

Variability of nutrients and chlorophyll *a* in Ancão Inlet during a spring tidal cycle in April 2009

Variabilidad de nutrientes y clorofila *a* en la bocana de Ancão durante un ciclo de mareas vivas en abril de 2009

P Alcântara, A Cravo*, J Jacob

Centro de Investigação Marinha e Ambiental (CIMA), FCT, Universidade do Algarve, Campus de Gambelas, 8005-139 Faro, Portugal.

* Corresponding author. E-mail: acravo@ualg.pt

ABSTRACT. São Luis or Ancão Inlet is the most western of the six inlets of the Ria Formosa lagoon, in southern Portugal. This inlet contributes relatively little to the water volume exchange over a tidal cycle (~10%). Temperature, salinity, pH, dissolved oxygen, and chlorophyll *a* and nutrient concentrations were measured hourly at the surface, at an intermediate level, and near the bottom over a complete spring tidal cycle, at a sampling point in the middle of the inlet. Current velocity was also measured hourly over the entire cross-section of the inlet using an acoustic Doppler current meter. From these parameters, the flow rate and the transport of nutrients and chlorophyll *a* were calculated and integrated over the complete tidal cycle providing the net transport. The results show that this is a well-mixed dynamic inlet where, during spring tide, the tidal signal is evident particularly for the nutrient and chlorophyll *a* concentrations. The nutrient concentrations were low (almost depleted), while the chlorophyll *a* concentrations were high (4–6 mg m⁻³). The estimated transports through Ancão Inlet revealed that there was a net import of chlorophyll *a*, nitrate, and phosphate to the Ria Formosa lagoon, while silicate was exported to the adjacent coastal area.

Key words: coastal lagoon, Ria Formosa, Ancão Inlet, nutrients, chlorophyll *a*, transports.

RESUMEN. La bocana de São Luis o de Ancão es la más occidental de las seis bocanas de la laguna de Ria Formosa, en el sur de Portugal. Esta bocana contribuye relativamente poco al intercambio del volumen de agua durante un ciclo mareal (~10%). La temperatura, la salinidad, el pH, el oxígeno disuelto y la concentración de clorofila *a* y de nutrientes se midieron cada hora durante un ciclo completo de mareas vivas, en la superficie, en un nivel intermedio y cerca del fondo, desde un punto central en medio de la bocana. La velocidad de las corrientes también se midió cada hora en toda la sección transversal de la bocana con un perfilador acústico Doppler. A partir de estos parámetros, la velocidad del flujo y el transporte de nutrientes y de clorofila *a* se calcularon e integraron a lo largo del ciclo mareal para obtener el transporte neto. Los resultados muestran que ésta es una bocana dinámica y bien mezclada, donde la señal de las mareas vivas es evidente sobre todo en el caso de las concentraciones de nutrientes y clorofila *a*. Las concentraciones de nutrientes fueron bajas (casi agotadas), mientras que las de clorofila *a* fueron altas (4–6 mg m⁻³). Los transportes estimados indicaron que hubo una importación neta de clorofila *a*, nitrato y fosfato a la laguna, y una exportación de silicato a la zona costera adyacente.

Palabras clave: laguna costera, Ria Formosa, bocana de Ancão, nutrientes, clorofila *a*, transportes.

INTRODUCTION

Ria Formosa (36°58'–37°3' N, 8°2'–7°32' W; fig. 1) is a shallow lagoon system located in the south of Portugal. It has an area of approximately 80 km², a mean water depth of 3.5 m, a length of 55 km in E–W direction, and a maximum width of 6 km in N–S direction.

Tides are semi-diurnal and the tidal range varies from 0.5 to 3.5 m (mesotidal). There is great daily water renewal, varying from 80 × 10⁶ m³ in neap tides to 150 × 10⁶ m³ in spring tides (Neves *et al.* 1994). The Ria Formosa lagoon is a complex inlet-barrier island system, with six inlets that can be divided into three hydrodynamically different sub-embayments as described by several authors (Salles 2001, Vila-Concejo *et al.* 2002, Bertin *et al.* 2009): (1) the western

INTRODUCCIÓN

Ría Formosa (36°58'–37°3' N, 8°2'–7°32' O; fig. 1) es un sistema lagunar somero localizado en el sur de Portugal. Tiene un área de aproximadamente 80 km², una profundidad media de 3.5 m, una longitud de 55 km en dirección E–O y un ancho máximo de 6 km en dirección N–S.

Las mareas son semidiurnas y la amplitud de la marea varía de 0.5 a 3.5 m (mesomareal). Hay gran renovación diaria de agua, entre 80 × 10⁶ m³ durante mareas muertas y 150 × 10⁶ m³ durante mareas vivas (Neves *et al.* 1994). La laguna de Ria Formosa es un sistema complejo de bocanas e islas de barrera, con seis bocanas que pueden dividirse en tres sub-bahías hidrodinámicamente diferentes según lo descrito por varios autores (Salles 2001, Vila-Concejo *et al.* 2002,

sub-embayment that includes the Ancão, Faro-Olhão, and Armonia inlets; (2) the central sub-embayment that includes the Fuzeta and Tavira inlets; and (3) the eastern sub-embayment that includes the Lacém Inlet.

Due to its location, importance for the regional economy, and natural park status, Ria Formosa has been the focus of many studies in several scientific areas, some of them interdisciplinary and integrated in international projects (Williams *et al.* 1999).

Numerical modelling and field work have been conducted to establish the exchanges of water between the lagoon and the sea (Salles 2001, Martins *et al.* 2003, Dias *et al.* 2009, Pacheco *et al.* 2010). Dias *et al.* (2009) showed the dependence of water exchanges on the position and morphological configuration of the inlets.

Regarding the water quality of Ria Formosa, it has been intensively studied from several viewpoints (including nutrient dynamics), although always in limited areas of particular interest rather than being considered as a global system. In this system, the natural biogeochemical cycles are mainly regulated by tidal exchanges at the ocean boundaries. Consequently, the concentrations of nutrients in the lagoon strongly depend on the variability in the quality of the adjacent coastal waters. The existing studies on the importance of lagoon-sea water exchanges in Ria Formosa are based only on water samples gathered at a few fixed stations inside the lagoon and do not consider the water mass transports (Newton *et al.* 2003, Falcão and Vale 2003, Newton and Mudge 2005). Until spring 2007, no study had determined the role of nutrient and chlorophyll *a* exchanges through the Ria Formosa inlets. Accordingly, two preliminary campaigns were conducted in Ancão Inlet during neap and spring tidal conditions in April and June 2007, respectively. This small inlet contributes approximately 10% of the water volume exchanged over a tidal cycle. The two surveys covered different hydrodynamic, meteorological, and other environmental conditions. The data obtained were used to compute the net mass flow of nutrients and chlorophyll *a*, revealing that there was a net outflow of water from Ria Formosa to the ocean during an entire tidal cycle for both spring and neap tides. The main objective of the present work was to provide the net mass transport of nutrients and chlorophyll *a* through Ancão Inlet over a spring tidal cycle in April 2009.

MATERIAL AND METHODS

Field site and campaigns

Ancão or São Luis Inlet, the most western inlet of Ria Formosa (fig. 2), was artificially opened in 1997 to improve water circulation between the adjacent ocean and the lagoon. It is a small inlet, with an average width of 300 m, and is ebb-dominated, showing morphologic characteristics of both a tidal and wave-dominated inlet with cyclic eastward migration behavior (Vila-Concejo *et al.* 2004).

Bertin *et al.* 2009): (1) la sub-bahía occidental que incluye las bocanas de Ancão, Faro-Olhão y Armonia; (2) la sub-bahía central que incluye las bocanas de Fuzeta y Tavira; y (3) la sub-bahía oriental que incluye la bocana de Lacém.

Debido a su ubicación, su importancia para la economía regional y su estatus de parque natural, la laguna de Ria Formosa ha sido objeto de muchos estudios en varios campos científicos, algunos de ellos interdisciplinarios e incorporados en proyectos internacionales (Williams *et al.* 1999).

Se han realizado modelizaciones numéricas y trabajo de campo para determinar el intercambio de agua entre la laguna y el mar (Salles 2001, Martins *et al.* 2003, Dias *et al.* 2009, Pacheco *et al.* 2010). Dias *et al.* (2009) mostraron que los intercambios de agua dependen de la posición y configuración morfológica de las bocanas.

La calidad del agua de la laguna de Ria Formosa ha sido estudiada intensamente desde varios puntos de vista (incluyendo la dinámica de nutrientes), aunque siempre en áreas limitadas de particular interés en vez de ser considerada como un sistema global. En este sistema, los ciclos biogeoquímicos naturales son regulados principalmente por el intercambio marea en los límites del océano. En consecuencia, las concentraciones de nutrientes en la laguna dependen en gran medida de la variabilidad en la calidad de las aguas costeras adyacentes. Los estudios existentes sobre la importancia del intercambio de agua entre la laguna y el mar en el sistema de Ria Formosa se basan únicamente en muestras de agua tomadas en unas cuantas estaciones fijas dentro de la laguna y no consideran los transportes de agua (Newton *et al.* 2003, Falcão y Vale 2003, Newton y Mudge 2005). Hasta la primavera de 2007, ningún estudio había determinado el papel del intercambio de nutrientes y clorofila *a* a través de las bocanas de la laguna. Por lo tanto, en abril y junio de 2007 se realizaron dos campañas preliminares en la bocana de Ancão durante marea muerta y marea viva, respectivamente. Esta bocana pequeña contribuye aproximadamente el 10% del volumen de agua intercambiado durante un ciclo marea. Las dos campañas abordaron diferentes condiciones hidrodinámicas y meteorológicas, así como otras condiciones ambientales. Los datos obtenidos se utilizaron para estimar el flujo neto de nutrientes y clorofila *a*, e indicaron que hubo un transporte neto de agua de la laguna al océano durante un ciclo marea completo de tanto marea viva como muerta. El objetivo principal de este trabajo fue determinar el transporte neto de nutrientes y clorofila *a* a través de la bocana de Ancão durante un ciclo de marea viva en abril de 2009.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio de estudio y campañas

La bocana de Ancão o São Luis, la bocana más occidental de la laguna de Ria Formosa (fig. 2), fue abierta artificialmente en 1997 para mejorar la circulación de agua entre el océano adyacente y la laguna. Es una bocana pequeña, con un



Figure 1. Location of the Ria Formosa lagoon and its main inlets. Ancão Inlet is indicated by the arrow.

Figura 1. Localización del sistema lagunar de Ría Formosa y sus principales bocanas. La bocana de Ancão se indica con la flecha.

