone in the hydrodynamic, biogeochemical cycle of trace metal and rare earth and plankton transport in the northern Galician rias (NW Spain)”, ref. CTM2007-62546-C03/MAR). The first author acknowledges the support by the Ramon y Cajal program. We thank the kind and useful comments of JL Pelegrí (ICM-CSIC) and two anonymous reviewers that helped to ameliorate our manuscript.

REFERENCES

- Alvarez I, deCastro M, Prego R, Gómez-Gesteira M. 2003. Hydrographic characterization of a winter-upwelling event in the Ria of Pontevedra (NW Spain). *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 56: 869–876.
- Alvarez I, deCastro M, Gómez-Gesteira M, Prego R. 2005. Inter- and intra-annual analysis of the salinity and temperature evolution in the Galician Rías Baixas-ocean boundary (northwest Spain). *J. Geophys. Res. C*, 110, C04008, doi:10.1029/2004JC002504.
- Alvarez I, Gómez-Gesteira M, deCastro M, Dias JM. 2008a. Spatio-temporal evolution of upwelling regime along the western coast of the Iberian Peninsula. *J. Geophys. Res. C*, 113, C07020, doi:10.1029/2008JC004744.
- Alvarez I, Gómez-Gesteira M, deCastro M, Novoa EM. 2008b. Ekman transport along the Galician coast (NW, Spain) calculated from QuikSCAT winds. *J. Mar. Sys.* 72: 101–115.
- Alvarez I, Ospina-Alvarez N, Pazos Y, deCastro M, Bernardez P, Campos MJ, Gómez-Gesteira JL, Alvarez-Ossorio MT, Varela M, Gómez-Gesteira M, Prego R. 2009. A winter upwelling event in the northern Galician rias: frequency and oceanographic implications. *Est. Coast. Shelf Sci.*, 82: 573–582, doi:10.1016/j.ecss.2009.02.023.
- Alvarez I, Gómez-Gesteira M, deCastro M, Gómez-Gesteira JL, Dias JM. 2010. Summer upwelling frequency along the western Cantabrian coast from 1967 to 2008. *J. Mar. Sys.* 79: 218–226.
- Alvarez-Salgado XA, Rosón G, Pérez FF, Pazos Y. 1993. Hydrographic variability off the Rías Baixas (NW Spain) during the upwelling season. *J. Geophys. Res. C* 98: 14447–14455.
- Alvarez-Salgado XA, Gago G, Míguez BM, Gilcoto M, Pérez FF. 2000. Surface waters of the NW Iberian Margin: upwelling on the shelf versus outwelling of upwelled waters from the Rías Baixas. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 51: 821–837.
- Barton ED, Inall ME, Sherwin TJ, Torres R. 2001. Vertical structure, turbulent mixing and fluxes during Lagrangian observations of an upwelling filament system off Northwest Iberia. *Prog. Oceanogr.* 51: 249–267.
- Bakun A. 1973. Coastal upwelling indexes, west coast of North America, 1946–71. NOAA Tech. Rep. NMF 671, 103 pp.
- Blanton JO, Atkinson LP, Castillejo F, Montero AL. 1984. Coastal upwelling of the Rías Bajas, Galicia, northwest Spain. I. Hydrographic studies. *Rapp. P.V. Reun. Cons. Int. Explor. Mer.* 183: 179–190.
- Blanton JO, Tenore KR, Castillejo F, Atkinson LP, Schwing FB, Lavin A. 1987. The relationship of upwelling to mussel production in the rias on the western coast of Spain. *J. Mar. Res.* 45: 497–511.
- Borja A, Uriarte A, Valencia V, Motos L, Uriarte A. 1996. Relationships between anchovy (*Engraulis encrasicolus* L) recruitment and the environment in the Bay of Biscay. *Sci. Mar.* 60: 179–192.
