

Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

Evaluador Inteligente para el Simulador de Navegación (SIMNAV)

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Rodrigo García Gregori

DIRECTORES: José Ignacio Valles Cancela

José Antonio González Prieto

CURSO ACADÉMICO: 2025-2026

Universidade Vigo



Centro Universitario de la Defensa
en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

Evaluador Inteligente para el Simulador de Navegación (SIMNAV)

Grado en Ingeniería Mecánica

Intensificación en Tecnología Naval

Cuerpo General

Universidade Vigo

RESUMEN

La formación práctica en navegación exige herramientas que permitan reproducir con fidelidad situaciones reales. En este marco, el Simulador de Navegación de la Escuela Naval Militar (SIMNAV) constituye un recurso clave para el adiestramiento de los futuros oficiales de la Armada. Sobre esta base, se desarrolla un evaluador inteligente orientado al análisis automático, objetivo y homogéneo de la seguridad de las maniobras ejecutadas durante dichos ejercicios.

El sistema se aplica a los entornos de Ferrol y Rota y se apoya en el procesamiento de los datos generados por el buque propio y por los contactos presentes en el escenario. La solución se estructura en dos bloques complementarios. El primero se centra en la evaluación de la seguridad en la navegación respecto a la derrota prevista, mediante el análisis del seguimiento de la ruta, la permanencia dentro de corredores de seguridad y la proximidad a zonas de riesgo. El segundo aborda el análisis automático de encuentros con otros buques, a partir del estudio de parámetros cinemáticos y de la identificación de situaciones de interacción relevantes para la seguridad de la navegación.

Para ello, se emplean métricas cuantitativas combinadas con criterios expertos y parámetros configurables. El resultado se materializa en informes automáticos e interpretables, que integran métricas, representaciones gráficas, comentarios explicativos y recomendaciones de mejora.

PALABRAS CLAVE

Simulador, Evaluación Automatizada, Seguridad en la Navegación, Retroalimentación, Formación Naval

AGRADECIMIENTOS

A mi familia por su apoyo incondicional en cada una de mis decisiones y por la educación que me han brindado, base fundamental de todo lo que soy y he logrado.

A mis amigos, por haber estado a mi lado en todo momento y por su apoyo constante en cada etapa del camino.

Al CC José Ignacio Valles Cancela, por su trabajo, constancia y dedicación durante todo el desarrollo del proyecto, y por aportar siempre una solución ingeniosa a cada problema que surgía durante su realización.

A Francisco Félez Esteban, de ADDocean Technologies, por su plena disponibilidad, su ayuda constante y su valiosa colaboración durante el desarrollo de este trabajo.

CONTENIDO

Contenido 1
Índice de Figuras 7
Índice de Tablas 9
Índice de Ecuaciones 10
1 Introducción y objetivos 11
1.1 Contexto y relevancia de la evaluación automatizada en los simuladores 11
1.2 Enfoque del trabajo: evaluador inteligente integrado en el SIMNAV 11
1.3 Métricas objetivas y criterio experto como base de la evaluación 12
1.4 Evaluación equivalente y criterios modificables 12
1.5 Aportación del sistema al proceso formativo 12
1.6 Objetivos 13
1.6.1 Objetivo general 13
1.6.2 Objetivos específicos 13
2 Estado del arte 15
2.1 Contexto y motivación 15
2.1.1 Necesidad de prácticas seguras en la formación en navegación 15
2.1.2 Marco normativo y uso de simuladores en la enseñanza marítima 15
2.1.3 El simulador de navegación como herramienta formativa avanzada 16
2.1.4 Experiencias institucionales y valor de la simulación 17
2.1.5 Plataformas de simulación en la Escuela Naval Militar 17
2.1.6 Plataformas de simulación en la US Navy (Marina Estadounidense) 19
2.1.7 Plataformas de simulación en la Marine Nationale (Marina Francesa) 20
2.1.8 Limitaciones de los métodos de evaluación tradicionales 20
2.1.9 Evaluación actual del SIMNAV 21
2.1.10 Motivación del Trabajo de Fin de Grado 22
2.2 La simulación en la formación académica para la navegación 22
2.2.1 La simulación como herramienta pedagógica fundamental 22
2.2.2 Marco normativo y evolución tecnológica de los simuladores 23
2.2.3 Beneficios formativos y aplicación en el ámbito militar 23
2.3 Plataformas comerciales y coste/instalación 24
2.3.1 Simuladores de navegación de misión completa (full-mission) 24
2.3.2 Simuladores de escritorio como alternativa de menor coste 25
2.3.3 Consideraciones económicas y tendencias actuales 25
2.4 Normativas y estándares de navegación 26

2.4.1 Normas internacionales de navegación y formación marítima....26
2.4.2 Estándares de gestión y soporte tecnológico en entornos de simulación....27
2.5 Planificación y cálculo de rutas marítimas....28
2.5.1 Proceso operativo de planificación de rutas....28
2.5.2 Herramientas y métodos de planificación de rutas....28
2.5.3 Relevancia de la ruta planificada en simuladores de navegación....29
2.6 Integración de la ruta planificada en simuladores y apoyo al aprendizaje....29
2.6.1 Integración de la ruta planificada en simuladores de navegación....30
2.6.2 Apoyo al aprendizaje y análisis posterior del ejercicio....30
2.7 Evaluación del desempeño del alumno en la simulación....30
2.7.1 Enfoques tradicionales de evaluación en simuladores marítimos....30
2.7.2 Limitaciones de la evaluación subjetiva y necesidad de objetivación....31
2.7.3 Uso de métricas objetivas y sistemas de apoyo a la evaluación....31
2.8 Lógica difusa para evaluación formativa de rutas y maniobras....32
2.8.1 Fundamentos de la lógica difusa aplicada a la evaluación en la navegación....32
2.8.2 Aplicaciones de la lógica difusa en la evaluación de maniobras y rutas....33
2.8.3 Modelado difuso mediante funciones de pertenencia....34
2.9 Conclusiones del estado del arte....34
3 Desarrollo del TFG....37
3.1 Enfoque metodológico de la Evaluación....37
3.1.1 Caracterización del criterio de seguridad en la navegación....37
3.1.2 Objetivos de la encuesta....37
3.1.3 Diseño del cuestionario....38
3.1.3.1 Preguntas generales....38
3.1.3.2 Escenarios de encuentro específicos....39
3.1.4 Perfil de los encuestados....39
3.1.5 Análisis e interpretación de los resultados de la encuesta....40
3.1.5.1 Consideraciones sobre la muestra y el tratamiento de datos....40
3.1.5.2 Resultados principales y análisis interpretativo....40
3.1.5.2.1 Maniobra apreciable: cambio de rumbo y cambio de velocidad....40
3.1.5.2.2 Distancia de intervención cuando el buque obligado no maniobra....41
3.1.5.2.3 Clasificación por tamaño del buque (pequeño, mediano y grande)....42
3.1.5.2.4 Distancias mínimas de vigilancia en aguas libres y aguas restringidas....42
3.1.5.2.5 Análisis de resultados sobre el DCPA....43
3.1.5.3 Conclusiones del análisis de la encuesta....44
3.2 División del sistema evaluador....44