According to Salles (2001), the tidal prism at Ancão Inlet varies widely as a function of changes in the inlet's cross-sectional area, ranging from 8% to 12.5% of the total tidal prism of the western sub-embayment. This inlet is relatively well known in terms of hydrodynamic conditions, water circulation, morphodynamic conditions, and sediment transport, but very limited in chemical information since only two surveys have been conducted previously and the results are being treated and prepared to be published by the same authors of the present study.

One field experiment over a complete tidal cycle under spring tide conditions was carried out at Ancão Inlet on 27 April 2009. The field work included current measurements along the inlet cross-section (fig. 2), as well as physical and chemical measurements *in situ* and water sampling at several depths at one station in the center of this cross-section (location A, fig. 2). Its location in the center of the cross-section was selected since the results of the previous surveys conducted in 2007 did not show significant differences horizontally at three sampling sites along the cross-section. The number of sampling depths depended on the water level, which in turn was a function of the tide phase. Whenever possible the measurements were made at three levels: near the surface (1 m below the surface), at an intermediate depth, and near the bottom (1 m above the bottom).

A SonTek acoustic Doppler current meter (ADCM) was used to measure and record current velocity profiles along the cross-section every hour during the entire tidal cycle (~12.5 h). In order to estimate the flow on the intertidal side banks during post-processing, the location of the shoreline in both margins of the surveyed cross-section (transect) was determined and registered. Additionally, at the central point of the cross-section, water samples were collected

ancho promedio de 300 m, y es dominada por el reflujó, mostrando características morfológicas de una bocana dominada tanto por las mareas como las olas con un patrón cíclico de migración hacia el este (Vila-Concejo *et al.* 2004).

Según Salles (2001), el prisma mareal en la bocana de Ancão varía ampliamente en función de los cambios en la sección transversal de la bocana, de 8% a 12.5% del prisma mareal total de la sub-bahía occidental. Esta bocana es relativamente bien conocida en cuanto a las condiciones hidrodinámicas, la circulación del agua, las condiciones morfodinámicas y el transporte de sedimento, pero existe poca información química ya que sólo se han realizado dos estudios y los resultados se están procesando para ser publicados por los mismos autores del presente trabajo.

Se realizó un experimento de campo durante un ciclo completo de marea viva en la bocana de Ancão el 27 de abril de 2009. Durante el trabajo de campo se midieron las corrientes en la sección transversal de la bocana (fig. 2); además, se realizaron mediciones físicas y químicas *in situ* y se tomaron muestras de agua en varias profundidades en un punto central de la sección transversal (localización A, fig. 2). Su localización en el medio de la sección transversal se seleccionó con base en que los resultados de los estudios previos realizados en 2007 no mostraron diferencias horizontales en tres sitios de muestreo en la sección transversal. El número de profundidades de muestreo dependió del nivel del agua, que a su vez dependió de las fases de la marea. Siempre que fue posible las mediciones se hicieron en tres niveles: cerca de la superficie (1 m por debajo de la superficie), a una profundidad intermedia y cerca del fondo (1 m por encima del fondo).

Se usó un perfilador acústico Doppler (ADCM, marca SonTek) para medir y registrar los perfiles de velocidad de las corrientes en la sección transversal cada hora durante un ciclo mareal completo (~12.5 h). A fin de estimar el flujo en

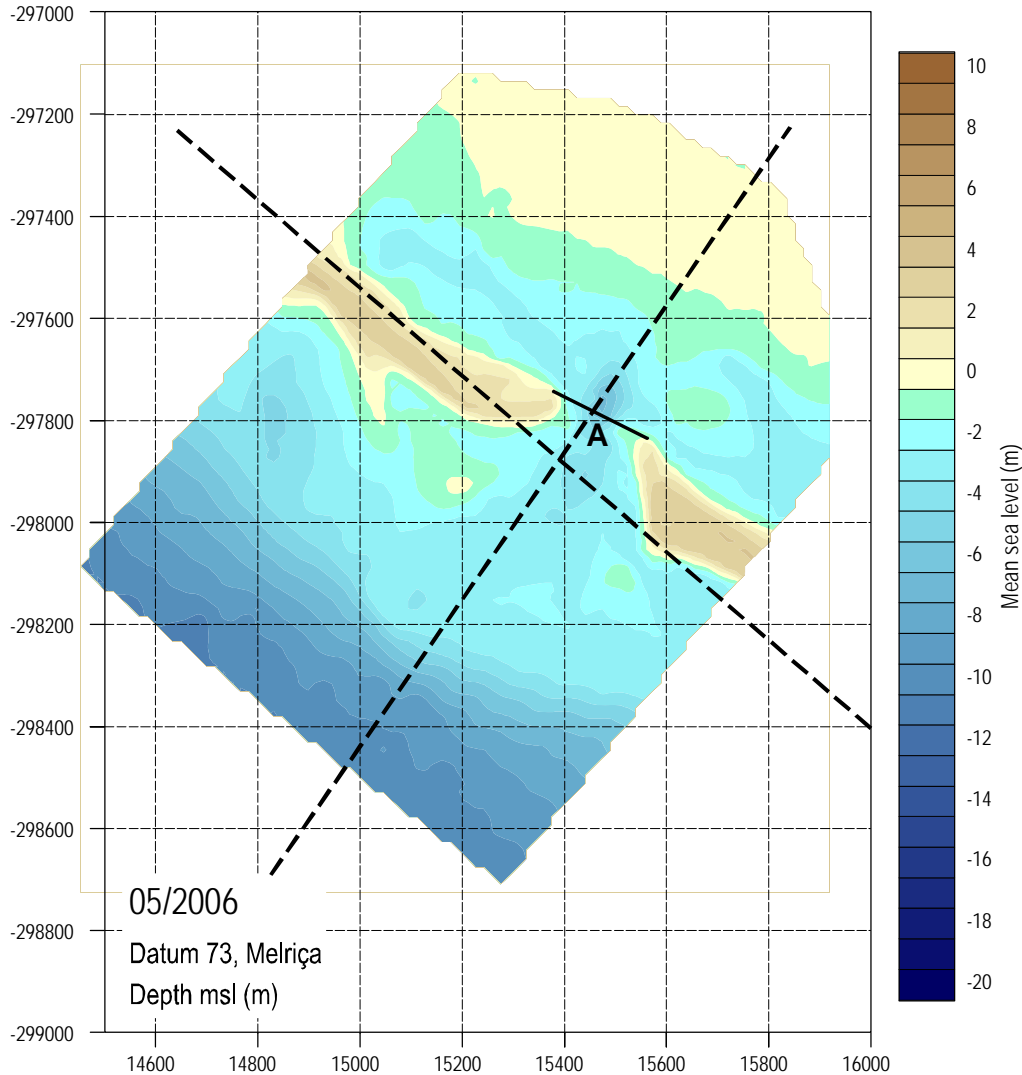


Figure 2. Location of the sampling site in Ancão Inlet, showing the cross-section and the central point (A) surveyed.

Figura 2. Localización del sitio de muestreo en la bocana de Ancão. Se muestra la sección transversal y el punto central (A) estudiado.

hourly for the determination of chlorophyll *a* and nutrient concentrations, using a 5-L Niskin bottle. Concurrently, temperature, salinity, pH, and dissolved oxygen (concentration and percent saturation) were also measured *in situ* using a YSI 6600 XL multi-parametric probe, at the same levels from where the water samples were taken.

Analysis

The flow velocity was measured at the cross-section using an ADCM, with an averaging interval of 5 s, a blanking distance of 0.50 m, and a cell size of 0.50 m. In order to determine the discharge across the inlet and to evaluate the tidal prism, SonTek CurrentSurveyor v. 4.60 software was used. A sixth power law was employed to compute the flow rate at the bottom and surface layers. The flow rate at the unmeasured side banks of the surveyed cross-section was

los márgenes intermareales durante el posprocesamiento, se determinó y registró la localización de la línea de costa en ambos márgenes de la sección (transecto) transversal. Además, en el punto central de la sección transversal se recolectaron muestras de agua cada hora para determinar la concentración de clorofila *a* y de nutrientes con una botella Niskin de 5 L. Al mismo tiempo y en los mismo niveles donde se tomaron las muestras de agua, se midieron *in situ* la temperatura, la salinidad, el pH y el oxígeno disuelto (concentración y porcentaje de saturación) con una sonda multi-paramétrica YSI 6600 XL.

Análisis

En la sección transversal se midió la velocidad del flujo mediante un ADCM, con un intervalo promedio de 5 s, una distancia de blanqueo de 0.50 m y un tamaño de celda de

also derived assuming a triangular section from the shoreline to the nearest measured point and assuming zero velocity at the shoreline.

The total discharge through the inlet cross-section was computed using the same software. The numerical integration in the time domain of the hourly discharge values during the flood and ebb periods provided, respectively, the flood and ebb tidal prisms. The residual tidal prism or net transport of water was obtained as the difference between the flood and ebb tidal prisms or, equivalently, through the numerical integration of the discharge over the complete semi-diurnal tidal cycle.

Water samples (1 L) for the analysis of nutrients were filtered through 0.45- μm decontaminated and weighed membrane filters and frozen at -20°C , while water samples (1 L) for chlorophyll *a* concentrations were filtered using GF/F glass fibre filters. Afterwards, these filters were deep-frozen at -20°C prior to analysis. Chlorophyll *a* and nutrient concentrations were determined following the spectrophotometric methods described by Lorenzen (1967) and Grasshoff *et al.* (1983), respectively. The nutrients analyzed were: ammonium (NH_4^+), nitrate + nitrite ($\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$), phosphate (PO_4^{3-}), and silicate (SiO_4^{4-}). The detection limits were: $0.1\ \mu\text{M}$ for ammonium, $0.05\ \mu\text{M}$ for nitrate + nitrite, $0.02\ \mu\text{M}$ for phosphate, and $0.04\ \mu\text{M}$ for silicate. The Marine Nutrient Standards Kit (OSIL) was used as reference material to ensure accuracy. The accuracy of the procedure was high, with a relative error lower than 2.5% for the nutrient concentrations. In relation to the precision, it was calculated as $\pm 1\%$ for silicate and phosphate, and $\pm 2\%$ for nitrate.

The discharge was numerically computed by using the composite trapezoidal rule for integral estimation applied to the expression: discharge (Q) = \int velocity component normal to cross-section \times cross-sectional area.

The transport of nutrients and chlorophyll *a* was obtained hourly over the entire tidal cycle multiplying the discharge (Q) by the cross-sectional average concentration. Finally, the net transport of nutrients and chlorophyll *a* was obtained by integrating in the time domain the hourly transport values over the entire tidal cycle.

Statistical treatment

Analysis of variance was applied followed by a post-hoc Tukey pair-wise multiple comparison test to determine if there were significant differences in chlorophyll *a* and nutrient concentrations between the three selected depths (surface, middle, and bottom) in the water column of the main channel. The minimum level of confidence considered was 95%.

