

# SIMULACIÓN NUMÉRICA DE ONDAS INTERNAS EN EL ESTRECHO DE GIBRALTAR.

Carlos PARÉS,

Universidad de Málaga.

El grupo de Ecuaciones Diferenciales, Análisis Numérico y Aplicaciones de la Universidad de Málaga centra su actividad en el desarrollo de simuladores de flujos hidrodinámicos. Esta actividad es llevada a cabo en estrecha colaboración con los grupos de las Universidades de Santiago de Compostela y Sevilla, dirigidos por los doctores Elena Vázquez y Tomás Chacón respectivamente. El software que genera esta actividad está siendo integrado en el paquete *Damflow*, que, en su estado actual de desarrollo, permite resolver sistemas de ecuaciones de una o dos capas superpuestas de aguas someras, así como el sistema de ecuaciones primitivas (ver <http://www.damflow.org>). El objetivo final es la puesta a punto de simuladores eficaces de flujos geofísicos, aplicables al modelado de flujos en canales, ríos, rías, puertos, estuarios, estrechos, etc. . .

Una de las principales aplicaciones oceanográficas previstas es la puesta a punto de un modelo bien contrastado del flujo marino a través del Estrecho de Gibraltar. Aparte del evidente interés medioambiental, estratégico, socioeconómico y humanitario que tiene toda contribución a un mejor conocimiento de dicho flujo, desde el punto de vista oceanográfico y climatológico el papel que juega el Estrecho en la dinámica global del planeta es muy relevante. Además, la riqueza de fenómenos de distinta escala y naturaleza que aparecen en dicho flujo, hacen que su simulación sea un problema interesante y estimulante en sí mismo desde el punto de vista del Análisis Matemático y Numérico. Ya en la Escuela de Otoño Hispano-Francesa que tuvo lugar en Sevilla, en el año 1994, el profesor Jacques-Louis Lions destacó estos aspectos en su conferencia, al tiempo que mostraba una transparencia con una foto satélite del Estrecho, en la que vimos por primera vez las impresionantes ondas que se producen en la zona. El estímulo del profesor Lions, junto al apoyo continuo del profesor Antonio Valle, han sido fundamentales en el desarrollo de nuestras tareas de investigación en este tema desde entonces.

El marco oceanográfico en el que se inscribe el Estrecho de Gibraltar viene caracterizado por el hecho de ser nexo de unión entre dos cuencas de características netamente diferentes: las aguas menos salinas del Atlántico entran por la superficie y, según se distribuyen por la cuenca mediterránea, se tornan más densas por efecto de la evaporación. Parte de estas aguas vuelven al Atlántico como aguas intermedias, en tanto que otra parte se transforma en aguas mediterráneas profundas. Junto a esta tendencia secular, los flujos a través del Estrecho también se caracterizan por la existencia de fuertes variabilidades de carácter interanual y estacional.

Entre las principales causas de estas variabilidades cabe destacar el efecto de las mareas. La diferencia entre la amplitud de las mareas en las cuencas atlántica y mediterránea genera fuertes corrientes a través del Estrecho, en dirección oeste en los momentos de marea baja y este en los de marea alta. Estas corrientes interactúan con el fondo y la costa, induciendo fluctuaciones de gran amplitud en la interfaz entre aguas atlánticas y mediterráneas. Estas fluctuaciones, cuyas huellas visibles en la superficie del mar recogen las fotos satélites, pueden evolucionar

como enormes *bores* o frentes internos que se propagan hacia el este y que, una vez superada la sección de mínima profundidad, pueden desintegrarse en trenes de ondas internos.

En una primera etapa, hemos considerado modelos que parten de la representación del flujo marino en la zona de estudio mediante dos capas superpuestas de fluidos inmiscibles de densidad constante y diferente. Las ecuaciones correspondientes a cada capa de fluido se simplifican mediante la hipótesis de presión hidrostática y, posteriormente, se integran verticalmente, obteniéndose un sistema de ecuaciones de tipo aguas someras acoplados. Aunque estos modelos presentan limitaciones importantes, permiten simular con precisión un buen número de fenómenos asociados a la dinámica de la interfaz, con un coste computacional netamente inferior al de un modelo tridimensional basado en las ecuaciones primitivas.

A fin de estudiar la potencialidad de los esquemas que se desarrollan para aproximar correctamente las variaciones abruptas de la interfaz, en esta etapa no se incluyen los efectos de la viscosidad en las ecuaciones. En consecuencia, las ecuaciones a resolver son de naturaleza hiperbólica y los bores son representados mediante discontinuidades de sus soluciones. Estas ecuaciones presentan un buen número de dificultades, tanto desde el punto de vista del análisis como de la aproximación numérica: aparición de productos no conservativos, posible pérdida del carácter hiperbólico relacionada con la aparición de inestabilidades de Kelvin-Helmholtz, etc. . .

En la conferencia, presentaremos inicialmente un modelo numérico unidimensional que permite la simulación de flujos a través de canales simétricos con geometría irregular. A fin de aplicar el modelo al Estrecho, en primer lugar se genera, a partir de datos batimétricos reales, un canal simétrico *equivalente* a la geometría del Estrecho en un sentido que se precisará. En esta geometría simplificada se obtiene, en primer lugar, una solución estacionaria a partir de un experimento de tipo *lock-exchange*: se parte de una condición inicial en la que las aguas atlánticas y mediterráneas están separadas artificialmente por una presa situada en la zona de mínima anchura. A continuación, tomando esta solución estacionaria como condición inicial, se simulan los efectos de la marea mediante la imposición de condiciones de contorno construidas a partir de observaciones in situ. Presentaremos resultados numéricos que muestran la evolución de la interfaz a lo largo de un ciclo completo de marea.

Finalmente, presentaremos algunos resultados obtenidos con un modelo bidimensional, cuyo desarrollo se encuentra en una fase muy avanzada.