3.3 Entorno de desarrollo y herramientas empleadas....44
3.3.1 Lenguaje de programación....45
3.3.2 Entorno de ejecución....45
3.3.3 Librerías utilizadas....45
3.3.3.1 Pandas....45
3.3.3.2 NumPy....45
3.3.3.4 Cartopy....46
3.3.3.5 Otras librerías auxiliares....46
3.3.4 Filosofía de diseño del sistema....46
3.4 Desarrollo del evaluador automático de seguridad en la navegación....47
3.4.1 Contexto doctrinal y justificación....47
3.4.2 Desarrollo y obtención de datos....48
3.4.2.1 Carga de capas geoespaciales....48
3.4.2.2 Homogeneización del sistema de referencia espacial....48
3.4.2.3 Definición del área de interés y delimitación de las capas....48
3.4.2.4 Procesamiento y preparación geométrica de la línea de costa....49
3.4.2.5 Visualización preliminar de sondas y línea de costa....50
3.4.2.6 Creación bajos simulados en el entorno de Rota....50
3.4.2.7 Generación de la malla espacial hexagonal mediante H3....51
3.4.2.8 Asignación de sondas a las celdas y determinación de la profundidad mínima....52
3.4.2.9 Interpolación de profundidades faltantes y representación del modelo batimétrico....53
3.4.2.10 Carga y procesamiento de la derrota del buque....54
3.4.2.11 Integración de la derrota con la malla hexagonal y celdas recorridas....55
3.4.2.12 Definición del modelo de riesgo....56
3.4.2.13 Identificación de zonas críticas y construcción de corredores de navegación....56
3.4.2.14 Corredores de navegación....57
3.4.2.14.1 Corredores en el entorno de Ferrol....57
3.4.2.14.2 Corredores en el entorno de Rota....59
3.4.2.15 Identificación de celdas activadas y asignación de niveles de riesgo....60
3.4.3 Algoritmo de evaluación....61
3.4.3.1 Diseño del evaluador y fundamento metodológico....61
3.4.3.2 Comprobación inicial zona “CRÍTICA”....61
3.4.3.3 Etapas de la lógica difusa....62
3.4.3.4 Variables y métricas utilizadas....62
3.4.3.5 Fuzzificación con funciones trimf y trapmf....63
3.4.3.6 Reglas difusas e inferencia....64

3.4.3.7 Defuzzificación y cálculo final 65
3.4.3.8 Diferencias con el evaluador del entorno de Rota 66
3.4.4 Generación automática de la calificación y del informe de evaluación 67
3.4.5 Repositorio del proyecto 68
3.5 Desarrollo del evaluador automático de análisis de encuentros 68
3.5.1 Contexto doctrinal y justificación 68
3.5.2 Estructura general del procesamiento 69
3.5.3 Desarrollo y obtención de datos 69
3.5.3.1 Datos de entrada, entorno de ejecución y alcance 70
3.5.3.2 Normalización, limpieza y sincronización temporal 70
3.5.3.3 Visualización preliminar del buque propio y los contactos 71
3.5.3.4 Cálculo de métricas relativas: distancia, demora y DCPA/TCPA 72
3.5.3.4.1 Cálculo de la distancia relativa 73
3.5.3.4.2 Cálculo de la demora verdadera (bearing) y de la marcación 73
3.5.3.4.3 Cálculo de DCPA/TCPA 73
3.5.3.5 Visualización interactiva de contactos y generación de evidencias gráficas 74
3.5.3.6 Detección de eventos críticos y recorte temporal 75
3.5.3.7 Clasificación de situaciones según geometría relativa RIPA 76
3.5.3.7.1 Fondeado 76
3.5.3.7.2 Vuelta encontrada 76
3.5.3.7.3 Alcance 76
3.5.3.7.4 Cruce 77
3.5.3.7.5 Alejamiento 77
3.5.3.7.6 Sin clasificación 77
3.5.3.8 Detección de “corte de proa” como descriptor operativo adicional 77
3.5.3.9 Detección acumulativa de maniobra del buque propio en la fase de acercamiento 78
3.5.3.10 Visualización integrada de los eventos críticos 79
3.5.3.11 Caracterización radial del encuentro con el histograma de permanencia 80
3.5.4 Algoritmo de evaluación 82
3.5.4.1 Diseño del evaluador y fundamento metodológico 82
3.5.4.2 Determinación de la distancia crítica de referencia 82
3.5.4.3 Evaluación de la proximidad mediante histograma temporal radial 82
3.5.4.4 Criterio de “peor zona” y puntuación base del evento 83
3.5.4.5 Penalización por permanencia bajo el umbral crítico 83
3.5.4.6 Determinación de la obligación de maniobra 84
3.5.4.7 Evaluación de la maniobra realizada 84