RESULTS

Physicochemical characterization of Ancão Inlet

As already stated the current velocity was measured hourly along a cross-section of the inlet using an ADCM. The

0.50 m. Para determinar la descarga a través de la bocana y evaluar el prisma mareal, se usó el *software* CurrentSurveyor v. 4.60 de SonTek. Se empleó la ley de la sexta potencia para calcular la tasa de flujo cerca de la superficie y el fondo. También se derivó la tasa de flujo en los márgenes de la sección transversal no muestreados suponiendo una sección triangular de la línea de costa al punto más cercano medido y suponiendo una velocidad cero en la costa.

Se estimó la descarga total a través de la bocana con el mismo *software*. La integración numérica en el dominio del tiempo de los valores de descarga por hora durante los periodos de flujo y reflujos proporcionaron, respectivamente, los prismas mareales de flujo y reflujos. El prisma mareal residual o el transporte neto de agua se obtuvo como la diferencia entre los prismas mareales de flujo y reflujos o, equivalentemente, mediante la integración numérica de la descarga durante un ciclo completo de marea semidiurna.

Las muestras de agua (1 L) para el análisis de nutrientes se filtraron a través de filtros de membrana con un tamaño de poro de $0.45\ \mu\text{m}$, previamente descontaminados y pesados, y se congelaron a -20°C . Las muestras de agua (1 L) para determinar la concentración de clorofila *a* se filtraron a través de filtros de fibra de vidrio y se congelaron a -20°C antes del análisis. Las concentraciones de clorofila *a* y nutrientes se determinaron siguiendo los métodos espectrofotométricos descritos por Lorenzen (1967) y Grasshoff *et al.* (1983), respectivamente. Los nutrientes analizados fueron: amonio (NH_4^+), nitrato + nitrito ($\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^-$), fosfato (PO_4^{3-}) y silicato (SiO_4^{4-}). Los límites de detección fueron: $0.1\ \mu\text{M}$ para amonio, $0.05\ \mu\text{M}$ para nitrato + nitrito, $0.02\ \mu\text{M}$ para fosfato y $0.04\ \mu\text{M}$ para silicato. Se utilizó el Marine Nutrient Standards Kit (OSIL) como material de referencia para asegurar la precisión. La precisión del procedimiento fue alta, con un error relativo menor a 2.5% para las concentraciones de nutrientes. La precisión fue de $\pm 1\%$ para silicato y fosfato, y $\pm 2\%$ para nitrato.

La descarga se estimó numéricamente usando la regla trapezoidal compuesta para calcular la integral: descarga (Q) = \int componente de velocidad normal a la sección transversal \times el área de la sección transversal.

Se obtuvo el transporte de nutrientes y clorofila *a* por hora durante todo el ciclo mareal al multiplicar la descarga (Q) por la concentración promedio de la sección transversal. Finalmente, el transporte neto de nutrientes y clorofila *a* se determinó integrando en el dominio del tiempo los valores de transporte de cada hora para todo el ciclo mareal.

Tratamiento estadístico

Se realizó un análisis de varianza seguido de la prueba de comparaciones múltiples por pares de Tukey para determinar si existían diferencias significativas en las concentraciones de clorofila *a* y nutrientes en las tres profundidades seleccionadas (superficie, nivel intermedio y fondo) en la columna de

distribution of the velocities along the inlet cross-section is shown for two specific situations: one typical of ebb conditions at 9:00 (fig. 3a) and the other representative of flood conditions at 16:00 (fig. 3b). Figure 3 shows that the maximum velocity is similar in both situations, $\sim 2 \text{ m s}^{-1}$, but over a greater area in flood conditions. Moreover, the occurrence of two cores of intense speed was detected, much more pronounced for flood conditions due to the existence of a main channel and probably a secondary tidal channel.

The discharge values, computed from the normal component of the cross-sectional velocity measurements taken hourly during the survey, are represented in figure 3c for the entire campaign period corresponding to a semi-diurnal cycle. Positive values correspond to ebb conditions and negative values to flood conditions. As a consequence of the discharge values obtained and represented in figure 3c, the residual tidal prism or net transport of water obtained is equal to $-3.28 \times 10^6 \text{ m}^3$. From this result it can be stated that there is an inflow or import of water from the ocean to the lagoon through Ancão Inlet over a complete spring tidal cycle.

The physicochemical parameters measured *in situ* at the three selected levels along the water column in the center of the cross-section of Ancão Inlet are shown in figure 4a–d. The hourly vertical variation of temperature, salinity, pH, and dissolved oxygen (concentration and percent saturation) shows that the waters in this inlet are well mixed, with no influence of freshwater and, consequently, no stratification of the water column was observed. The vertical range of the measured parameters between the surface (1 m) and bottom (maximum 7 m) can be considered small and no significant differences ($P > 0.05$) were observed between the three selected levels.

Water temperature (fig. 4a) followed the typical daily variation, showing an increase during the day, from 13.5°C at 7:00 to 17.3°C at 19:00. As expected, a general decrease in temperature with depth was found with the maximum difference along the water column, of almost 1°C , at 7:00. An opposite trend of variation was also observed between water temperature and sea level. Salinity (fig. 4b) varied within a narrow range, from 36.15 to 36.65. Like water temperature, an opposite pattern of variation in relation to sea level was detected; i.e., salinity was minimum at high water and maximum near low water. In general, salinity was higher at the bottom than at the surface. In relation to pH (fig. 4c), as typically found in coastal waters, a small range of variation was observed during the tidal cycle (8.05–8.35); however, pH was minimum at 7:00 and close to low water ($\sim 11:00$) and maximum at high water, following the same trend of variation as dissolved oxygen (fig. 4d). A decrease in pH with depth was also found and the maximum difference along the water column of almost 0.1 was at 7:00. Dissolved oxygen ranged from 7.20 to 9.75 mg L^{-1} , which corresponds to 88–122% of saturation. The temporal variability of dissolved oxygen matched the trend of the tidal height variation. The lowest values were recorded in the first period in the morning till

agua del canal principal. Se consideró un nivel mínimo de confianza de 95%.

RESULTADOS

Caracterización fisicoquímica de la bocana de Ancão

Como ya se mencionó, la velocidad de las corrientes se midió cada hora en una sección transversal de la bocana de Ancão con un ADCM. La distribución de las velocidades en la sección transversal se muestra para dos situaciones específicas: una típica de condiciones de reflujó a las 9:00 (fig. 3a) y otra representativa de condiciones de flujo a las 16:00 (fig. 3b). Como se observa en la figura 3, la velocidad máxima es similar en ambas situaciones, $\sim 2 \text{ m s}^{-1}$, pero cubre mayor área en condiciones de flujo. Asimismo, se detectó la existencia de dos núcleos de velocidad intensiva, siendo mucho más pronunciada en condiciones de flujo debido a la presencia de un canal principal y probablemente de un canal de marea secundario.

Los valores de descarga, calculados a partir del componente normal de las mediciones de velocidad de la sección transversal realizadas cada hora, se presentan en la figura 3c para todo el periodo de muestreo correspondiendo a un ciclo semidiurno. Los valores positivos corresponden a condiciones de reflujó y los negativos a condiciones de flujo. A partir de los valores de descarga obtenidos y representados en la figura 3c, el prisma mareal residual o transporte neto de agua obtenido es igual a $-3.28 \times 10^6 \text{ m}^3$. Con base en este resultado, se puede afirmar que hay un influjo o importación de agua del océano a la laguna a través de la bocana de Ancão durante un ciclo completo de marea viva.

En la figura 4a–d se muestran los parámetros fisicoquímicos medidos *in situ* en los tres niveles seleccionados a lo largo de la columna de agua en el medio de la sección transversal de la bocana de Ancão. La variación vertical por hora de temperatura, salinidad, pH y oxígeno disuelto (concentración y porcentaje de saturación) muestra que las aguas en esta bocana están bien mezcladas y que no hay influencia de agua dulce, por lo que no se observó estratificación en la columna de agua. El intervalo vertical de los parámetros medidos entre la superficie (1 m) y el fondo (máximo 7 m) puede considerarse pequeño y no se encontraron diferencias significativas ($P > 0.05$) entre los tres niveles seleccionados.

La temperatura del agua (fig. 4a) presentó una variación diaria típica, incrementando durante el día de 13.5°C a las 7:00 a 17.3°C a las 19:00. Como era de esperarse, se observó una reducción general de temperatura con la profundidad, con una diferencia máxima en la columna de agua, de casi 1°C , a las 7:00. También se observó una tendencia opuesta en la variación entre la temperatura del agua y el nivel del mar. La salinidad (fig. 4b) varió dentro de un intervalo estrecho de 36.15 a 36.65. Al igual que la temperatura del agua, se detectó un patrón de variación opuesto en relación con el