- Cabanas JM, Alvarez I. 2005. Ekman transport patterns in the area close to the Galician coast (NW Spain). *J. Atmos. Oceanogr. Sci.* 10: 325–341.
- deCastro M, Gómez-Gesteira M, Alvarez I, Prego. 2004. Negative estuarine circulation in the Ria of Pontevedra (NW Spain). *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 60: 301–312.
- deCastro M, Dale AW, Gómez-Gesteira M, Prego RM, Alvarez I. 2006a. Hydrographic and atmospheric analysis of an autumnal upwelling event in the Ria of Vigo (NW Iberian Peninsula). *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 68: 529–537, doi:10.1016/j.ecss.2006.03.004.
- deCastro M, Lorenzo N, Taboada JJ, Sarmiento M, Alvarez I, Gómez-Gesteira M. 2006b. Teleconnection patterns influence on precipitation variability and on river flow regimes in the Miño River basin (NW Iberian Peninsula). *Clim. Res.* 32: 63–73.
- deCastro M, Gómez-Gesteira M, Alvarez I, Cabanas JM, Prego R. 2008. Characterization of fall-winter upwelling recurrence along the Galician western coast (NW Spain) from 2000 to 2005: dependence on atmospheric forcing. *J. Mar. Syst.* 72: 45–148, doi:10.1016/j.jmarsys.2007.04.005.
- deCastro M, Gomez-Gesteira M, Alvarez I, Crespo AJC. 2011. Atmospheric modes influence on Iberian Poleward Current variability. *Cont. Shelf Res.* 31:425-432.
- Doval MD, Nogueira E, Pérez FF. 1998. Spatio-temporal variability of the thermohaline and biogeochemical properties and dissolved carbon in a coastal embayment affected by upwelling: the Ria of Vigo (NW Spain). *J. Mar. Syst.* 14: 135–150.
- Fiuza AFG. 1984. Hidrologia e dinâmica das águas costeiras de Portugal. PhD thesis, University of Lisbon.
- Fraga F. 1981. Upwelling off the Galician coast, northwest Spain. In: Richardson FA (ed.), Coastal Upwelling. American Geophysical Union, Washington., pp. 176–182.
- Frouin R, Fiuza AFG, Ambar I, Boyd TJ. 1990. Observations of a poleward surface current off the coasts of Portugal and Spain during winter. *J. Geophys. Res.* 95: 679–691.
- García-Soto C, Pingree RD, Valdes L. 2002. Navidad development in the southern Bay of Biscay: climate change and swoddy

AGRADECIMIENTOS

Este artículo ha sido parcialmente financiado por la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología (CICYT, España, proyecto “Influence of meteorological forcing, land geochemistry and estuarine zone in the hydrodynamic, biogeochemical cycle of trace metal and rare earth and plankton transport in the Northern Galician Rias (NW Spain)”, ref. CTM2007-62546-C03/MAR). La primera autora agradece el apoyo proporcionado por el programa Ramon y Cajal. Damos las gracias a JL Pelegrí (ICM-CSIC) por sus amables y útiles comentarios al igual que a dos revisores anónimos que contribuyeron a mejorar nuestro manuscrito.

- structure from remote sensing and *in situ* measurements. *J. Geophys. Res.* 107, C8, doi:10.1029/2001JC001012.
- Gil J. 2003. Changes in the pattern of water masses resulting from a poleward slope current in the Cantabrian Sea (Bay of Biscay). *Estuar. Coast. Shelf. Sci.* 57: 1139–1149.
- Gómez-Gesteira M, Moreira C, Alvarez I, deCastro M. 2006. Ekman transport along the Galician coast (NW Spain) calculated from forecasted winds. *J. Geophys. Res.* C, 111, C10005, doi: 10.1029/2005JC003331.
- Koutsikopoulos C, Le Cann B. 1996. Physical processes and hydrological structures related to the Bay of Biscay anchovy. *Sci. Mar.* 2: 9–19.