3.5.4.8 Evaluación de la dirección de la maniobra 84
3.5.4.9 Penalizaciones adicionales por evolución desfavorable del encuentro 84
3.5.4.10 Obtención de la puntuación final y clasificación cualitativa 85
3.5.5 Generación automática del informe de evaluación 85
3.5.6 Repositorio del proyecto 86
4 Resultados 87
4.1 Resultados del evaluador de seguridad en la navegación 87
4.1.1 Resultados en el entorno de Ferrol 87
4.1.1.1 Calificación excelente 87
4.1.1.2 Calificación adecuada 88
4.1.1.3 Calificación mejorable 89
4.1.1.4 Calificación deficiente 90
4.1.1.5 Calificación crítica 90
4.1.2 Resultados en el entorno de Rota 91
4.1.2.1 Calificación excelente 91
4.1.2.2 Calificación adecuada 92
4.1.2.3 Calificación mejorable 92
4.1.2.4 Calificación deficiente 93
4.1.2.5 Calificación crítica 94
4.1.3 Síntesis del bloque de seguridad en la navegación 94
4.2 Resultados del evaluador automático de análisis de encuentros 94
4.2.1 Análisis eventos característicos 95
4.2.1.1 Evento 1 95
4.2.1.2 Evento 2 96
4.2.1.3 Evento 3 97
4.2.1.4 Evento 4 98
4.2.1.5 Evento 5 99
4.2.2 Resultados en Ferrol 100
4.2.3 Resultados en Rota 100
4.3 Resultado conjunto de ambos bloques de evaluación 101
4.3.1 Evaluación conjunta 101
5 Conclusiones y líneas futuras 103
5.1 Conclusiones del trabajo 103
5.1.1 Cumplimiento del objetivo general 103
5.1.2 Cumplimiento de los objetivos específicos 103
5.1.2.1 Procesamiento y estructuración de los datos de navegación. 103

5.1.2.2 Identificación y caracterización de situaciones de encuentro 103
5.1.2.3 Implementación de métricas cuantitativas de seguridad 104
5.1.2.4 Evaluación de la respuesta del alumno ante situaciones de riesgo 104
5.1.2.5 Incorporación de criterios expertos y parametrizables 104
5.1.2.6 Diseño de un modelo de evaluación homogéneo y reproducible 104
5.1.2.7 Generación de indicadores y resultados interpretables 104
5.1.3 Logros alcanzados de forma secundaria 104
5.1.4 Limitaciones del trabajo desarrollado 105
5.1.5 Valoración final de las conclusiones 106
5.2 Líneas futuras 106
5.2.1 Ampliación de la validación experimental del sistema 106
5.2.2 Extensión del evaluador a nuevos escenarios de navegación 106
5.2.3 Desarrollo de una parametrización más accesible para el instructor 106
5.2.4 Integración formal de ambos bloques en una evaluación global 106
5.2.5 Evolución hacia la evaluación en tiempo real 107
5.2.6 Explotación pedagógica avanzada de los resultados generados 107
5.2.7 Desarrollo de un asistente inteligente basado en LLM con arquitectura RAG 107
6 Bibliografía 109
Anexo I: Implicaciones Sociales, y/o Económicas, y/o Ambientales 111
Anexo II: Reflexiones Éticas y Sociales 113
Anexo III: Informes de evaluación 115
Anexo III.A Ejercicio realizado en el entorno de Rota 115
Seguridad en la navegación 115
Situaciones RIPA 119
Anexo III.B Ejercicio realizado en el entorno de Ferrol 144
Seguridad en la navegación 144
Situaciones RIPA 147
Anexo IV: Declaración de uso de Inteligencia Artificial 217

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1: Simulador de navegación del SCRIN (Servicio Central de Recursos e Infraestructuras Náuticas). 16

Figura 2-2: Simulador de Navegación de la Escuela Naval Militar 17

Figura 2-3: Demostración institucional del uso de simuladores de navegación basados en realidad virtual en la Escuela Naval Militar. 18

Figura 2-4: Simulador de navegación *full-mission* con reproducción integral del puente de gobierno 20

Figura 2-5: Ejemplo de Sistema Integrado de Navegación de la empresa Kongsberg clase A....24

Figura 2-6: Pantalla operando con el sistema ECDIS de cartas digitales....29

Figura 2-7: Funciones de pertenencia difusas trapezoidal–triangular–trapezoidal aplicadas a un índice de riesgo de navegación. 34

Figura 3-1: Ejemplo ilustrativo de una pregunta incluida en el cuestionario....38

Figura 3-2: Pregunta del cuestionario correspondiente al bloque de preguntas específicas. 39

Figura 3-3: Pregunta correspondiente a la encuesta respecto al cambio de rumbo suficiente. 40

Figura 3-4: Pregunta correspondiente a la encuesta respecto a la variación de velocidad suficiente. 41

Figura 3-5: Distribución de respuestas sobre la distancia a la que el buque propio debería iniciar una maniobra en caso de que el buque obligado a maniobrar no actúe....41

Figura 3-6: Distribución de respuestas sobre la distancia mínima a partir de la cual debería mantenerse vigilancia sobre los contactos en aguas restringidas....42

Figura 3-7:Visualización preliminar de sondas y línea de costa de la Ría de Ferrol 50

Figura 3-8: Distribución de sondas batimétricas y localización de bajos simulados en el área de Rota 51

Figura 3-9: Representación de la profundidad mínima efectiva en la bahía de Rota junto con los bajos simulados....54

Figura 3-10: Trayectoria del buque sobre cartografía batimétrica del área de navegación en el entorno de Ferrol....55

Figura 3-11: Trayectoria del buque en relación con la distancia a zonas críticas de seguridad....57

Figura 3-12: Trayectoria del buque junto a los corredores y zonas críticas en Ferrol 58

Figura 3-13: Trayectoria del buque junto a los corredores y zonas críticas en Rota....60