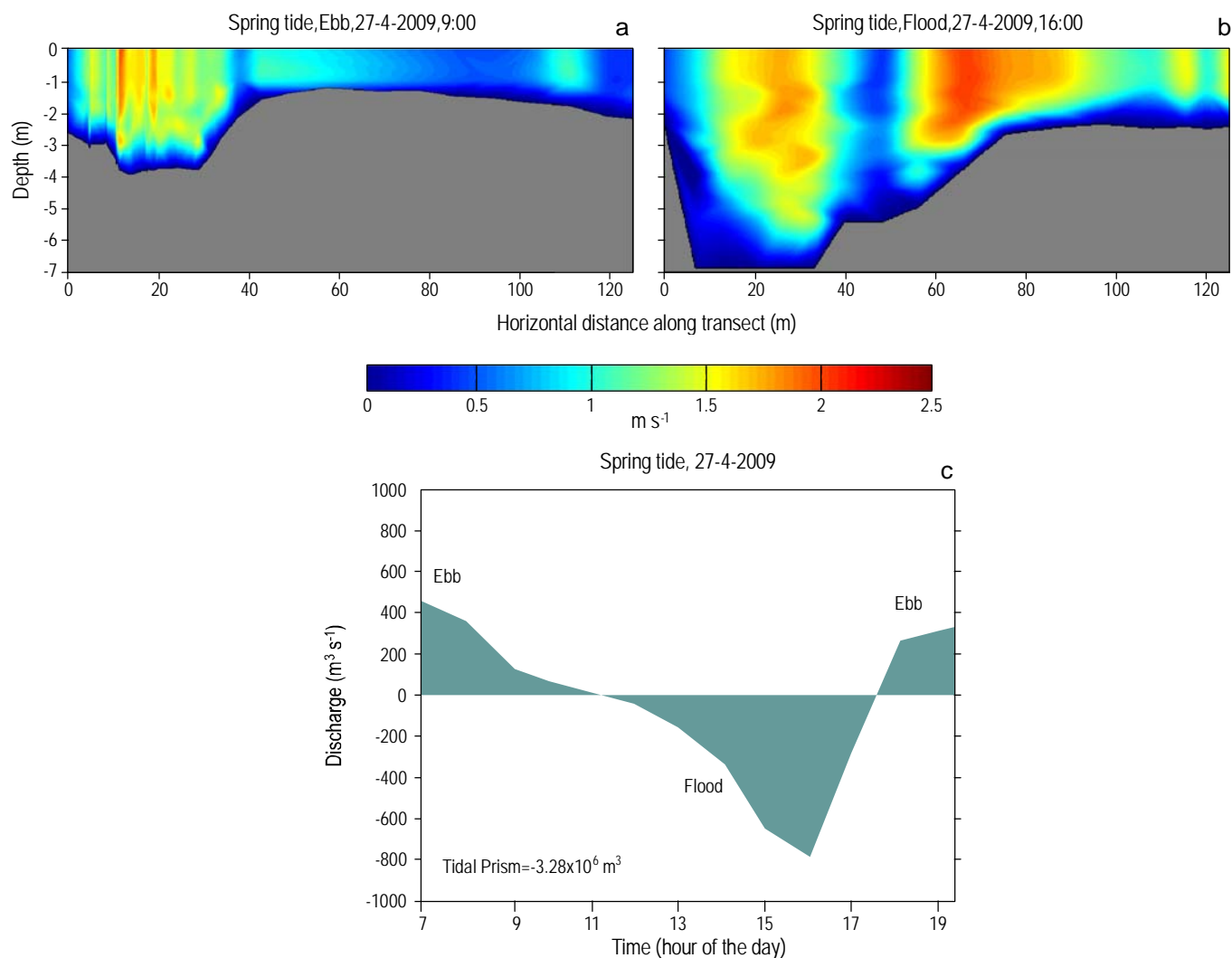


Figure 3. Cross-section of the current velocity measured during (a) ebb conditions, at 9:00, and (b) flood conditions, at 16:00, and (c) discharge (m³ s⁻¹) at Ancão Inlet during the spring tidal cycle on 27 April 2009. Positive values correspond to ebb conditions and negative values to flood conditions. The tidal prism is also indicated.

Figura 3. Sección transversal de la velocidad de las corrientes medida en condiciones de (a) reflujó, a las 9:00, y (b) flujo, a las 16:00, y (c) descarga (m³ s⁻¹) a través de la bocana de Ancão durante un ciclo de marea viva el 27 de abril de 2009. Los valores positivos y negativos corresponden a las condiciones de reflujó y flujo, respectivamente. También se muestra el prisma mareal.

low water (7:00–10:00) and the maximum in the middle of the afternoon (17:00) corresponding to high water.

The nutrient concentrations recorded during the tidal cycle (fig. 5a–c) can be considered low for this period of the year with no significant differences ($P > 0.05$) between the three selected levels. Among the nitrogen compounds, ammonium was in general below the limit of detection ($<0.1 \mu\text{M}$; not shown), while nitrate + nitrite and phosphate were lower than $0.25 \mu\text{M}$. Silicate reached higher concentrations, ranging from 0.35 to $2.50 \mu\text{M}$. The three nutrients followed similar temporal trends of variation with an inverse relationship with the tidal height; i.e., maximum concentrations were reached near low water and minimum at high water. These data also reveal nitrogen as the limiting nutrient,

nivel del mar; i.e., la salinidad fue menor durante la pleamar y mayor cerca de la bajamar. En general, la salinidad fue mayor en el fondo que en la superficie. El pH (fig. 4c), como típicamente sucede en aguas costeras, presentó un intervalo de variación pequeño durante el ciclo mareal (8.05–8.35); sin embargo, el pH fue mínimo a las 7:00 y cerca de la bajamar (~11:00) y máximo durante la pleamar, siguiendo el mismo patrón de variación que el de oxígeno disuelto (fig. 4d). También se observó una disminución en el pH con la profundidad y la máxima diferencia a lo largo de la columna de agua de casi 0.1 se registró a las 7:00. El oxígeno disuelto varió de 7.20 a 9.75 mg L^{-1} , lo que corresponde a una saturación de 88–122%. La variabilidad temporal de oxígeno disuelto fue similar a la variación de la altura de marea. Los valores más

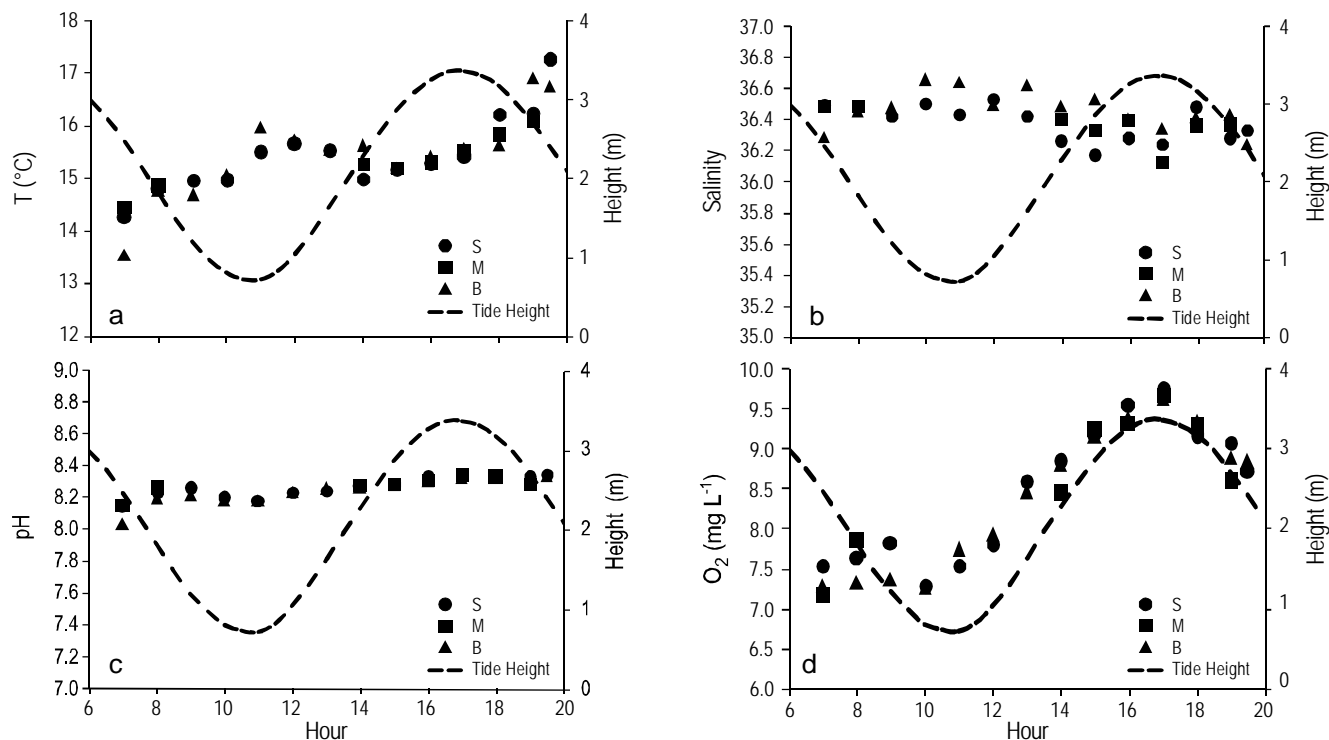


Figure 4. Variation of (a) temperature (T), (b) salinity, (c) pH, and (d) dissolved oxygen (O₂) concentration in the three selected levels of the water column during the spring tidal cycle: surface (S), middle (M), and bottom (B).

Figura 4. Variación de (a) la temperatura (T), (b) la salinidad, (c) el pH y (d) la concentración de oxígeno disuelto (O₂) en los tres niveles seleccionados de la columna de agua durante un ciclo de marea viva: superficie (S), intermedio (M) y fondo (B).

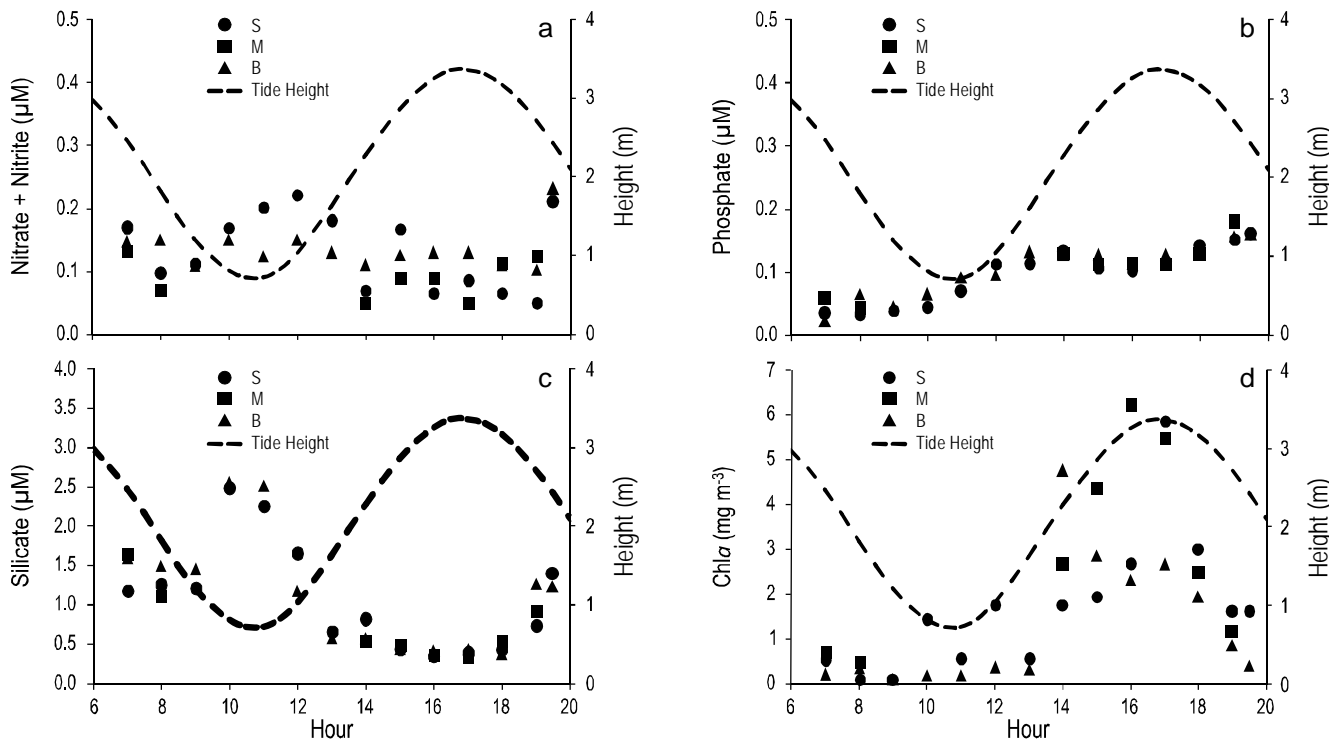


Figure 5. Variation of (a) nitrate + nitrite, (b) phosphate, (c) silicate, and (d) chlorophyll a (Chl a) concentrations in the three selected levels of the water column during the spring tidal cycle: surface (S), middle (M), and bottom (B).

