

Abstract and keywords

Mesoscale features are crucial to understanding marine ecosystems, given that the associated motions determine upper-ocean biogeochemical fluxes. To estimate these fluxes correctly, as well as the relative importance of the various processes involved, ageostrophic velocities, including vertical velocity, which connects the deep ocean to the upper layer, should be accurately determined. Unfortunately, ageostrophic velocities cannot be directly measured, and therefore indirect methods must be used.

The aim of the present doctoral thesis is to establish estimates of the vertical velocities associated with intense mesoscale features, considering their evolution over time and ascertaining the degree of validity of the method most commonly used to diagnose, from routine CTD and ADCP data, vertical motion at mesoscale: the Q-vector form of the quasi-geostrophic omega equation. The study has been carried out in the western Alborán Sea, an ideal place to study mesoscale processes, since the convergence between Mediterranean and Atlantic water masses found in the area gives rise to intense density fronts and energetic mesoscale features, such as two semi-permanent anticyclonic vortices: the western and the eastern Alborán gyres. The intense density front is present in the upper 200 dbar, accompanied by gradients of up to $2\sigma_t$ in 20 km, whereas the associated velocity jet reaches velocities up to 120 cm/s. In this energetic area, the vertical motion obtained, mainly a consequence of the differential advection of vorticity, ranged between 60 m/day and -100 m/day. To address the uncertainty of the computed vertical motion associated with the aliasing of unresolved scales, a sensitivity study of the computed fields to changes in the parameters of the objective analysis was carried out. This sensitivity study showed that the diagnosis presents large uncertainties related to the aliasing of unresolved scales, very important in those cases where the areas of highest advection of vorticity are at the boundaries of the sampled domain. Comparison between the two techniques used to obtain vertical velocities, the Q-vector form of the quasi-geostrophic omega equation and a digital filtering initialization of a primitive equation model, provided an estimate of the error due to the theoretical approach, with differences around 7 m/day, smaller than the uncertainty due to the sampling and observational errors. The fields determined are consistent with the first direct Lagrangian observations of vertical velocity ever done at mesoscale. The correspondence between the diagnosed fields and the estimates from the quasi-isopycnal floats shows that the diagnosed fields give the correct order of magnitude of the vertical motion, and similar spatial and temporal scales for the upwelling and downwelling patches.

The most significant result obtained is that the Q-vector form of the omega equation makes it possible to ascertain correctly, from routinely observed density fields, the sign, order of magnitude, and size of the upwelling and downwelling patches. However, derived magnitudes, such as biogeochemical fluxes, should be interpreted very carefully, since the uncertainty in the diagnosed vertical velocities, due to the aliasing of the unresolved scales, could be critical in some cases.

Keywords: Marine ecosystems, mesoscale, vertical velocity, Alborán Sea, ocean fronts, eddies, upwelling, upper ocean, fertilization, baroclinic motion, water masses, vorticity, advection, omega equation, euphotic layer.

Resumen y palabras clave

Velocidades verticales en un frente oceánico

La comprensión de los ecosistemas marinos requiere conocer el papel que desempeñan las estructuras oceánicas de mesoescala, como frentes, meandros, remolinos y filamentos, ya que los movimientos asociados a ellas ejercen una influencia clave en los flujos biogeoquímicos de la capa superficial oceánica. Para evaluar correctamente estos flujos es necesario determinar las velocidades ageostróficas, y en particular la componente vertical de las mismas, que conecta el océano profundo con la capa eufótica.

El propósito de esta tesis es estimar las velocidades verticales asociadas a estructuras de mesoescala atendiendo a su evolución temporal y evaluar la validez de la ecuación omega en su formulación con el vector Q , comúnmente usada para la determinación de velocidades verticales a partir de datos obtenidos en campañas oceanográficas. Las velocidades verticales se han obtenido recurriendo a dos técnicas: el uso de la ecuación cuasi-geostrófica omega en su formulación con el vector Q y la aplicación de un filtrado digital a los campos de densidad asimilados a un modelo numérico de ecuaciones primitivas. Ambos métodos se han empleado en el mar de Alborán, emplazamiento idóneo para el estudio de procesos de mesoescala. En esta energética zona, caracterizada por un frente en densidad observado en los primeros 200 dbar que alcanza gradientes de hasta $2\sigma_t$ en 20 km y comporta una corriente asociada que adquiere velocidades superiores a los 120 cm/s, el movimiento vertical (principalmente relacionado con la advección diferencial de vorticidad) registró valores comprendidos entre -100 m/día y 60 m/día. El impacto que las escalas espaciotemporales no resueltas producen en los campos de velocidad vertical ha sido investigado evaluando la sensibilidad que demuestran los campos diagnosticados frente a cambios en las variables del análisis objetivo, encontrándose que la incertidumbre asociada a las escalas no resueltas es mayor que el error debido a la aproximación teórica, estimado en cerca de 7 m/día y obtenido de la comparación entre los respectivos campos derivados de la ecuación omega y del filtrado digital. Los resultados muestran que los métodos de diagnóstico originan grandes incertidumbres asociadas a las escalas no resueltas, críticas cuando las áreas de advección de vorticidad se encuentran en los bordes del dominio muestreado. Las comparaciones realizadas entre los campos de velocidad vertical determinados a partir de la ecuación omega y de las medidas directas obtenidas con boyas lagrangianas revelan que las escalas espaciotemporales de ambos son similares y con el orden de magnitud correcto. El resultado más significativo indica que la ecuación omega en su formulación con el vector Q permite determinar fielmente, a partir de los campos de densidad, el orden de magnitud y el signo de la velocidad vertical, así como las escalas espacio-temporales que caracterizan las zonas de afloramiento y surgimiento. Sin embargo, las magnitudes derivadas de la velocidad vertical, como los flujos biogeoquímicos, deben ser interpretadas con extrema cautela, ya que la incertidumbre que origina la alteración producida por las escalas espacio-temporales no resueltas puede ser crítica.

Palabras clave: Ecosistemas marinos, mesoescala, velocidad vertical, mar de Alborán, frentes oceánicos, afloramiento, remolinos, fertilización, movimiento baroclino, masas de agua, vorticidad, advección, ecuación omega, mar Mediterráneo, capa eufótica.