Figura 3-14: Trayectoria intersecada con las zonas en el entorno de Ferrol 61

Figura 3-15: Lógica difusa correspondiente al idx_global....63

Figura 3-16: Lógica difusa correspondiente a severidad_max....63

Figura 3-17: Lógica difusa correspondiente al pct_desvio....63

Figura 3-18: Lógica difusa correspondiente al pct_riesgo 64

Figura 3-19: Lógica difusa correspondiente al pct_black 64

Figura 3-20: Funciones de pertenencia difusa utilizadas para la variable pct_desvio en el entorno de Rota. 66

Figura 3-21: Comparación de la representación antes (izquierda) y después (derecha) de aplicar el filtro de distancia y el filtro de eliminación de barcos en puerto en el entorno de Rota....72

Figura 3-22: Representación del encuentro entre el buque propio y un contacto, mostrando las trayectorias, la evolución de rumbos, velocidades y distancias. 74

Figura 3-23: Resumen de métricas del evento crítico 79

Figura 3-24: Representación integrada de un evento crítico 80

Figura 3-25: Caracterización radial de un evento crítico mediante radar relativo e histograma de permanencia 81

Figura 4-1: Trayectoria del buque durante el ejercicio valorado como excelente en Ferrol....88

Figura 4-2: Resumen de métricas calculadas por el evaluador para el ejercicio clasificado como adecuado....89

Figura 4-3: Representación espacial de la trayectoria del buque en el ejercicio analizado con las delimitaciones del corredor y áreas críticas 89

Figura 4-4: Comentario automático generado por el sistema evaluador tras el análisis del ejercicio, donde se sintetiza la interpretación de las métricas de navegación 90

Figura 4-5: Recomendación principal generada automáticamente por el sistema evaluador a partir del análisis de las métricas de navegación del ejercicio. 91

Figura 4-6: Zonas de evaluación definidas para el escenario de Rota, mostrando la delimitación del área analizada y la derrota seguida por el buque 91

Figura 4-7: Recomendación principal generada automáticamente por el evaluador tras el análisis de la navegación en el escenario de Rota 92

Figura 4-8: Comentario automático generado por el evaluador tras el análisis de la trayectoria en el ejercicio, donde se interpreta el comportamiento de la navegación 93

Figura 4-9: Trayectoria del buque durante el ejercicio en el escenario de Rota, representada sobre las zonas de evaluación utilizadas por el sistema 93

Figura 4-10: Tabla resumen de métricas generadas por el evaluador para el ejercicio analizado en el escenario de Rota 94

Figura 4-11: Representación radar relativa del evento crítico entre el buque propio y el contacto .96

Figura 4-12: Tabla resumen de parámetros cinemáticos del evento crítico 97

Figura 4-13: Representación espacial y cinemática del evento crítico....98

Figura 4-14: Trayectoria del buque propio durante el encuentro, junto con la evolución temporal de ambos buques....99

Figura 4-15: Representación espacial y cinemática del evento crítico....100

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1: Principales aportaciones de la simulación marítima a la formación náutica. 23

Tabla 2-2: Comparación entre simuladores de misión completa y simuladores de escritorio en la formación marítima. 26

Tabla 2-3: Normativas reguladoras de la gestión y el soporte tecnológico. 27

Tabla 2-4: Comparativa de enfoques de evaluación del desempeño en simuladores de navegación. 32

Tabla 2-5: Ejemplos de aplicaciones de lógica difusa en la evaluación de la navegación. 33

Tabla 3-1: Márgenes de referencia de distancia mínima en aguas restringidas por situación 43

Tabla 3-2: Límites geográficos de las zonas de estudio 49

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 3-1 53
Ecuación 3-2 56
Ecuación 3-3 65
Ecuación 3-4 65
Ecuación 4-1 102

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Contexto y relevancia de la evaluación automatizada en los simuladores

La formación práctica en navegación marítima exige que el alumno desarrolle una capacidad sólida para tomar decisiones seguras, coherentes y ajustadas a la normativa en entornos dinámicos y complejos. En el ámbito de la enseñanza naval, los simuladores de navegación constituyen una herramienta fundamental para recrear situaciones realistas sin asumir los riesgos inherentes a la navegación real, permitiendo entrenar maniobras, evaluar procedimientos y consolidar criterios de seguridad. En este contexto, la seguridad no se limita a evitar accidentes, sino que implica mantener una derrota ordenada y controlada, con una adecuada gestión del riesgo en relación con el entorno, el tráfico y las restricciones operativas del escenario.

Dentro de este marco, surge una necesidad clave: disponer de un sistema de evaluación que sea objetivo, coherente y reproducible, capaz de valorar el desempeño de los alumnos con criterios homogéneos. Tradicionalmente, la evaluación de las prácticas en simulador depende en gran medida del juicio del instructor y de su interpretación de la maniobra ejecutada, lo que puede introducir variabilidad entre evaluaciones incluso cuando se observan situaciones similares. Además, el análisis manual del ejercicio exige tiempo y atención continua, aspectos limitantes para la evaluación de grandes cantidades de alumnos.

1.2 Enfoque del trabajo: evaluador inteligente integrado en el SIMNAV

El desarrollo de este trabajo se enmarca en esa problemática y propone una solución orientada a estandarizar la evaluación de la seguridad en la navegación, reduciendo la subjetividad y garantizando que todos los alumnos sean valorados con los mismos criterios. Para ello, se desarrolla un sistema evaluador inteligente integrado en el Simulador de Navegación de la Escuela Naval Militar (SIMNAV), destinado a analizar y valorar la seguridad de las maniobras realizadas por los alumnos durante los ejercicios prácticos. El evaluador propuesto procesa información generada por el buque propio (controlado por el alumno) y por los buques circundantes detectados a través de sistemas radar y AIS (*Automatic Identification System*). A partir de estos datos, se aplican algoritmos de procesamiento y análisis capaces de evaluar dos bloques diferenciados. En primer lugar, la adecuación del alumno a la derrota evaluando los peligros de las zonas navegadas. En segundo lugar, la evaluación de las maniobras llevadas a cabo por el alumno respecto a los diferentes contactos presentes durante la navegación, analizando diferentes parámetros como la distancia mínima del encuentro, el tipo de encuentro y la maniobra realizada por el propio alumno.