Figura 5. Variación de las concentraciones de (a) nitrato + nitrito, (b) fosfato, (c) silicato y (d) clorofila a (Chl a) en los tres niveles seleccionados de la columna de agua durante un ciclo de marea viva: superficie (S), intermedio (M) y fondo (B).

with a N:P ratio (range: 0.3–6.6) lower than the Redfield ratio (N:P = 16). These low concentrations must be associated with the relatively high concentration of chlorophyll *a* (fig. 5d).

The concentrations of chlorophyll *a* (fig. 5d) were not homogeneous in the water column during the tidal cycle and, consequently, significant differences ($P < 0.05$) were observed, particularly in the period 10:00–17:00. The overall range of chlorophyll *a* was 0.1–6.2 mg m⁻³. While the values were relatively low in the first sampling hours (7:00–11:00), they increased markedly during flood, from 14:00 to 18:00 (4–6 mg m⁻³). It is also interesting to note that in this period, the values increased from the surface to the bottom. After 18:00 the concentration decreased to values similar to those recorded between 10:00 and 12:00. The general trend of temporal variation followed that of dissolved oxygen (fig. 4d) as well as the tidal height, in the period after low water (11:00). The highest chlorophyll *a* values can be considered high. To understand how the adjacent coastal waters affect the chlorophyll *a* and nutrient exchanges through Ancão Inlet, satellite images for the south coast of Portugal were analyzed. A composite image of chlorophyll *a* from the previous week of the survey (fig. 6a) shows that the values for the adjacent coast of Ria Formosa are high (≥ 3 mg m⁻³). Sea surface temperature imagery (fig. 6b) for the same period also shows the occurrence of an upwelling event along the south coast of Portugal. In the coastal zone, water temperature was lower (~ 1 – 2 °C) than in the offshore area. The winds recorded in the period 15–30 April, despite relatively weak (< 10 m s⁻¹, fig. 7), were predominantly from the west, which is the main direction favorable for the development of upwelling events on the south coast of Portugal, with a W-E orientation. Due to a short period of wind relaxation and upwelling-unfavorable winds (easterlies), from 22 to 24 April (fig. 7), greater phytoplankton growth may have been promoted. Thus, the chlorophyll *a* concentration during this survey could be higher than the mean values for the previous week, under stronger wind forcing conditions (fig. 6a).

Net transport of nutrients and chlorophyll *a*

The net transports of nutrients and chlorophyll *a* estimated for this tidal cycle are summarized in table 1. This table shows an import of nitrate + nitrite (~ 4 kg), phosphate (16 kg), and chlorophyll *a* (23 kg) from the ocean to Ria Formosa and an export of silicate (51 kg) from Ria Formosa to the adjacent coastal ocean across Ancão Inlet. Due to the import of phytoplankton, the nitrogen and phosphorus concentrations were almost depleted. This fact associated with a net import of water led to an import of these nutrients; however, it represents a source of silicate for the adjacent coastal ocean as expressed by the estimated export.

DISCUSSION

Coastal lagoons represent dynamic and variable ecosystems associated with hydrodynamic processes that include

bajos se registraron en el primer periodo de la mañana hasta la bajamar (7:00–10:00) y los más altos a media tarde (17:00) correspondiendo a la pleamar.

Las concentraciones de nutrientes medidas durante el ciclo mareal (fig. 5a–c) pueden considerarse bajas para este periodo del año, y no se observaron diferencias significativas ($P > 0.05$) entre los tres niveles seleccionados. De los compuestos de nitrógeno, en general el amonio resultó por debajo del límite de detección (< 0.1 μM; no se muestra), mientras que las concentraciones de nitrato + nitrito y fosfato fueron menores que 0.25 μM. El silicato presentó concentraciones más altas, entre 0.35 y 2.50 μM. Los tres nutrientes presentaron tendencias temporales de variación similares, con una relación inversa con la altura de marea; i.e., las máximas concentraciones se registraron cerca de la bajamar y las mínimas durante la pleamar. Estos datos también identifican al nitrógeno como nutriente limitante, con una razón N:P (intervalo: 0.3–6.6) menor que la razón de Redfield (N:P = 16). Estas concentraciones bajas tienen que estar relacionadas con la concentración relativamente alta de clorofila *a* (fig. 5d).

Las concentraciones de clorofila *a* (fig. 5d) no fueron homogéneas en la columna de agua durante el ciclo mareal y, por consiguiente, se observaron diferencias significativas ($P < 0.05$), en particular entre 10:00 y 17:00. El intervalo total de clorofila *a* fue de 0.1 a 6.2 mg m⁻³. Aunque los valores fueron relativamente bajos durante las primeras horas de muestreo (7:00–11:00), éstos incrementaron notablemente durante el reflujó entre 14:00 y 18:00 (4–6 mg m⁻³). Es interesante mencionar que en este periodo los valores incrementaron de la superficie al fondo. Después de las 18:00, la concentración se redujo a valores similares a los registrados entre 10:00 y 12:00. La tendencia general de variación temporal siguió la de oxígeno disuelto (fig. 4d), así como la de la altura de marea, en el periodo después de bajamar (11:00). Los mayores valores de clorofila *a* pueden considerarse altos. Para entender cómo las aguas costeras adyacentes afectan los intercambios de clorofila *a* y nutrientes a través de la bocana de Ancão, se analizaron imágenes satelitales de la costa sur de Portugal. Una imagen compuesta de clorofila *a* de la semana anterior al estudio (fig. 6a) muestra que los valores para la costa adyacente de la laguna de Ria Formosa son altos (≥ 3 mg m⁻³). Imágenes de la temperatura superficial del mar (fig. 6b) para el mismo periodo también muestran la presencia de un evento de afloramiento en la costa sur de Portugal. En la zona costera, la temperatura del agua fue menor (~ 1 – 2 °C) que mar adentro. Los vientos registrados del 15 al 30 de abril, a pesar de ser relativamente débiles (< 10 m s⁻¹, fig. 7), fueron predominantemente del oeste, la dirección más favorable para el desarrollo de eventos de afloramiento en la costa sur de Portugal, con una orientación de O-E. Debido a un periodo corto de relajación de vientos y de vientos no favorables para el afloramiento (del este), es posible que entre el 22 y 24 de abril (fig. 7) se promovió un mayor crecimiento de fitoplancton. Por lo tanto, la concentración de clorofila *a* durante este estudio puede ser mayor que

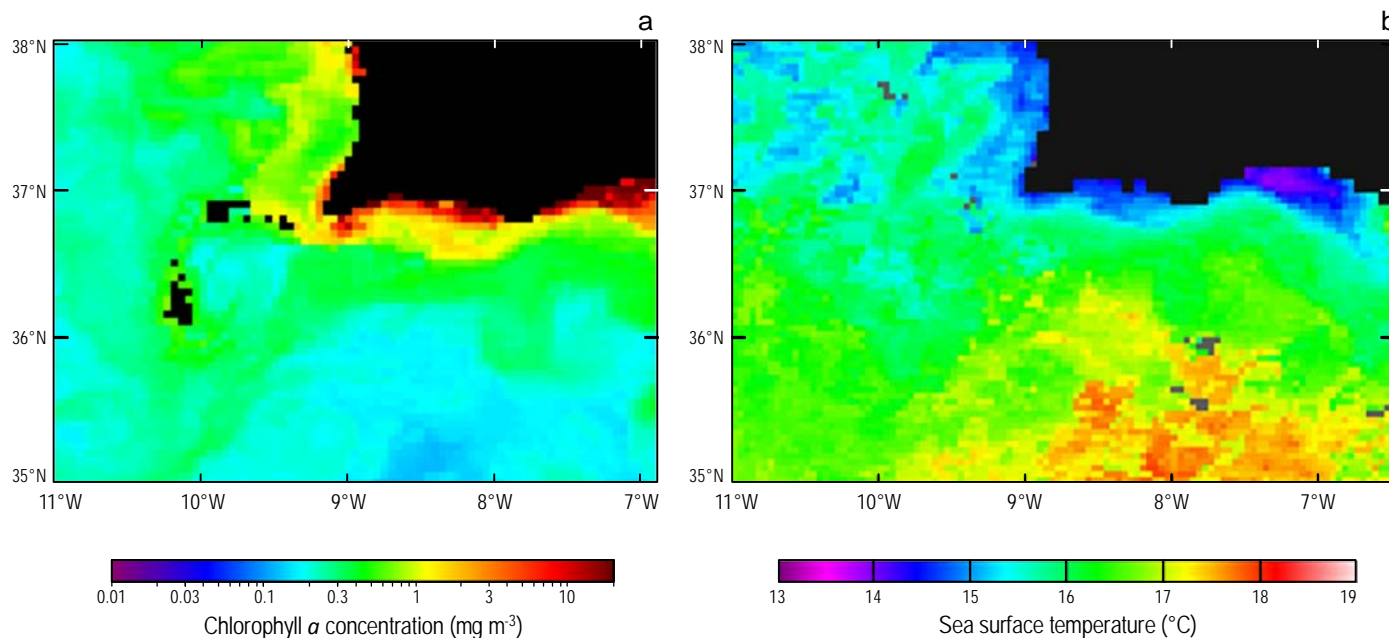


Figure 6. Satellite image of (a) mean chlorophyll *a* concentration and (b) mean sea surface temperature over one week before the survey, in the period 15–22 April 2009. Source: <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/> and <http://poet.jpl.nasa.gov/>, respectively.

Figura 6. Imagen satelital de (a) la concentración media de clorofila *a* y (b) la temperatura superficial del mar durante una semana antes del estudio, del 15 al 22 de abril de 2009. Fuente: <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/> y <http://poet.jpl.nasa.gov/>, respectivamente.

forcing by winds and other atmospheric factors, tides, and the natural spatial-temporal variability of the physical, chemical, biological, and geological processes in the boundary waters. It has been reported that coastal ecosystems with different hydrodynamic conditions respond differently to environmental changes.

