

# Desarrollo de un sistema predictivo de apoyo a la toma de decisiones para la planificación naval, operaciones y maniobras: Proyecto SIAAMETOC

**Autores:** Alejandro Ortega Felipe, Armada española, Instituto Hidrográfico de la Marina; Gabriel Díaz-Hernández, Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria (IHCantabria).

**Palabras clave:** Predicción, Alerta temprana, Operaciones navales, Meteorceanografía operacional.

**Líneas I+D+i ETID relacionadas:** 11.1.1.

## Introducción

El proyecto SIAAMETOC (Sistema Integrado Automático de Apoyo Meteorológico-Oceanográfico para Operaciones Marítimas), responsable de la identificación, análisis y explotación de datos meteorológicos y oceanográficos disponibles a nivel mundial, tiene como propósito adaptar e interpretar automáticamente esta información para apoyar de manera confiable, eficiente y realista las misiones y operaciones marítimas del Ministerio de Defensa de España y en concreto de la Armada española.

Se trata de un proyecto de investigación, desarrollo e innovación aplicado al uso militar, elegido dentro del programa COINCIDENTE 2018 y desarrollado al completo por el Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria, en colaboración con el Instituto Hidrográfico de la Armada entre 2019-2021, que da respuesta a la necesaria automatización de procesos que permiten obtener información medioambiental específica para las operaciones navales de la Armada española y diferentes escenarios y misiones.

El sistema está adaptado conforme a la doctrina OTAN, a los procedimientos empleados en el Apoyo REA

(*Rapid Enviromental Assessment*) y a los medios de la Armada española actuales.

Tras la primera fase del proyecto, y dado el éxito en su aplicación en entorno real, los objetivos fueron ampliados hacia una segunda fase a lo largo del período de 2021-2023 para aplicativos útiles a:

### *Operaciones de MCM (Medidas Contra Minas)*

Para proporcionar información ambiental en el proceso de decisión al mando en las operaciones de la Primera Escuadrilla de Medidas Contra Minas, MCM, en todas sus facetas (SIAAMETOC-MCM).

### *Operaciones de Superficie*

Módulo orientado a generar información medioambiental para los trabajos hidrográficos y medios específicos para la adquisición de datos batimétricos (SIAAMETOC-SUP).

### *Módulo de Vehículos Autónomos*

Módulo orientado a proporcionar información Geometoc para despliegue de equipos no tripulados USV (*Unmanned Surface Vehicles*), que emplea el Instituto Hidrográfico de la Marina, y para la adquisición de datos batimétricos en zonas costeras (SIAAMETOC-AUT).

Actualmente el SIAAMETOC ya está siendo utilizado por la Armada española, aunque el recorrido de su empleo y experiencias previas se remonta desde 2017 con la versión beta original Sopra, que fue

el primer antecedente de este sistema. Destacar el despliegue del DEDALO23, que fue empleado en el Mediterráneo con más de diez escenarios diferentes y en operaciones reales como el terremoto de Turquía, en el que la Armada tuvo un papel importante para la asistencia inmediata en los primeros días después del seísmo. Asimismo, también se ha empleado durante el 2023 en todas las navegaciones y operaciones, tanto de MCM como en los buques hidrográficos, en sus respectivas campañas y misiones.

El proyecto está en un estado maduro de desarrollo y está previsto ampliarlo a un nuevo módulo que dará un salto cualitativo tanto en su estructura como en las nuevas capacidades y fuentes de información meteoceanográficas disponibles, al dotar al sistema de potentes herramientas SIG (Sistemas de Información Geográfica) y generar productos vectoriales con los últimos estándares, tanto cartográficos como de información Geometoc.

Este sistema operacional, en sí mismo, es un proyecto único y de gran innovación que está demostrando su utilidad para mejorar los procesos de decisión del mando, tanto en seguridad como para asegurar el éxito de las operaciones navales.