1.3 Métricas objetivas y criterio experto como base de la evaluación

El uso de métricas objetivas resulta esencial para transformar la navegación simulada en una evaluación cuantificable. En particular, los algoritmos de análisis y procesamiento calculan diferentes parámetros como la distancia mínima de paso (DCPA), el tiempo hasta la aproximación más cercana (TCPA), la maniobra realizada por el alumno o la distancia mínima y permanencia en esta distancia. Éstos son algunos ejemplos de parámetros calculados que permiten construir indicadores cuantitativos del desempeño. Este enfoque facilita una evaluación automática y comparable entre ejercicios, al tiempo que aporta trazabilidad debido a que cada valoración se sustenta en datos medibles, reduciendo la dependencia de criterios exclusivamente cualitativos. No obstante, durante la navegación real la seguridad no depende únicamente de superar un umbral fijo de distancia o tiempo, sino de interpretar la situación, anticiparse, maniobrar con oportunidad y mantener márgenes adecuados en función del contexto. Por ello, el sistema se apoya en criterios definidos a partir de la experiencia de oficiales expertos en navegación de la Armada, capaces de reflejar de forma más fiel cómo se juzga una maniobra segura en la práctica profesional y a través de normativa vigente como es el caso del Reglamento Internacional para Prevenir los Abordajes (RIPA).

1.4 Evaluación equivalente y criterios modificables

En consecuencia, el objetivo de este trabajo no es solo automatizar la evaluación, sino diseñarla de manera que sea equivalente para todos los alumnos, aplicando reglas consistentes y justificables. Al mismo tiempo, dichos criterios se conciben como parametrizables y modificables, de modo que el evaluador pueda adaptarse a diferentes necesidades formativas, a exigencias particulares del ejercicio o a cambios en la doctrina de evaluación. Esto permite, por ejemplo, ajustar el peso relativo de determinadas conductas (anticipación, mantenimiento de márgenes, selección de maniobra, estabilidad de derrota) o endurecer/relajar umbrales en función del nivel del alumnado o del tipo de escenario, sin alterar la estructura general del sistema. Este hecho reafirma el objetivo de construir un evaluador robusto capaz de valorar a todos los alumnos justamente con una serie de criterios modificables por el oficial destinado en el Simulador de Navegación de la Escuela Naval Militar.

1.5 Aportación del sistema al proceso formativo

De este modo, el proyecto persigue mejorar la formación práctica en la navegación marítima mediante la incorporación de técnicas inteligentes de evaluación, ofreciendo a los instructores una herramienta de apoyo para optimizar el seguimiento del aprendizaje y refuerza la calidad en el adiestramiento de los futuros oficiales de la Armada. La integración de un evaluador automatizado y configurable en el SIMNAV permite no solo obtener calificaciones más consistentes, sino también disponer de información analítica para detectar patrones de error, comparar rendimientos y orientar la instrucción hacia aspectos concretos de mejora, contribuyendo a una enseñanza más eficiente y basada en evidencias.

Por ello, el evaluador generará documentos de apoyo al alumno que proporcionen retroalimentación detallada sobre el ejercicio realizado. Estos informes incluirán no solo la calificación obtenida, sino también la explicación de los factores que han influido en la evaluación, permitiendo identificar las decisiones tomadas durante la navegación y su impacto en el nivel de seguridad alcanzado. De esta forma, el alumno podrá comprender con mayor claridad las razones de la valoración obtenida, así como los aspectos que requieren mejora. Este sistema tiene como finalidad reforzar el proceso de aprendizaje, facilitando que cada ejercicio no se limite únicamente a la obtención de una nota final, sino que se convierta en una herramienta de análisis y mejora continua. Gracias a la presentación estructurada de los resultados y a la visualización de los eventos relevantes ocurridos durante la navegación, el alumno podrá interpretar de forma más precisa su desempeño y desarrollar progresivamente la toma de decisiones en el entorno marítimo.

1.6 Objetivos

1.6.1 Objetivo general

Desarrollar para el Simulador de Navegación de la Escuela Naval Militar un sistema evaluador inteligente que permita analizar, de forma automática y objetiva, la seguridad de las maniobras realizadas por los alumnos durante ejercicios prácticos, aplicando criterios homogéneos basados en la experiencia de expertos y ajustados al cumplimiento de las normas de navegación (RIPA), con capacidad de parametrización para adaptarse a distintos escenarios y exigencias formativas.

1.6.2 Objetivos específicos

En coherencia con el objetivo general del proyecto, se plantean los siguientes objetivos específicos que orientan el diseño y la implementación del evaluador:

- Procesar y estructurar los datos de navegación generados por el buque propio y por los contactos detectados mediante radar y AIS, de forma que puedan emplearse en un análisis automático en tiempo real o diferido.
- Identificar y caracterizar situaciones de encuentro entre el buque propio y los contactos, determinando su evolución temporal y su relevancia en términos de riesgo de colisión.
- Implementar métricas cuantitativas de seguridad (DCPA, TCPA, distancias de paso y maniobra realizada) que permitan estimar objetivamente el nivel de riesgo asociado a cada interacción y a la navegación global del ejercicio.
- Evaluar la adecuación de la respuesta del alumno ante situaciones de riesgo, valorando la oportunidad y coherencia de la maniobra (cambios de rumbo, velocidad o combinación de ambos) en función del tipo de encuentro y del nivel de amenaza.
- Incorporar criterios expertos y configurables mediante parámetros ajustables (umbrales, ponderaciones y reglas), permitiendo adaptar el evaluador a diferentes niveles de instrucción, tipos de ejercicio o criterios docentes.
- Diseñar un modelo de evaluación homogéneo que asegure la equivalencia de criterios entre alumnos, reduciendo la dependencia de valoraciones subjetivas y garantizando la reproducibilidad de los resultados.
- Generar indicadores y resultados interpretables que sirvan como apoyo al instructor y al alumno, facilitando el seguimiento del aprendizaje y aportando evidencias cuantitativas sobre el rendimiento y la seguridad de la navegación realizada.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Contexto y motivación