In regard to the discharge values, the residual tidal prism or net transport of water obtained is equal to $-3.28 \times 10^6 \text{ m}^3$, showing an inflow or import of water from the ocean to the lagoon through Ancão Inlet over a complete spring tidal cycle. The net transport obtained is in the opposite direction to that shown by previous studies carried out in the same place and under the same tide conditions (spring tide), such as the field work conducted by the same authors of this study in 2007 (data not published), the survey conducted by Pacheco *et al.* (2010) in 2004 and that by Salles (2001) in 1999, or by the hydrodynamic circulation model (ELCIRC model) applied by Dias *et al.* (2009) to the survey of Salles (2001). The results of these authors exhibit similar velocities, despite showing the net transport in the opposite direction. However, a survey conducted by Pacheco *et al.* (2010) in 2006 at the same site, but under neap tide conditions, shows a net transport of water from the ocean to the lagoon, as was obtained in the present work. As stated in the Introduction, there is a dependency of water exchanges on the position and morphological configuration of the inlets (Dias *et al.* 2009) and it is known that this inlet is migrating eastward (90 m yr^{-1} , Pacheco *et al.* 2010).

los valores promedio de la semana anterior, en condiciones de mayor forzamiento de los vientos (fig. 6a).

Transporte neto de nutrientes y clorofila *a*

Los transportes netos de nutrientes y clorofila *a* estimados para el ciclo mareal se resumen en la tabla 1. Esta tabla muestra una importación de nitrato + nitrito ($\sim 4 \text{ kg}$), fósforo (16 kg) y clorofila *a* (23 kg) del océano a la laguna y una exportación de silicato (51 kg) de la laguna al océano por la bocana de Ancão. Debido a la importación de fitoplancton, las concentraciones de nitrógeno y fósforo fueron bajas (casi agotadas). Esto último asociado con una importación neta de agua resultó en un importe de estos nutrientes; sin embargo, representa una fuente de silicato para el océano adyacente según lo indica la exportación estimada.

DISCUSIÓN

Las lagunas costeras son ecosistemas dinámicos y variables asociadas con procesos hidrodinámicos que incluyen el forzamiento por vientos y otros factores atmosféricos, las mareas y la variabilidad espaciotemporal natural de los procesos físicos, químicos, biológicos y geológicos de las aguas limítrofes. Se ha observado que ecosistemas costeros con diferentes condiciones hidrodinámicas responden de manera diferente a cambios ambientales.

En cuanto a los valores de descarga, el prisma de marea residual o transporte neto de agua obtenido es igual a

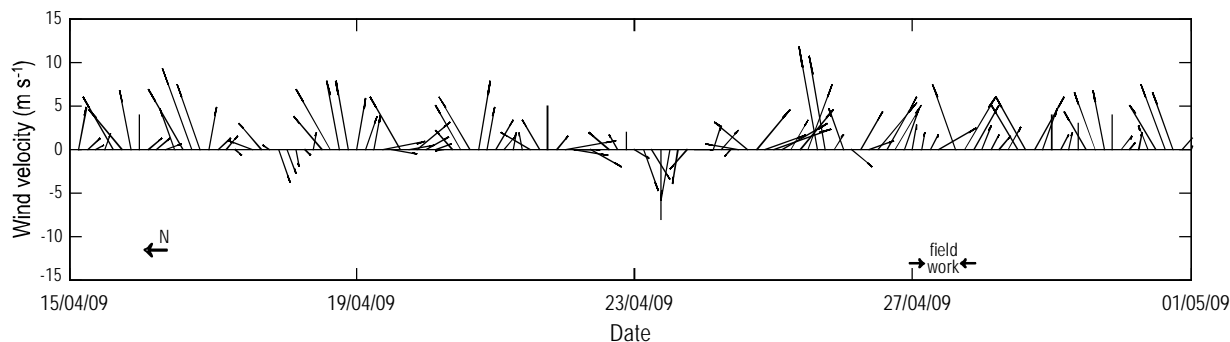


Figure 7. Wind velocity at Faro meteorological station, from 15 to 30 April 2009. The north orientation to the left is indicated as well as the sampling period of the field work.

Figura 7. Velocidad del viento en la estación meteorológica de Faro, del 15 al 30 de abril de 2009. Se indica la orientación norte así como el periodo cuando se realizó el trabajo de campo.

The chemical characteristics of the water in this inlet may be quite variable, as observed for the other inlets within Ria Formosa that are not only affected by the tidal range but also by physical forcings, meteorological conditions, and biological processes occurring in the mixing boundary water masses. Comparing the physical and chemical data from this survey with the data for the same site and tidal conditions obtained in June 2007, temperature was lower and salinity and dissolved oxygen were higher but with a similar pH range. Regarding the nutrient concentration, though a similar order of magnitude was found, in the present study the highest values were lower than in June 2007. This is possibly associated with the higher chlorophyll *a* concentrations during flood ($>2 \text{ mg m}^{-3}$), leading to a rapid biological consumption of the nutrients.

The present data cannot be directly compared with historical results for other Ria Formosa inlets (Falcão and Vale 2003, Newton and Mudge 2005) since samples were collected only at high and low water (low sampling interval) during spring and neap tides. In addition, data were collected 20–25 years ago, when the lagoonal conditions were different. Nonetheless, the order of magnitude of the parameters measured can be compared. The greater differences were found for nutrient concentrations that were consistently higher than the values from the present study. This difference can be associated mainly with the reduction in agricultural fertilizers and the implementation of sewage treatment plants (Loureiro *et al.* 2006). Furthermore, considering these two studies, the chlorophyll *a* concentrations were also lower than those recorded in the present study. More recently, a study was conducted in the same inlet in 2002, during spring conditions, with water sampling only at high and low waters (Loureiro *et al.* 2006). The nutrient concentrations obtained in the present study were generally lower whereas chlorophyll *a* was higher.

Finally, these data are compared with the results reported for Aveiro Estuary, northwest coast of Portugal (Lopes *et al.* 2007); however, a direct comparison is not possible since the latter is not a coastal lagoon but rather an estuarine system.

$-3.28 \times 10^6 \text{ m}^3$, lo que indica una entrada o importación de agua del océano a la laguna a través de la bocana de Ancão durante un ciclo completo de marea viva. El transporte neto registrado muestra una dirección opuesta a la encontrada en otros estudios realizados en el mismo lugar y en las mismas condiciones de marea (marea viva), tales como el estudio llevado a cabo por Salles (2001) en 1999, el de Pacheco *et al.* (2010) en 2004 y el de los propios autores en 2007 (datos no publicados), así como por el modelo de circulación hidrodinámica (modelo ELCIRC) aplicado por Dias *et al.* (2009) al estudio de Salles (2001). Los resultados de estos autores muestran velocidades similares, a pesar de registrar el transporte neto en dirección opuesta. No obstante, un estudio realizado por Pacheco *et al.* (2010) en 2006, en el mismo sitio, pero en condiciones de marea muerta, muestra un transporte neto de agua del océano a la laguna, en concordancia con lo observado en el presente trabajo. Como se mencionó en la Introducción, los intercambios de agua dependen de la posición y configuración morfológica de las bocanas (Dias *et al.* 2009) y es bien conocido que esta bocana está migrando hacia el este (90 m año^{-1} , Pacheco *et al.* 2010).

Las características químicas del agua en la bocana de Ancão pueden ser bastante variables, como también se ha observado para las otras bocanas de la laguna de Ría Formosa que no sólo son impactadas por la amplitud de la marea, sino también por los forzamientos físicos, las condiciones meteorológicas y los procesos biológicos que se presentan cuando se mezclan masas de agua. Al comparar los datos físicos y químicos del presente trabajo con los obtenidos en junio de 2007 para el mismo sitio en las mismas condiciones de marea, se observa que la temperatura fue menor y que la salinidad y el oxígeno disuelto fueron mayores, pero que el intervalo de pH fue similar. Con respecto a la concentración de nutrientes, el orden de magnitud fue similar pero en el presente trabajo los valores más altos fueron menores que en junio de 2007. Esto posiblemente esté asociado con las mayores concentraciones de clorofila *a* durante el refluo ($>2 \text{ mg m}^{-3}$), lo que ocasiona un rápido consumo biológico de los nutrientes.

Table 1. Net transports of chlorophyll *a* (Chl *a*), nitrate + nitrite (expressed as nitrogen, N), phosphate (expressed as phosphorus, P), and silicate (expressed as silicon, Si) during the spring tidal cycle on 27 April 2009.

Tabla 1. Transportes netos de clorofila *a* (Chl *a*), nitrato + nitrito (expresado como nitrógeno, N), fosfato (expresado como fósforo, P) y silicato (expresado como silicio, Si) durante un ciclo de marea viva el 27 de abril de 2009.

	Import (kg)	Export (kg)
Chl <i>a</i>	23.0	
N-NO ₃ ⁻ + NO ₂ ⁻	3.9	
P-PO ₄ ³⁻	16.0	
Si-SiO ₄ ⁴⁻		51.0

The comparison is relative only to water samples collected at both high and low water by late spring 2001. At this estuarine system the major differences in data are associated with lower salinity values, with correspondingly higher nutrient concentrations and lower chlorophyll *a* concentrations than in Ancão Inlet.

Variability in the response of phytoplankton biomass to nutrients is also a complex process. So, it is imperative to understand the physical processes that control the phytoplankton response to nutrients since the susceptibility of coastal ecosystems to nutrient enrichment is strongly influenced by physical and meteorological processes.

This survey represents an attempt to further understand the effects of the tide and of the exchanges between the lagoon and adjacent sea through Ancão Inlet when tidal range is maximum (~3 m, under spring tide conditions), under meteorological, physical, chemical, and biological conditions observed in spring. Although this inlet is one of the smallest of the Ria Formosa system, it is to be expected that during spring tides the exchanges through it are further increased. If the processes and variability of the water masses are understood in Ancão Inlet then it is possible to predict that stronger exchanges occur within this system through the main inlets, thus contributing to the knowledge of the exchanges in Ria Formosa as a whole.

The temperature, salinity, pH, and dissolved oxygen values showed straight away that this small inlet presents a great dynamic variability and is well mixed, without stratification and any freshwater contribution. Consequently, the amplitude of the vertical distribution of these parameters is limited despite the occurrence of a tidal signal during the survey. Water temperature increased more evidently in low water than in high water due to the increase in the water volume. Salinity was also highest around low water, showing the influence of a higher evaporation rate within Ria Formosa than in the adjacent ocean. Dissolved oxygen (~90–120% saturation) revealed that the water mass was well oxygenated. The lowest values in the morning matching the final

Nuestros datos no pueden ser comparados directamente con los resultados históricos para las otras bocanas de la laguna de Ria Formosa (Falcão y Vale 2003, Newton y Mudge 2005) ya que las muestras sólo fueron recolectadas en pleamar y bajamar (intervalo de muestreo reducido) durante mareas vivas y muertas. Además, los datos se recolectaron hace 20–25 años cuando las condiciones lagunares eran diferentes. No obstante, sí se puede comparar el orden de magnitud de los parámetros medidos. Las mayores diferencias se observan en lo que respecta a las concentraciones de nutrientes, las cuales fueron consistentemente más altas que los valores del presente trabajo. Esta diferencia se puede asociar principalmente con la reducción en el uso de fertilizantes agrícolas y la implementación de plantas de tratamiento de aguas residuales (Loureiro *et al.* 2006). Además, considerando estos dos estudios, las concentraciones de clorofila *a* también fueron menores que los registrados en el presente trabajo. Más recientemente, en 2002 se realizó un estudio en la misma bocana en condiciones de marea viva, tomando muestras de agua sólo en pleamar y bajamar (Loureiro *et al.* 2006). Las concentraciones de nutrientes obtenidas en el presente trabajo generalmente fueron menores mientras que la clorofila *a* fue mayor.