## Carácter innovador del proyecto

Las innovaciones alcanzadas tras la finalización del proyecto se basan en las nuevas necesidades de la Armada, tanto en las futuras misiones como en los medios a emplear para su desarrollo. La alta tecnificación de

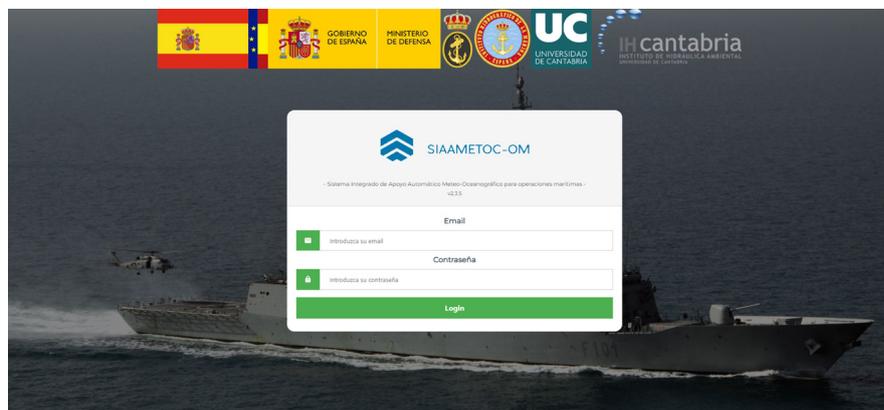


Figura 1. Portada principal del aplicativo-sistema climático web del proyecto SIAAMETOC (fuente: proyecto SIAAMETOC)

los medios de la Armada exige que el SIAAMETOC en sí mismo tenga también una alta tecnificación que le permita unificar e integrar la información en los sistemas de mando y control de las unidades. La diversidad de estos sistemas es lo que le confiere un valor único, ya que permite operar tanto en el ámbito de la Armada española como en organismos internacionales como la OTAN.

Los avances y medios disponibles para este fin han mejorado exponencialmente gracias a centros de investigación de ingeniería oceanográfica y costera que se han especializado para el desarrollo y planificación de zonas costeras y portuarias. Es hora de aplicar estos avances para generar una herramienta robusta, moderna y fiable que permita abarcar cualquier escenario en cualquier parte del mundo, y minimizar la cascada de incertidumbres inherente a este tipo de soluciones.

Técnicamente, las herramientas desarrolladas en este proyecto se basan en la denominada estrategia de regionalización predictiva y espacial del oleaje (también conocida como *downscaling* de oleaje con un enfoque predictivo o *forecast*), que se encarga en conocer cuáles van a ser las condiciones futuras de oleaje, viento y corrientes en la playa para poder anticipar y planificar con la mayor eficiencia posible, el momento exacto de un desembarco anfibio.

Para ello, se debe partir de una escala global (zona de aguas profundas, también denominada *offshore*) y trasladar dicha información a una escala regional (una playa, una zona costera concreta, etc.), hasta llegar a obtener las condiciones del oleaje y corrientes un punto de interés. Finalmente, estas variables fundamentales se cruzan con el índice MSI, tradicionalmente, es decir, permiten inferir la factibilidad de la operación de desembarco anfibio en dicho punto. Por tanto, el problema con el que se trabaja presenta varias escalas espaciales con las que trabajar: global, regional y local o de detalle.

El desarrollo de las técnicas y recursos computacionales en las últimas décadas ha motivado la creación de modelos numéricos avanzados que se encargan de propagar cada vez

mejor el oleaje en diferentes profundidades, por lo general desde aguas indefinidas o profundas, hasta la zona costera, teniendo en cuenta los principales procesos de transformación del oleaje tales como la refracción, difracción, asomeramiento, disipación por rotura y generación de corrientes en costa.

En el presente proyecto se ha apostado por aportar un importante grado de mejora, modernidad e innovación al mismo concepto que se ha venido planteando, pero esta vez elevado a un nivel absolutamente superior, con respecto a las herramientas de propagación de oleaje y corrientes, a las herramientas de integración de los distintos forzamientos de oleaje y viento, y a las herramientas de integración de bases de datos, pre y post proceso (no solo basados en el índice MSI, sino incluyendo nuevos productos como la varada, navegabilidad, análisis predictivo de la operatividad en embarcaciones anfibia, etc.) y visualización profesional de resultados, a través de una interfaz gráfica de usuario (GUI) que automatice todos y cada uno de los complejos procesos de pre análisis de las fuentes de datos disponibles, adaptación de estas, forzamiento, encadenamiento y acoplamiento entre modelos numéricos y generación de informes automatizados de utilidad para el oficial METOC.