2.1.1 Necesidad de prácticas seguras en la formación en navegación

La formación en navegación marítima exige la realización de prácticas seguras y realistas durante periodos de prácticas supervisadas antes de que los alumnos se enfrenten a situaciones reales de riesgo. El entorno marítimo se caracteriza por su elevada complejidad, derivada de la interacción simultánea de factores humanos, técnicos y ambientales, como el tráfico marítimo, las condiciones meteorológicas cambiantes, las limitaciones de maniobrabilidad del buque y la necesidad de cumplir estrictamente con las normas internacionales de navegación. En este contexto, una toma de decisiones inadecuada puede tener consecuencias graves, tanto desde el punto de vista de la seguridad de la navegación como del impacto económico y medioambiental.

Ante esta realidad, resulta imprescindible que los futuros oficiales de la Armada adquieran experiencia operativa de forma progresiva y controlada. La exposición temprana a situaciones reales sin una preparación adecuada entraña riesgos inaceptables, lo que hace necesario disponer de herramientas formativas que permitan simular escenarios reales sin comprometer la seguridad de las personas, los buques ni el medio marino. La simulación responde a esta necesidad al ofrecer un entorno controlado en el que es posible reproducir situaciones de navegación habituales y extraordinarias, incluyendo escenarios de tráfico denso, navegaciones en aguas restringidas o emergencias operativas.

En este sentido, la simulación se ha consolidado como un recurso fundamental dentro de los programas de estudios náuticos, al permitir combinar la adquisición de conocimientos teóricos con la práctica supervisada. Además, posibilita la repetición sistemática de ejercicios, la experimentación de distintas estrategias de actuación y el análisis detallado de los errores cometidos, aspectos esenciales para el desarrollo de competencias profesionales sólidas. Todo ello convierte a la simulación en un elemento clave para garantizar una formación eficaz, segura y profesional de aquellos marinos dedicados a la navegación de los buques.[1]

2.1.2 Marco normativo y uso de simuladores en la enseñanza marítima

El empleo de simuladores en la formación marítima se encuentra respaldado por un sólido marco normativo internacional, cuyo objetivo es garantizar que los futuros profesionales adquieran las competencias necesarias para desempeñar sus funciones de forma segura y eficaz. En este sentido, la Convención STCW (*Standards of Training, Certification and Watchkeeping for Seafarers),* promovida por la Organización Marítima Internacional, establece los requisitos mínimos de formación, certificación y guardia para los marinos, reconociendo explícitamente la simulación como una herramienta válida dentro del proceso formativo.

La normativa STCW contempla el uso de simuladores tanto como complemento a la formación práctica a bordo como, en determinados casos, sustituto parcial de esta. Para poder sustituir a las prácticas a bordo los sistemas empleados deben cumplir con los estándares de fidelidad y evaluación exigidos. Esta consideración normativa refuerza el papel de la simulación como un entorno formativo legítimo, capaz de reproducir con realismo las condiciones operativas del buque y de facilitar la adquisición de competencias técnicas. [2]



Figura 2-1: Simulador de navegación del SCRIN (Servicio Central de Recursos e Infraestructuras Náuticas).

En el ámbito académico, el uso de simuladores no solo responde a una necesidad pedagógica, sino que se alinea directamente con las exigencias regulatorias del sector marítimo, reforzando la validez y el rigor del proceso de enseñanza-aprendizaje [3] [4]. La Figura 2-1 muestra el simulador de navegación del Servicio Central de Recursos e Infraestructuras Náuticas, dedicado a la formación e investigación en la Universidad de Cádiz. (Fuente: [5])

2.1.3 El simulador de navegación como herramienta formativa avanzada

En este entorno normativo y pedagógico se sitúa el simulador de navegación de la Escuela Naval Militar, cuyo objetivo es mejorar la instrucción práctica mediante la recreación de escenarios de navegación realistas. El SIMNAV permite integrar información procedente de sistemas de radar y AIS en tiempo real, facilitando el análisis de riesgos de colisión, la gestión del tráfico marítimo y el cumplimiento de las reglas de navegación. Además, otra de sus funciones es el análisis de la navegación de precisión en aguas restringidas siguiendo derrotas previamente establecidas. La utilización de escenarios replicables posibilita además la repetición de ejercicios, reforzando el aprendizaje progresivo del alumno e implementando un sistema justo y eficaz para valorar los mismos aspectos a todos los alumnos. La Figura 2-2 muestra a un Teniente de Navío de la Armada mostrando las capacidades del Simulador de Navegación de la Escuela Naval Militar en una demostración institucional en el año 2024. (Fuente: [6])



Figura 2-2: Simulador de Navegación de la Escuela Naval Militar

2.1.4 Experiencias institucionales y valor de la simulación

Diversos estudios y experiencias institucionales ponen de manifiesto el valor de la simulación como herramienta formativa avanzada en el ámbito de la navegación marítima. Un ejemplo representativo es el Simulador de Navegación de la Escuela Naval de Uruguay, el cual permite el adiestramiento de los alumnos en una amplia variedad de escenarios operativos, tipos de buques y condiciones ambientales. Este simulador posibilita la recreación de situaciones complejas de tráfico marítimo, maniobras en aguas restringidas y operaciones en entornos portuarios, favoreciendo el desarrollo de competencias técnicas y la toma de decisiones en contextos realistas. Asimismo, su capacidad para simular proyectos de infraestructura portuaria, como nuevos canales de acceso, ampliaciones de muelles o modificaciones en ayudas a la navegación, amplía su utilidad más allá del ámbito estrictamente formativo. Estas funcionalidades convierten al simulador en una herramienta clave no solo para la instrucción y evaluación del personal navegante, sino también para la planificación, el análisis previo y la validación de operaciones marítimas, contribuyendo a la mejora de la seguridad y a la optimización de los procesos de decisión.[7]

2.1.5 Plataformas de simulación en la Escuela Naval Militar

En el ámbito de la formación naval, la Escuela Naval Militar dispone de una infraestructura de simulación diversa que permite abordar el proceso de enseñanza–aprendizaje desde distintos niveles de complejidad y realismo. Entre los recursos disponibles se incluyen simuladores de navegación de tipo *full-mission* (con cuatro puentes operativos), así como simuladores de sobremesa con entornos inmersivos basados en tecnologías de realidad virtual (con 10 equipos operativos), orientados al adiestramiento y la práctica de maniobras en escenarios operativos controlados.