Por último, estos datos se comparan con los resultados obtenidos para el estuario de Aveiro en la costa noroccidental de Portugal (Lopes *et al.* 2007), aunque por ser un sistema estuarino y no una laguna costera no es posible realizar una comparación directa. La comparación se realiza sólo con las muestras de agua recolectadas durante tanto la pleamar como la bajamar a finales de la primavera de 2001. Las principales diferencias entre los datos son los menores valores de salinidad y, por consiguiente, la mayor concentración de nutrientes y menor concentración de clorofila *a* en este sistema estuarino que en la bocana de Ancão.

La variabilidad en la respuesta de la biomasa fitoplanctónica a los nutrientes es un proceso complejo. Por ende, es muy importante entender los procesos físicos que controlan tal respuesta ya que la susceptibilidad de los ecosistemas costeros al enriquecimiento de nutrientes es influenciada fuertemente por procesos físicos y meteorológicos.

Este estudio representa un esfuerzo para entender mejor los efectos de las mareas y los intercambios entre la laguna y el océano adyacente a través de la bocana de Ancão cuando la amplitud de la marea es máxima (~3 m, en condiciones de marea viva), en condiciones meteorológicas, físicas, químicas y biológicas de primavera. A pesar de ser una de las bocanas más pequeñas de la laguna de Ria Formosa, es de esperar que durante las mareas vivas se incrementan aún más los intercambios a través de ésta. Si se entienden los procesos y la variabilidad de las masas de agua en la bocana de Ancão entonces será posible predecir los mayores intercambios que se producen a través de las bocanas principales de este sistema lagunar y así contribuir al conocimiento de los intercambios en el sistema global.

Los valores de temperatura, salinidad, pH y oxígeno disuelto inmediatamente mostraron que esta pequeña bocana

period of ebb demonstrated that in this period the respiration rate within the Ria Formosa system was stronger than in the adjacent ocean. This result is in agreement with the minimum pH values reached at this time of the day. The maximum dissolved oxygen values, reaching supersaturation, were found during the late afternoon, when photosynthesis increased. Concurrently, there was an increase in chlorophyll *a* concentration and pH. Moreover, this period matched the flooding, indicating that water renewal promoted the oxygenation of the water passing through Ancão Inlet.

The pattern of increasing nutrient concentrations during ebb and decreasing during flood shows the strong tidal influence in Ancão Inlet associated with dilution and mixture with the ocean seawater. The low concentrations found for the three nutrients must be associated with the relatively high concentration of chlorophyll *a*, showing that phytoplankton is consuming the nutrients, particularly during the period of higher stability (wind relaxation, fig. 7), after the two weeks of winds favorable for upwelling occurrence on the south coast of Portugal (fig. 6a–b). It is important to note that the chlorophyll *a* values, from 4 to 6.2 mg m⁻³, can be considered high, typical of spring algal blooms and upwelling events that begin in March (Wooster *et al.* 1976). Indeed, values found close to the inlets and the main channels of Ria Formosa are usually <2 mg m⁻³ (Moita 2001, Falcão and Vale 2003, Barbosa 2006, Loureiro *et al.* 2006). Values close to 6 mg m⁻³ have been reported for Cape São Vicente and close to Faro during upwelling events (Moita 2001).

An evident tidal signal was also observed for chlorophyll *a* values; however, as phytoplankton migrates vertically, the concentration was not homogeneous in the water column over the tidal cycle. It is also interesting that in the afternoon (14:00–16:00) the values increased from the surface to the bottom due to stronger solar radiation. The general trend of temporal variation in chlorophyll *a* followed that of dissolved oxygen, since phytoplankton plays a key role in the production of dissolved oxygen during photosynthesis.

As the chlorophyll *a* concentration in the coastal area was high and a net import of water occurred (fig. 3c), an import of chlorophyll *a* into the Ria Formosa system during the survey was expected. This was confirmed by the net transport values computed (23 kg, table 1). Falcão and Vale (2003) also pointed out that, under spring tide conditions, there is an import of chlorophyll *a* into Ria Formosa. In fact, the estimated value is important in so far that it is one order of magnitude higher than that estimated for the previous spring tidal cycle in 2007. Therefore, the recorded nutrient concentration, particularly nitrate (which is the most rapidly consumed), is in the lower limit of the concentration range usually found in coastal oceans (Benoliel 1985, Falcão and Vale 2003, Newton and Mudge 2005), providing a very low N:P ratio, as also reported for the western part of Ria Formosa by Loureiro *et al.* (2006). The net import of nitrate (~4 kg, table 1) and phosphate (16 kg, table 1) and the export of silicate (51 kg, table 1) under spring conditions have already been

presenta gran variabilidad dinámica y está bien mezclada, sin presentar estratificación y ninguna contribución de agua dulce. En consecuencia, la amplitud de la distribución vertical de estos parámetros es limitada a pesar de la presencia de una señal de marea durante el estudio. La temperatura del agua aumentó de forma más evidente durante la bajamar que la pleamar debido al incremento en el volumen de agua. La salinidad también fue mayor alrededor de la bajamar, mostrando la influencia de una mayor tasa de evaporación dentro de la laguna que en el océano adyacente. El oxígeno disuelto (~90–120% de saturación) indicó que la masa de agua se encontraba bien oxigenada. Los valores más bajos se registraron en la mañana coincidiendo con el periodo del final del refluo, lo cual indica que durante este periodo la tasa de respiración fue mayor en el sistema lagoon que en el océano adyacente. Este resultado concuerda con los valores mínimos de pH alcanzados a esta hora del día. Los valores máximos de oxígeno disuelto, alcanzando la supersaturación, se registraron al final de la tarde, cuando aumentó la fotosíntesis. Al mismo tiempo, se presentó un aumento en la concentración de clorofila *a* y el pH. Además, este periodo correspondió al refluo, lo que indica que la renovación de agua promovió la oxigenación del agua que pasa por la bocana de Ancão.

El patrón de incremento/decremento de la concentración de nutrientes durante el refluo/flujo muestra la fuerte influencia de la marea en la bocana de Ancão asociada con la dilución y mezcla del agua oceánica. Las bajas concentraciones registradas para los tres nutrientes debe estar asociada con la concentración relativamente alta de clorofila *a*, lo que muestra que el fitoplancton consume los nutrientes, especialmente durante el periodo de mayor estabilidad (relajación del viento, fig. 7) después de las dos semanas de vientos favorables para la presencia de afloramientos en la costa sur de Portugal (fig. 6a–b). Es importante mencionar que los valores de clorofila *a*, de 4 a 6.2 mg m⁻³, pueden considerarse altas y típicas de eventos de afloramientos algales que inician en marzo (Wooster *et al.* 1976). De hecho, los valores registrados en las inmediaciones de las bocanas y en los canales principales de la laguna de Ria Formosa tienden a ser <2 mg m⁻³ (Moita 2001, Falcão y Vale 2003, Barbosa 2006, Loureiro *et al.* 2006). Se han registrado valores cercanos a 6 mg m⁻³ en el cabo de São Vicente y cerca de Faro durante eventos de afloramiento (Moita 2001).

La señal de marea también fue evidente en el caso de los valores de clorofila *a*; sin embargo, ya que el fitoplancton migra verticalmente, la concentración no fue homogénea en la columna de agua durante el ciclo mareal. Es interesante notar que en la tarde (14:00–16:00) los valores incrementaron de la superficie al fondo debido a una mayor radiación solar. La tendencia general de la variación temporal de clorofila *a* siguió la del oxígeno disuelto, ya que el fitoplancton juega un papel importante en la producción de oxígeno disuelto durante la fotosíntesis.

Puesto que la concentración de clorofila *a* en la zona costera fue alta y se observó una importación neta de agua

documented for the Ria Formosa inlets by Falcão and Vale (2003), as well as by Newton and Mudge (2005) for nitrogen forms in April. The export of silicate has been associated with sediment-water column exchanges particularly derived during spring tidal conditions. This fact reveals that Ria Formosa may act as a source of silicate for the adjacent coastal waters and that the main species of phytoplankton within the lagoon did not exhaust silicate, while in the coastal waters this may be true. High chlorophyll concentrations were found in the coastal zone adjacent to Ria Formosa (fig. 6a) and it is known that the main phytoplankton group associated with upwelling is diatoms (Abrantes and Moita 1999, Silva *et al.* 2009). Under spring conditions in Ria Formosa, diatoms have been identified as the major group (Loureiro *et al.* 2006). It has been observed that after an upwelling event, silicate concentrations may be almost depleted at surface levels ($<1 \mu\text{M}$) on the south and southwest coast of Portugal (Moita 2001, Cravo *et al.* 2010, respectively). Higher amounts of nutrients and chlorophyll *a* exchanged between the six Ria Formosa inlets system would be expected based on the corresponding values measured in this small inlet. The conditions monitored during this survey revealed that Ancão Inlet is dominated by import from the ocean. The results are highly dependent on the configuration of the several inlets connected with each other through a complex system of tidal channels. This system is very unstable, with short periods of morphodynamic variations and consequently natural closure and opening of inlets due to extreme winter weather conditions. Considering that Ria Formosa is a highly productive system under certain meteorological, physical, chemical, and biological conditions, it may export material to the adjacent ocean through the several inlets, which will increase the productivity of these waters, as indicated by several authors (Moita 2001, Falcão and Vale 2003, Newton and Mudge 2005).

CONCLUSIONS

The results obtained confirmed that the chemical characteristics at the Ria Formosa inlets are not only affected by the tidal range but also by physical forcing including winds and, consequently, biological processes occurring in the boundary water masses.

This spring tidal survey, carried out in the spring, revealed that this inlet imported water with an important contribution to the overall complex system of six inlets. The concentrations of chlorophyll *a* were high (maximum $\sim 6 \text{ mg m}^{-3}$) and the nutrients low. Chlorophyll *a*, nitrate, and phosphate were imported into the Ria Formosa. Silicate was the only nutrient that was exported from this system.