- Lorenzo MN, Taboada JJ. 2005. Influences of atmospheric variability on freshwater input in Galician rias in winter. *J. Atmos. Ocean Sci.* 10: 377–387.
- Margalef R, Andreu B. 1958. Componente vertical de los movimientos del agua en la ría de Vigo y su posible relación con la entrada de sardina. *Invest. Pesq.* 11:105–126.
- McClain CR, Chao S, Atkinson LP, Blanton JO, Castillejo F. 1986. Wind driven upwelling in the vicinity of Cape Finisterre, Spain. *J. Geophys. Res.* C 91: 8470–8486.
- Molina R. 1972. Contribución al estudio del “upwelling” frente a la costa noroccidental de la Península Ibérica. *Bol. Inst. Esp. Oceanogr.* 152: 1–39.
- Nogueira E, Pérez FF, Ríos AF. 1997a. Seasonal patterns and long-term trends in an estuarine upwelling ecosystem (Ría of Vigo, Spain). *Estuar. Coast. Shelf. Sci.* 44: 285–300.
- Nogueira E, Pérez FF, Ríos AF. 1997b. Modelling thermohaline properties in an estuarine upwelling ecosystem (Ría de Vigo: NW Spain) using box-Jenkins transfer function models. *Estuar. Coast. Shelf. Sci.* 44: 685–702.
- Nykjaer L, Van Camp L. 1994. Seasonal and interannual variability of coastal upwelling along northwest Africa and Portugal from 1981 to 1991. *J. Geophys. Res.* C 99(7): 14197–14207.
- Ospina-Alvarez N, Prego R, Alvarez I, deCastro M, Alvarez-Ossorio MT, Pazos Y, Campos MJ, Bernardez P, García-Soto C, Gómez-Gesteira M, Varela M. 2011. Oceanographical patterns during a summer upwelling-downwelling event in the northern Galician rias: comparison with the whole ria system (NW Iberian Peninsula). *Cont. Shelf. Res.* 30: 1362–1372.
- Pardo PC, Gilcoto M, Pérez FF. 2001. Short-time scale coupling between thermohaline and meteorological forcing in the Ría de Pontevedra. *Sci. Mar.* 65: 229–240.
- Penabad E, Alvarez I, Balseiro CF, deCastro M, Gómez B, Pérez-Muñuzuri V, Gómez-Gesteira M. 2008. Comparative analysis between operational weather prediction models and QuikSCAT wind data near the Galician coast. *J. Mar. Syst.* 72: 256–270.
- Pérez FF, Ríos AF, King BA, Pollard RT. 1995. Decadal changes of the θ -S relationship of the Eastern North Atlantic Central Water. *Deep-Sea Res.* 42: 1849–1864.
- Prego R. 1993a. Biogeochemical pathways of phosphate in a Galician ria (northwestern Iberian Peninsula). *Estuar. Coast. Shelf. Sci.* 37: 437–451.
- Prego R. 1993b. General aspects of carbon biogeochemistry in the ria of Vigo (NW Spain). *Geochim. Cosmochim. Acta* 57: 2041–2052.
- Prego R. 1994. Nitrogen interchanges generated by biogeochemical processes in a Galician ria. *Mar. Chem.* 45: 167–176.
- Prego R, Fraga F. 1992. A simple model to calculate the residual flows in a Spanish ria. Hydrographic consequences in the ria of Vigo. *Estuar. Coast. Shelf. Sci.* 34: 603–615.
- Prego R, Bao R. 1997. Upwelling influence on the Galician coast: silicate in shelf water and underlying surface sediments. *Cont. Shelf. Res.* 17: 307–318.
- Prego R, Varela M. 1998. Hydrography of the Artabro Gulf in summer: western coastal limit of Cantabrian seawater and wind-induced upwelling at Prior Cape. *Oceanol. Acta* 21: 145–155.
- Prego R, Bao R, Howland R. 1995. The biogeochemical cycling of dissolved silicate in a Galician ria. *Ophelia* 42: 301–318.