En concreto, el proyecto culmina en un aprovechamiento y explotación de datos meteoceanográficos preexistentes y que, debido a las variables involucradas de oleaje y viento específicamente, son susceptibles de ser empleados en la cuantificación de procesos asociados al diseño funcional y estructural de elementos marinos, costeros y portuarios.

Por último, cabe destacar el carácter innovador del presente proyecto, que ha alcanzado un grado de madurez tecnológica (con niveles TRL 7 u 8), y el carácter integrador de su arquitectura bajo una misma GUI. Por ello se considera que el presente proyecto supone un importante salto cualitativo para la gestión y conocimiento temprano en el ámbito METOC asociado a las operaciones y misiones militares marítimas españolas y a nivel mundial.

### Objetivo del proyecto

Durante los años de desarrollo del proyecto, SIAAMETOC ha alcanzado los siguientes objetivos:

- Desarrollo de un sistema/interfaz web para la obtención de forzamientos históricos (*hindcast*) y predictivos (*forecast*) para las variables de viento, oleaje y nivel del mar, sobre bases de datos de fuentes oficiales existentes a nivel global.
- Desarrollo de una GUI que permita la regionalización automática del oleaje, en los ámbitos históricos y predictivos, basado en el uso de modelos numéricos y técnicas estadísticas.
- Obtención de productos específicos para las operaciones navales. En concreto está concebido para las operaciones anfibia en playa y de navegación.
- Validación instrumental del sistema en costa real en la playa del Retín, a través de una campaña de campo.
- Desarrollo de una interfaz gráfica que permita la gestión y ayuda a la toma de decisiones para el atraque seguro de las unidades de desembarco de los buques anfibia.

Además, el proyecto SIAAMETOC establece un plan de formación para personal del IHM y operadores de las unidades embarcadas, con respecto al uso de las interfaces y módulos desarrollados y descritos antes.

### Arquitectura del sistema

El proyecto SIAAMETOC representa un hito significativo en el desarrollo de tecnologías de la información y la comunicación (TIC) aplicadas al ámbito militar. Este sistema innovador se ha convertido en un activo fundamental para el Instituto Hidrográfico de la Marina (IHM-METOC) y los Grupos Navales de Playa (GNP), al proporcionar una evaluación ambiental rápida y precisa mediante la adaptación e interpretación automatizada de datos meteorológicos y oceanográficos a nivel global.

Este proyecto se enmarca en las líneas del área 11, Tecnologías de la Información, Comunicaciones y Simulación, de la Estrategia de Tecnología e Innovación para la Defensa

## En profundidad

(ETID). En particular, aborda la línea 11.1.1 de investigación, desarrollo e innovación (I+D+i), Funcionalidades avanzadas de los sistemas de mando y control (C2) para la planificación y conducción de operaciones militares, proporcionando herramientas mejoradas y automatizadas que apoyan la toma de decisiones a nivel estratégico, operacional y táctico.

Además, el proyecto SIAAMETOC se alinea con los objetivos de investigación relacionados con el análisis inteligente de fuentes abiertas y la explotación inteligente de múltiples fuentes de información. Mediante el desarrollo de soluciones tecnológicas innovadoras, este sistema permite la extracción automática de información crucial a partir de fuentes abiertas de datos, contribuyendo así a la creación de inteligencia militar para respaldar la toma de decisiones en diversos dominios de interés para la defensa.

Asimismo, el proyecto SIAAMETOC promueve la interoperabilidad entre simuladores, una capacidad vital para el adiestramiento avanzado mediante simulación. Al implementar estándares de interoperabilidad, este sistema facilita la integración de diferentes simuladores, permitiendo la realización de ejercicios combinados que amplían las capacidades de adiestramiento y promueven una mejor conciencia situacional del campo de batalla.