The data obtained are representative only of the studied conditions and conclusions cannot be generalized. Since this system is unstable and variable in time, data may change either due to morphodynamic alterations of this inlet or to the mixing of water masses also affected by oceanographic

(fig. 3c), era de esperarse que sucediera una importación de clorofila *a* al sistema lagunar durante el estudio. Esto fue confirmado por los valores de transporte neto estimados (23 kg, tabla 1). Falcão y Vale (2003) también encontraron que, en condiciones de marea viva, existe una importación de clorofila *a* hacia la laguna. De hecho, el valor estimado es importante en cuanto a que es una orden de magnitud mayor que la estimada para el ciclo de marea viva en 2007. Por lo tanto, la concentración de nutrientes registrada, particularmente en el caso de nitrato (el nutriente que se consume con mayor rapidez), se encuentra en el límite inferior del intervalo de concentraciones comúnmente registrado para aguas oceánicas costeras (Benoliel 1985, Falcão y Vale 2003, Newton y Mudge 2005), proporcionando una razón N:P muy baja, como ya se ha documentado para la parte occidental de la laguna de Ria Formosa (Loureiro *et al.* 2006). La importación neta de nitrato ($\sim 4 \text{ kg}$, tabla 1) y fosfato (16 kg, tabla 1) y la exportación de silicato (51 kg, tabla 1) en condiciones de marea viva ya se han documentado para las bocanas del sistema lagunar por Falcão y Vale (2003), así como por Newton y Mudge (2005) para formas de nitrógeno en abril. Se ha asociado la exportación de silicato con los intercambios entre el sedimento y la columna de agua derivadas en condiciones de marea viva. Este hecho indica que la laguna de Ria Formosa puede servir como fuente de silicato para las aguas costeras adyacentes y que las principales especies de fitoplancton dentro de la laguna no agotaron el silicato, lo cual podría ser cierto en aguas costeras. Se encontraron concentraciones de clorofila altas en la zona costera adyacente a la laguna (fig. 6a) y se sabe que las diatomeas son el principal grupo de fitoplancton asociado a los afloramientos (Abrantes y Moita 1999, Silva *et al.* 2009). En condiciones de marea viva en el sistema de Ria Formosa, las diatomeas han sido identificadas como el grupo principal (Loureiro *et al.* 2006). Se ha observado que después de un evento de afloramiento, las concentraciones de silicato pueden ser casi agotadas en la superficie ($<1 \mu\text{M}$) en la costa sur y suroeste de Portugal (Moita 2001, Cravo *et al.* 2010, respectivamente). Con base en los valores medidos en la bocana de Ancão, se esperaría un intercambio de mayores cantidades de nutrientes y clorofila *a* entre las seis bocanas del sistema de Ria Formosa. Las condiciones analizadas durante este estudio muestran que la bocana de Ancão es dominada por una importación del océano. Los resultados dependen de la configuración de las bocanas interconectadas a través de un sistema complejo de canales de marea. Este sistema es muy inestable, con periodos cortos de variaciones morfodinámicas y, en consecuencia, la clausura y apertura natural de bocanas debido a las condiciones extremas del clima invernal. Considerando que la laguna de Ria Formosa es altamente productiva en ciertas condiciones meteorológicas, físicas, químicas y biológicas, puede exportar material al océano adyacente a través de varias bocanas, lo cual incrementa la productividad de estas aguas, como ya lo han indicado varios autores (Moita 2001, Falcão y Vale 2003, Newton y Mudge 2005).

processes. To better understand the net mass transports in this inlet and in the Ria Formosa system as a whole, more and similar work will be carried out in the near future, considering both a spatial and seasonal approach.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was partially financed by the Center for Marine and Environmental Research (CIMA, Portugal). The authors kindly acknowledge the Portuguese Maritime Authority, particularly Commandant G Marques-Ferreira, for providing the sampling boat. We also acknowledge Ó Ferreira for lending the ADCM to measure the current velocities along the cross-section over the complete tidal cycle.

REFERENCES

- Abrantes F, Moita MT. 1999. Water column and recent sediment record data on diatom and coccolithophorids, off Portugal, confirm sediment record of upwelling events. *Oceanol. Acta* 22: 319–336.
- Barbosa A. 2006. Estrutura e dinâmica da teia alimentar microbiana na Ria Formosa. PhD thesis, University of Algarve, Portugal, 518 pp.
- Benoiel MJ. 1985. Vigilância da qualidade da água da Ria Formosa (Ria de Faro-Olhão). REL.TF-QP-1/85, Instituto Hidrográfico, Lisbon, Portugal, 19 pp.
- Bertin X, Fortunato AB, Oliveira A. 2009. Morphodynamic modeling of the Ancão Inlet, south Portugal. *Proceedings of the 10th International Coastal Symposium, Lisbon, Portugal. J. Coast. Res. SI* 56: 10–14.
- Cravo A, Relvas P, Carreira, S, Rita F, Madureira M, Sánchez R. 2010. An upwelling filament off southwest Iberia: Effect on the chlorophyll *a* and nutrient exportation. *Cont. Shelf Res.* 30: 1601–1613.
- Dias JM, Sousa M, Bertin X, Fortunato AB, Oliveira A. 2009. Numerical modeling of the impact of the Ancão Inlet relocation (Ria Formosa, Portugal). *Environ. Model. Software* 24: 711–725.
- Falcão M, Vale C. 2003. Nutrient dynamics in a coastal lagoon (Ria Formosa, Portugal): The importance of lagoon-sea water exchanges on the biological productivity. *Cienc. Mar.* 29: 425–433.
- Grasshoff K, Erhardt M, Kremling K. 1983. *Methods of Seawater Analysis*. Verlag Chemie, New York, 419 pp.
- Lopes CB, Lillebø AI, Dias JM, Pereira E, Vale C, Duarte AC. 2007. Nutrient dynamics and seasonal succession of phytoplankton assemblages in a southern European estuary: Ria de Aveiro, Portugal. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 71: 480–490.
- Lorenzen CJ. 1967. Determination of chlorophyll and phaeopigments: Spectrophotometric equations. *Limnol. Oceanog.* 12: 343–346.
- Loureiro S, Newton A, Icely J. 2006. Boundary conditions for the European Water Framework Directive in the Ria Formosa lagoon, Portugal (physico-chemical and phytoplankton quality elements). *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 67: 382–398.
- Martins F, Pina P, Calado S, Delgado S, Neves R. 2003. A coupled hydrodynamic and ecological model to manage water quality in the Ria Formosa coastal lagoon. *Adv. Ecol. Sci.* 18: 93–100.
- Moita TG. 2001. Estrutura, variabilidade e dinâmica do fitoplancton na costa de Portugal continental. PhD thesis, University of Lisbon, Portugal, 272 pp.

CONCLUSIONES

Los resultados confirman que las características químicas de las bocanas de Ria Formosa son influenciadas no sólo por la amplitud de la marea sino también por forzamientos físicos, incluyendo el viento, y por los procesos biológicos que se presentan en la frontera entre las masas de agua.

En este estudio de un ciclo de marea viva realizada en la primavera se mostró la importación de agua a través de la bocana de Ancão, con una importante contribución al complejo sistema de seis bocanas. Las concentraciones de clorofila *a* fueron altas (máximo de $\sim 6 \text{ mg m}^{-3}$) y las de nutrientes bajas. Se observó una importación de clorofila *a*, nitrato y fosfato a la laguna, mientras que el silicato fue el único nutriente que se exportó del sistema.

Los datos únicamente son representativos de las condiciones analizadas y las conclusiones no pueden ser generalizadas. Puesto que este sistema es inestable y variable en el tiempo, los datos pueden cambiar ya sea debido a alteraciones morfodinámicas de la bocana o a la mezcla de las masas de agua por procesos oceanográficos. Para un mejor entendimiento de los transportes netos en la bocana de Ancão y la laguna de Ria Formosa en su conjunto se realizarán estudios adicionales y similares en un futuro próximo con un enfoque tanto espacial como estacional.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue parcialmente apoyado por el Centro de Investigaciones Marinas y Ambientales (CIMA, Portugal). Los autores agradecen a las autoridades marítimas portuguesas, en especial al comandante G Marques-Ferreira, el haber proporcionado el barco para el estudio, así como a Ó Ferreira el haber prestado el ADCM que se usó para medir las corrientes en la sección transversal durante un ciclo completo de marea.

Traducido al español por Christine Harris.

- Neves RJJ, Leitão, JC, Leitão PC. 1994. Ria de Faro: Modelação Matemática da Hidrodinâmica, Validação do Modelo. Tomo 2. LNEC & IST, Lisbon, 13 pp.
- Newton A, Mudge S. 2005. Lagoon-sea exchanges, nutrient dynamics and water quality management of the Ria Formosa (Portugal). *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 62: 405–414.
- Newton A, Icely JD, Falcão M, Nobre A, Nunes JP, Ferreira JG. 2003. Evaluation of eutrophication in the Ria Formosa coastal lagoon, Portugal. *Cont. Shelf Res.* 23: 1945–1961.
- Pacheco A, Ferreira Ó, Williams JJ, Garel E, Dias JA. 2010. Hydrodynamics and equilibrium of a multiple-inlet system. *Mar. Geol.* 274: 32–42.
- Salles P. 2001. Hydrodynamic controls on multiple tidal inlet persistence. PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology and Woods Hole Oceanographic Institution, Massachusetts, 272 pp.

- Silva A, Palma S, Oliveira PB, Moita MT. 2009. Composition and interannual variability of phytoplankton in a coastal upwelling region (Lisbon Bay, Portugal). *J. Sea Res.* 62: 238–249.
- Vila-Concejo A, Matias A, Ferreira Ó, Duarte C, Dias JMA. 2002. Recent evolution of the natural inlets of a barrier island system in southern Portugal. *J. Coast. Res. Spec. Issue* 36: 741–752.
- Vila-Concejo A, Ferreira Ó, Morris BD, Matias A, Dias JMA. 2004. Lessons from inlet relocation: Examples from southern Portugal. *Coast. Eng.* 51: 967–990.
- Williams JJ, Arens B, Aubrey D, Bell P, Bizzaro A, Collins M, Davidson M, Dias J, Ferreira O, Heron M, Howa H, Hughes Z, Huntley D, Jones MT, O'Connor B, Pan S, Sarmiento A, Seabra-Santos F, Shayler S, Smith J, Voulgaris G. 1999. Inlet Dynamics Initiative: Algarve (INDIA). *Proceedings Coastal Sediments 1999*, ASCE, Long Island, New York, USA, 16pp.
- Wooster W, Bakun A, McLain D. 1976. The seasonal upwelling cycle along the eastern boundary of the North Atlantic. *J. Mar. Res.* 3: 131-141.

*Received May 2010,
received in revised form April 2011,
accepted April 2011.*