- Prego R, Barciela C, Varela M. 1999. Nutrient dynamics in the Galician coastal area (northwestern Iberian Peninsula): do the Rias Bajas receive more nutrient salts than the Rias Altas? *Cont. Shelf. Res.* 19: 317–334.
- Prego R, deCastro M, Gómez-Gesteira M, Taboada JJ, Montero P, Pérez-Villar V, Dale A. 2001. Micro-scale hydrography of the Pontevedra Ria (NW Spain). *J. Geophys. Res.* C 106(9): 19845–19857.
- Prego R, Guzmán-Zuñiga D, Varela M, deCastro M, Gómez-Gesteira M. 2007. Consequences of winter upwelling events on biogeochemical and phytoplankton patterns in a western Galician ria (NW Iberian Peninsula). *Estuar. Coast. Shelf. Sci.* 73: 409–422.
- Ríos AF, Pérez FF, Alvarez-Salgado XA, Figueiras FG. 1992. Water masses in the upper and middle North Atlantic Ocean east of the Azores. *Deep-Sea Res.* 39: 645–658.
- Rodríguez-Puebla C, Encinas AH, Nieto S, Garmendia J. 1998. Spatial and temporal patterns of annual precipitation variability over the Iberian Peninsula. *Int. J. Climatol.* 18: 299–316.
- Roson G, Pérez FF, Álvarez-Salgado XA, Figueiras FG. 1995. Variation of thermohaline and chemical properties in an estuarine upwelling ecosystem: Ría of Arousa. I. Time evolution. *Estuar. Coast. Shelf. Sci.* 41: 195–213.
- Santos AMP, Peliz A, Dubert J, Oliveira PB, Angelico MM, Re P. 2004. Impact of a winter upwelling event on the distribution and transport of sardine (*Sardina pilchardus*) eggs and larvae off western Iberia: a retention mechanism. *Cont. Shelf. Res.* 24: 149–165.
- Tenore KR, Cal RM, Hanson RB, López-Jamar E, Santiago G, Tietjen JM. 1984. Coastal upwelling off the Rias Bajas, Galicia, northwest Spain. II. Benthic studies. *Rapp. P.V. Reun. Cons. Int. Explor. Mer.* 183, 91–100.
- Tenore KR, Alonso-Noval M, Alvarez-Ossorio M, Atkinson LP, Cabanas JM, Cal RM, Campos HJ, Castillejo F, Chesney EJ, Gonzalez N, Hanson RB, McClain CR, Miranda A, Roman MR, Sanchez J, Santiago G, Valdes L, Varela M, Yoder J. 1995. Fisheries and oceanography off Galicia, NW Spain: Mesoscale spatial and temporal changes in physical processes and resultant patterns of biological productivity. *J. Geophys. Res.* 100:10943–10966.
- Torres R, Barton ED, Miller P, Fanjul E. 2003. Spatial patterns of wind and sea surface temperature in the Galician upwelling region. *J. Geophys. Res.* 108: 3130–3143, doi:10.1029/2002JC001361.
- Varela M, Prego R, Pazos Y, Moróño A. 2005. Influence of upwelling and river runoff interaction on phytoplankton assemblages in a middle Galician ria and comparison with northern and southern rias (NW Iberian Peninsula). *Estuar. Coast. Shelf. Sci.* 64: 721–737.
- Varela M, Alvarez-Ossorio M, Bode A, Prego R, Bernardez P, García-Soto C. 2010. The effects of a winter upwelling on biogeochemical and planktonic components in an area close to the Galician upwelling core: the Sound of Corcubion (NW Spain). *J. Sea Res.* 64:260–272.
- Wooster WS, Bakun A, McClain DR. 1976. The seasonal upwelling cycle along the eastern boundary of the North Atlantic. *J. Mar. Res.* 34: 131–141.

Received May 2010,
received in revised form November 2010,
accepted January 2011.