En resumen, el desarrollo arquitectónico del proyecto SIAAMETOC representa un avance significativo en la aplicación de tecnologías de vanguardia para mejorar la eficiencia, fiabilidad y realismo de las operaciones marítimas militares, al tiempo que cumple con los objetivos estratégicos de investigación y desarrollo en el ámbito de las TIC y la simulación para la defensa.

Específicamente, el proyecto introduce cuatro productos innovadores, todos integrados en dos interfaces fundamentales: un aplicativo web que gestiona las distintas fuentes de datos meteoceanográficos y una GUI de escritorio que permite su aplicación directa, automatizada y expedita en las misiones y operaciones marítimas involucradas, facilitando los procesos de toma de decisiones. Estos productos incluyen:

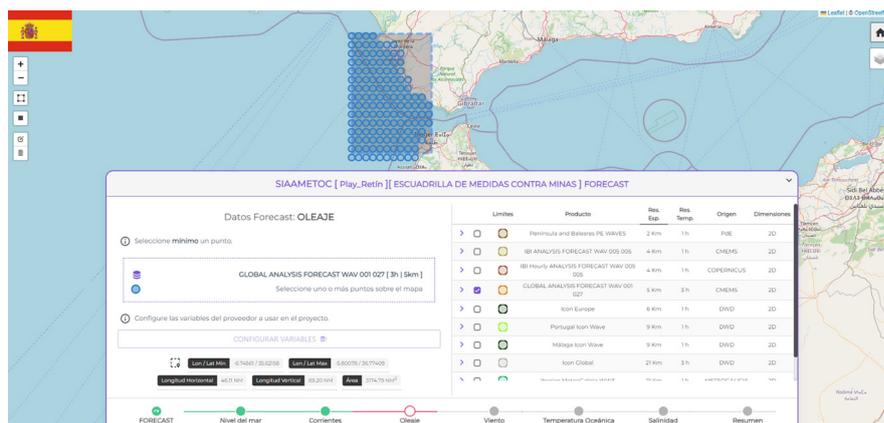


Figura 2. Ventana de acceso, normalización, homogeneización y bajada de las bases de datos climática y predictivas a través de un sistema SIG (fuente: proyecto SIAAMETOC)

- Conocimiento histórico del clima marítimo y funcionamiento dinámico de cualquier área marítima/costera de interés.
  - Planificación temprana y segura de maniobras de desembarco anfibio, planificación de búsqueda de minas y apoyo para la gestión de vehículos autónomos en cualquier área oceánica y costera del mundo.
  - Planificación predictiva para el varado en playa (desembarco anfibio) y la navegación desde el buque anfibio hasta la zona costera.
  - Gestión y apoyo a la decisión para el atraque seguro de unidades de desembarco dentro de buques anfibios.
- A continuación, se presenta una breve descripción de cada uno de estos aplicativos como productos fundamentales del sistema SIAAMETOC, los cuales obedecen a los siguientes lineamientos de calidad y diseño arquitectónico:
- Robusto  
El programa no puede fallar durante la ejecución.
  - Adaptable  
Tiene que poder funcionar bajo estructuras tanto nacionales como ajenas a la Armada para poder recibir los datos de alimentación inicial.
  - Relocalizable  
Es un programa que debe tener la capacidad de poder trabajar en cualquier zona oceánica/costera a nivel global. Esto implica que se debe garantizar la potencia del uso en el análisis histórico y predictivo.
  - Realista  
El programa debe de ajustarse a la realidad física de los procesos a resolver.
  - Conectividad  
El programa tiene que estar adaptado a las limitaciones de ancho de banda de internet/13D y tener la capacidad de recibir la información de contorno actualizada conforme el proyecto de la zona de operaciones. La arquitectura presentada del proyecto ya tiene en cuenta esta consideración.
  - Operativo  
El programa está pensado para ser manejado en las propias unidades y por personal tanto de cualificación técnica media-alta (parte de clima) como de baja cualificación (parte de predicción), quedando reducido su uso a operador de la aplicación e interpretación básica de los productos generados.
  - Automático  
Es el fundamento básico del proyecto pues la gestión programada y la automatización de los procesos es lo que permite la simplificación de un proceso complejo en obtención de la información útil para las unidades en las operaciones.
  - Fiable (incertidumbres)  
Es muy importante conocer los umbrales de incertidumbre en toda la cadena de procesos que el sistema considera. Por tanto, se tiene que documentar una estimación general de las incertidumbres asociadas a cada subparte (fuentes de información, batimetría, modelación numérica, postproceso, etc.).