Los simuladores permiten generar numerosos escenarios de navegación en distintos puertos españoles y con diferentes tipos de buques de la Armada, reproduciendo condiciones variables de tráfico marítimo, meteorología o visibilidad. De este modo, los alumnos pueden enfrentarse a situaciones complejas que difícilmente se presentarían con tanta frecuencia durante las guardias reales en la mar, lo que convierte al simulador en una herramienta fundamental para el adiestramiento en maniobra, navegación y aplicación del RIPA.

El sistema cuenta con dos puentes de simulación completos tipo *Full-Mission Bridge* (FMB) que proporcionan una cobertura visual 240 grados, capaces de entrenar simultáneamente a equipos completos de navegación formados por siete alumnos que desempeñan diferentes funciones dentro de la guardia de puente. Además, existen otros dos puentes con cinco pantallas planas de alta resolución con las mismas capacidades que los mencionados anteriormente. Estos simuladores de tipo *full-mission* reproducen de forma integral el puente de gobierno de las diferentes clases de los buques de la Armada, incorporando consolas físicas, sistemas de navegación y representación visual envolvente del entorno marítimo. Este tipo de simuladores permite recrear con un alto grado de fidelidad situaciones operativas complejas, tales como navegación en aguas restringidas, maniobras portuarias o escenarios de tráfico intenso, facilitando el entrenamiento conjunto de varios alumnos y el desarrollo de competencias relacionadas con la coordinación y la toma de decisiones del oficial de guardia. [1]

Por su parte, la Escuela Naval Militar cuenta también con simuladores de sobremesa de carácter inmersivo apoyados en sistemas de realidad virtual. Estos simuladores ofrecen una elevada flexibilidad, una mayor facilidad de despliegue y la posibilidad de ampliar el número de puestos disponibles. La utilización de entornos de realidad virtual permite al alumno interactuar de manera inmersiva con el escenario de navegación, favoreciendo la adquisición de conciencia situacional, la comprensión espacial y la repetición autónoma de ejercicios. [8]

La Figura 2-3 corresponde a una demostración institucional del empleo de tecnologías de realidad virtual aplicadas a la formación naval, en la que se ilustra la interacción con un simulador de navegación inmersivo mediante visores y dispositivos de control manual. Este tipo de demostraciones pone de manifiesto el interés institucional por la incorporación de herramientas tecnológicas avanzadas en los procesos de enseñanza y adiestramiento, destacando el potencial de la realidad virtual para recrear escenarios operativos complejos de forma segura y controlada. (Fuente: [9])



Figura 2-3: Demostración institucional del uso de simuladores de navegación basados en realidad virtual en la Escuela Naval Militar.

La coexistencia de simuladores *full-mission* y simuladores de sobremesa con realidad virtual posibilita un enfoque formativo complementario, en el que los primeros se orientan al adiestramiento avanzado y cooperativo, mientras que los segundos facilitan la práctica individual y el refuerzo progresivo de competencias básicas y procedimentales. No obstante, esta diversidad tecnológica plantea la necesidad de establecer criterios de evaluación homogéneos que permitan analizar y comparar de forma objetiva el desempeño del alumnado, independientemente del tipo de simulador empleado, reforzando la conveniencia de integrar sistemas de evaluación basados en métricas objetivas y procedimientos estandarizados.

2.1.6 Plataformas de simulación en la US Navy (Marina Estadounidense)

La *US Navy* constituye uno de los referentes internacionales más avanzados en el uso de la simulación como herramienta formativa y evaluadora en el ámbito de la navegación y las operaciones navales. La simulación se integra de manera estructural en su sistema de instrucción, no solo como apoyo al entrenamiento práctico, sino como un elemento clave para la adquisición, evaluación y validación de competencias operativas.

Dentro de sus capacidades, emplea simuladores de navegación de alta fidelidad, incluyendo simuladores de puente de gobierno e infraestructuras de simulación distribuida, que permiten reproducir con gran realismo escenarios de navegación complejos. Estos sistemas posibilitan el adiestramiento de sus alumnos en todos los ámbitos siendo un pilar fundamental dentro de su formación académica.

Todos estos sistemas de simulación empleados están integrados dentro de su sistema oficial de formación y entrenamiento del personal de superficie. Estos simuladores se utilizan principalmente en centros de instrucción como la *Surface Warfare Officers School* (Escuela de Oficiales de la Guerra de Superficie) y en instalaciones de adiestramiento distribuidas, agrupándose de la siguiente forma:

- *Integrated Bridge Simulators* (IBS)

Simuladores de puente integrados que reproducen los sistemas de navegación de los buques de superficie de la *US Navy*. Se emplean para el entrenamiento en gobierno del buque, maniobra, navegación y aplicación del RIPA. [10]

- *Ship Handling and Navigation Trainers*

Simuladores específicos para el adiestramiento en maniobra y control del buque, utilizados tanto en fases iniciales de formación como en reciclaje y entrenamiento continuo del personal navegante.

- *Surface Warfare Officer Training Simulators*

Conjunto de simuladores utilizados en la formación de oficiales de superficie, que incluyen puestos de navegación y puente de gobierno, integrados dentro del itinerario formativo oficial de la *US Navy*.

- *Distributed Mission Training Simulators* (DMT)

Sistemas de simulación interconectados que permiten entrenar de forma simultánea a varias unidades y equipos desde distintas ubicaciones. Aunque están orientados principalmente al entrenamiento táctico, incorporan componentes de navegación y coordinación en escenarios complejos.