### Aplicativo web

Corresponde al primer producto a nivel usuario final del proyecto, que

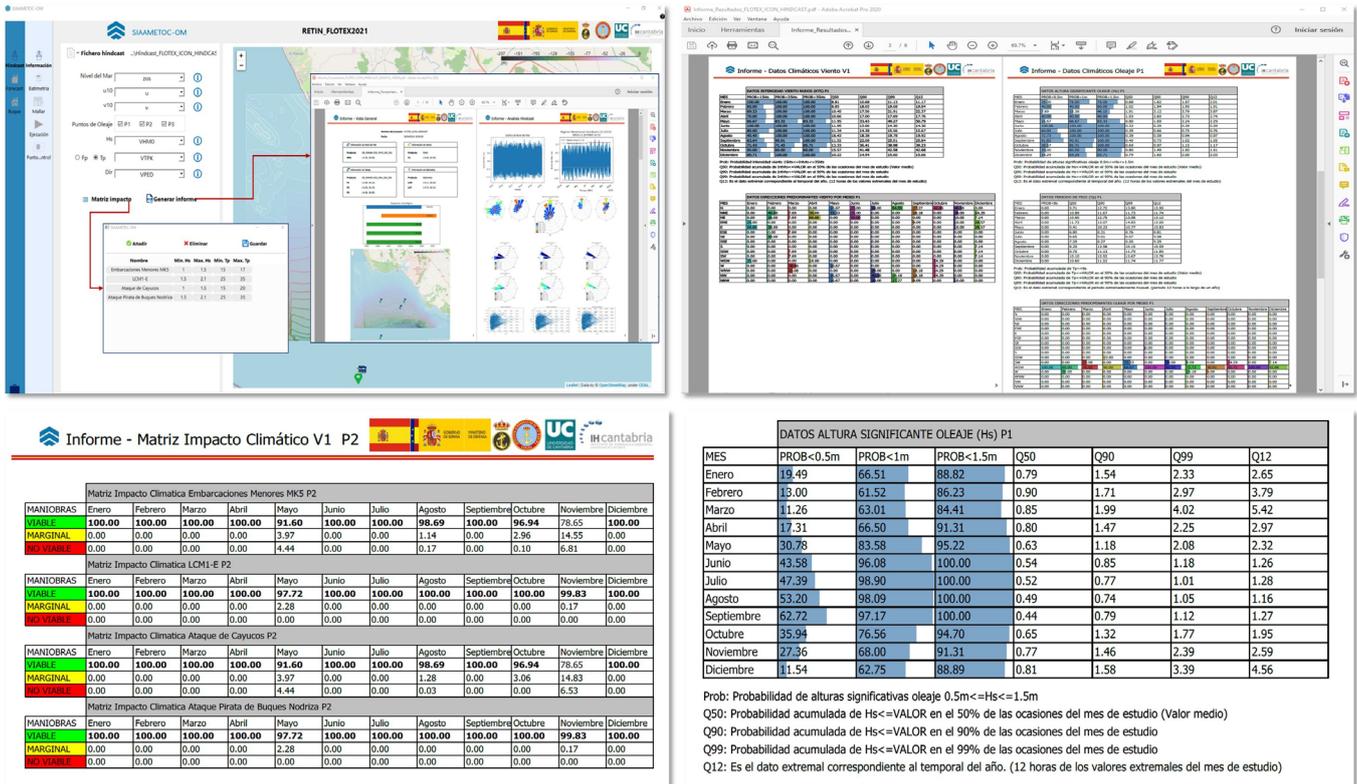


Figura 3. Ejemplo de la salida de resultados (briefing) a nivel climático de utilidad para una maniobra de desembarco anfibio (fuente: proyecto SIAAMETOC)

permite el acceso, visualización y descarga de las bases de datos climáticas para el hindcast y forecast (ver figura 1).

El objetivo del aplicativo web es permitir que el oficial METOC pueda acceder de manera eficiente a un amplio catálogo de bases de datos climáticas y a nivel global, con base en una navegación amigable a nivel cartográfico (aportado por un Sistema de Información Geográfico o SIG), en donde el usuario puede acceder a todas y cada una de las bases de datos abiertas y disponibles en la actualidad.

El valor de este módulo es su capacidad de homogeneizar espacial y temporalmente el gran cúmulo de variables, datos y fuentes de información que se encuentran disponibles pero desagregadas, con accesos dispares y que requieren compleja algoritmia para su acceso, visualización y descarga.

Este módulo, coloquialmente denominado como cerebro climático permite la realización de las siguientes tareas concretas:

- Identificar todas y cada una de las bases de datos meteorológicas

necesarias para cubrir los requerimientos de gestión de los módulos (por ejemplo, oleaje, viento, nivel del mar, corrientes, techo de nubes, visibilidad, viento en capas...). Las bases de datos identificadas, preferiblemente, presentan características de uso libre (ver figura 2).

- Introducir todas y cada una de las bases de datos identificadas al sistema (a través del protocolo DATAHUB) y automatizar las llamadas a las bases de datos, trabajando con los formatos estándar (nc, .grib2, .txt, .dat, .csv).
- Actualizar el menú integrado en la interfaz de la aplicación con base en las nuevas variables a integrar, debiendo permitir la libre elección de las fuentes de datos disponibles.
- Incluir en la interfaz la zona geográfica de trabajo y los puntos de interés para la obtención de los datos y las mallas disponibles de las fuentes de datos.
- La cobertura global.
- Proporcionar la posibilidad de conocer incertidumbres y saber detalles de calidades de datos de entrada, así como la distancia del dato elegido en origen y el de interés.
- Homogeneizar las series temporales de forma automática, entre las

distintas fuentes de datos para los distintos productos.

- Acceder a las bases de datos de dos modos posibles: mediante acceso al servidor de descarga simultánea o mediante la importación de los datos previamente suministrados por el usuario o descargados de otras fuentes en específico para la zona de operaciones.

**Aplicativo de escritorio**

El aplicativo de escritorio aprovecha la información meteorológica que el módulo web (cerebro climático) aporta (tanto hindcast como forecast) para transformarla en distintos productos climáticos de especial interés para la Armada, todo ello a través de una plataforma encadenada de procesos, métodos, modelos numéricos y herramientas de postproceso, diseñadas para este fin y a la medida de las necesidades de proyecto.

La idea es que el aplicativo GUI quede instalado tanto en las oficinas METOC como en los buques de apoyo a las diferentes maniobras, de tal forma que los oficiales METOC, tanto en tierra como en buque, sean capaces de



tierra, con apoyo y protección proporcionados por una FN.

- Entrada inicial o establecimiento de operaciones de fuerza, aprovechando la versatilidad de la FN.

Por lo tanto, se desea trasladar a la comunidad científica y técnica los pormenores generales del proyecto, así como poder contar, de primera mano, esta interesante experiencia, dando énfasis en las aplicaciones en entorno real que en las que el sistema SIAAMETOC se ha venido empleando, además de destacar su actual estado en fase de expansión, hacia otros aplicativos, funcionalidades y módulos futuros de alto interés para la Armada española.

### Futuro

Una de las bases fundamentales del sistema SIAAMETOC, en general, es el establecimiento de una nueva filosofía de trabajo con base en una arquitectura modular, que permita ser adaptada a futuros apoyos y operaciones adicionales que sean de interés a la Armada española. Esta filosofía pretende conseguir, de una forma relativamente directa y sencilla, la creación de nuevos módulos a demanda del propio Ministerio de Defensa para lograr concretar en nuevos productos tangibles que logren enriquecer al sistema general.

De esta forma, el ecosistema SIAAMETOC crecerá y permitirá ampliar su horizonte de aplicabilidad en productos de especial interés y relevancia para la Armada española, con un alto componente de I+D+i.

Se pretende que, durante el 2024, se realice una tercera fase del sistema SIAAMETOC que continúa con la misma estructura de funcionamiento, pero con un cambio de estructura interno que le permitirá integrar en los siguientes años nuevas funcionalidades bajo una estructura GIS con *plugins* e información añadida que le permite estar actualizado, ser flexible y robusto.

### Actualizaciones en la arquitectura del sistema

- Migración a una arquitectura/sistema (*Geographical Information System*) GIS basada en el sistema ESRI-ARGIS-PRO como base, pero manteniendo la estructura

inicial SIAAMETOC modular y con la finalidad de generar productos Geometoc vectoriales en los diferentes formatos para múltiples plataformas.

- Generación de formatos vectoriales y ráster para integrar los productos en aplicaciones GIS para inteligencia u otros usos.
- Mejoras de los informes automatizados en PDF con gráficos mejorados.
- Formatos específicos para la cartografía náutica S-100 y AMLs en la OTAN.
- Duplicación y redundancia del aplicativo *web* de información meteorceanográfica en servidores del Instituto Hidrográfico de la Marina.
- Mantenimiento y actualización del aplicativo *web* de información meteorceanográfica durante el tiempo de proyecto. Mejoras en las bases de datos meteorceanográficas tanto de clima como de *forecast* con nuevas herramientas que le dotan de mayor precisión en las salidas operacionales.
- Integración en la nube de la información disponible en el IHM tales como datos instrumentales preexistentes, cartográficos, vectoriales, etc.
- Integración en la nube de nuevos datos a ser adquiridos en el futuro con sistemas de medición (boyas, sistemas de medición de oleaje instalados en el buque) y equipos no tripulados (UUVs, USVs).
- Integración en la nube de la información creada en cada proyecto conforme se vaya empleando el sistema en las futuras maniobras, de utilidad para el módulo de optimización/asimilación/aprendizaje.

### Inclusión de nuevas bases de datos

- Nueva base de datos climáticas (reanálisis) de corrientes 3D aplicados a operaciones MCM, operaciones de superficie y USVs para zonas pre-seleccionadas.
- Nueva base de datos climática (reanálisis) de viento de media-resolución (1 km) para zonas preseleccionadas.
- Nueva base de datos climática (reanálisis) de viento de media-resolución (1 km) para zonas preseleccionadas en la Antártida.
- Nueva base de datos climática (reanálisis) de oleaje de media-resolución (1/2 km) para zonas preseleccionadas en la Antártida.

- Sistema predictivo (*forecast*) de oleaje y viento en latitudes extremas en la Antártida para operaciones en las bases antárticas españolas.

### Creación de nuevos módulos

- Introducción a mallas no estructuradas para la ejecución del modelo SWAN.
- Creación en tiempo real de una regionalización numérica (*downscaling*) de viento de media-resolución (1 km a 1/2 km), a través del uso y ejecución del modelo WRF.
- Aplicación de vertidos y derrames de combustible en las bases navales españolas y a nivel global (mar Mediterráneo, Báltico e Índico).
- Aplicación de obtención de trayectorias de hombre al agua a nivel global.
- Aplicación de trayectorias probables de minas.
- Aplicación de operaciones de buceo.
- Aplicación de obtención de líneas de costa y batimetrías costeras operacionales mediante imagen satelital.
- Creación de un módulo de asimilación automática y aprendizaje del dato, tanto medido como almacenado por la propia herramienta, con el objetivo de conocer, reducir y controlar la incertidumbre de los resultados en las operaciones.
- Aplicación de diques. Asesoramiento en tiempo real de minimización de los oleajes en tiempo real a partir de modelos numéricos lineales y de los datos medidos en tiempo real por los sensores de oleajes a bordo del Juan Carlos I, Castilla y Galicia.
- Introducción de mapas de impactos operacionales debido al cambio climático en operaciones navales a nivel global.
- Aplicación para operaciones terrestres e Infantería de Marina.
- Aplicación para operaciones especiales (superficie y submarinas).
- Documentación de cada módulo, manual y curso de capacitación.

### Referencias

- [1] Jarauta, J. (2013). Soberanía nacional en las radiocomunicaciones militares. *Boletín de Observación Tecnológica en Defensa*. Madrid, Ministerio de Defensa. 40, tercer trimestre de 2013, pp. 20-21.