- *Desktop and Part-Task Trainers*

Simuladores de sobremesa utilizados para el entrenamiento individual en procedimientos de navegación, familiarización con sistemas y refuerzo de competencias básicas, especialmente en etapas tempranas de la formación. Suelen utilizar gafas de realidad virtual.

Como se puede observar la *US Navy* dispone de excelentes capacidades de simulación, tanto para la navegación como para simulación táctica, siendo fundamental el desarrollo de estos para su continua formación y adiestramiento de personal. [11] [12]

La Figura 2-4 muestra un simulador de navegación de tipo *full-mission*, que reproduce de forma integral el puente de gobierno de un buque mediante consolas físicas, sistemas electrónicos de navegación y un entorno visual envolvente. (Fuente: [12])



Figura 2-4: Simulador de navegación *full-mission* con reproducción integral del puente de gobierno

2.1.7 Plataformas de simulación en la Marine Nationale (Marina Francesa)

Otro de los ejemplos de utilización de simuladores de navegación es el caso de la *Marine Nationale*, potencia mundial y aliado español en la OTAN. La Armada Francesa dispone de simuladores de navegación operativos que forman parte de su sistema oficial de formación y adiestramiento del personal naval. Entre los sistemas empleados se encuentran simuladores de puente de gobierno de alta fidelidad, así como entrenadores de navegación y maniobra utilizados en centros de instrucción naval.

Un ejemplo representativo es el uso de simuladores de puente integrados desarrollados por *Kongsberg Maritime*, empleados para el entrenamiento en navegación, gobierno del buque y maniobra. Estos simuladores reproducen el entorno del puente de mando y los principales sistemas de navegación. Se utilizan tanto en la formación inicial de oficiales como en el entrenamiento avanzado y de reciclaje del personal navegante.

Asimismo, la Marina Francesa emplea simuladores de maniobra y control del buque destinados al adiestramiento en navegación en aguas restringidas, entradas a puerto y situaciones operativas complejas. Estos sistemas se integran dentro de entornos de simulación más amplios que permiten la recreación de escenarios realistas y el entrenamiento coordinado de diferentes puestos.

De forma complementaria, se utilizan simuladores de sobremesa y entrenadores por tareas para la práctica individual de procedimientos de navegación, familiarización con equipos y refuerzo de competencias básicas. Estos simuladores ofrecen una solución flexible y escalable que permite aumentar el número de alumnos en entrenamiento sin necesidad de recurrir exclusivamente a simuladores de tipo full-mission. [13]

2.1.8 Limitaciones de los métodos de evaluación tradicionales

A pesar de las evidentes ventajas que ofrece la simulación en la formación marítima, en el ámbito académico persiste una dificultad relevante relacionada con la evaluación del desempeño del alumnado. El aumento progresivo del número de estudiantes, junto con la creciente complejidad técnica y operativa de los ejercicios prácticos desarrollados en simuladores, hace que los métodos de evaluación basados exclusivamente en la observación directa del instructor resulten poco escalables y fuertemente dependientes del criterio individual. Esta dependencia introduce inevitablemente un componente de subjetividad, que puede traducirse en la variabilidad de los resultados de evaluación, incluso ante ejercicios idénticos. Como consecuencia, se dificulta la comparación objetiva del rendimiento entre alumnos y la reproducibilidad en sesiones o escenarios. Estas limitaciones ponen de manifiesto la

necesidad de complementar la evaluación tradicional con herramientas objetivas y métricas cuantificables que permitan estandarizar el proceso evaluador y reforzar su fiabilidad.

En este sentido, la ausencia de un instructor asignado de forma exclusiva a cada cabina de simulación constituye una limitación adicional de los métodos de evaluación tradicionales. Cuando un mismo instructor debe supervisar simultáneamente varias cabinas o ejercicios en paralelo, su capacidad para observar de manera continua y detallada el desempeño individual de cada alumno se ve inevitablemente reducida. Esta circunstancia puede provocar que determinadas acciones relevantes, decisiones críticas o errores significativos pasen desapercibidos o no sean evaluados con la profundidad necesaria.

Además, la supervisión parcial o intermitente limita la posibilidad de analizar adecuadamente la secuencia temporal de las decisiones adoptadas por el alumno y su adecuación al contexto operativo concreto. Esto adquiere especial relevancia en situaciones dinámicas que requieren una atención constante, como maniobras en aguas restringidas o escenarios de tráfico intenso. Como consecuencia, la evaluación puede centrarse en resultados finales visibles, dejando en segundo plano el proceso de toma de decisiones y la evolución del ejercicio, aspectos fundamentales para una valoración formativa completa.

En el caso de los simuladores basados en realidad virtual, la integración de sistemas de evaluación automatizada adquiere una relevancia adicional. La incorporación de evaluadores automáticos proporciona al alumno una retroalimentación adicional, objetiva e inmediata, que complementa la valoración realizada por el instructor. Dicha retroalimentación contribuye a una mejor comprensión de los aciertos y errores cometidos durante el ejercicio, favoreciendo procesos de autoevaluación y aprendizaje autónomo. De este modo, la evaluación deja de limitarse a una calificación final y pasa a formar parte activa del proceso formativo, reforzando el valor pedagógico de los simuladores de realidad virtual.

Asimismo, la incorporación de sistemas de evaluación automatizada permite la generación automática de informes de desempeño tras la finalización de cada ejercicio en el simulador. Estos informes pueden recoger de forma estructurada los principales indicadores del rendimiento del alumno, tales como el seguimiento de la ruta realizada, la gestión del tráfico, la adecuación de las maniobras realizadas o el cumplimiento de los procedimientos establecidos. La disponibilidad de este tipo de documentación facilita un análisis detallado y posterior del ejercicio, tanto por parte del alumno como del instructor.

Desde el punto de vista pedagógico, los informes de desempeño constituyen una herramienta de aprendizaje especialmente valiosa, al proporcionar una retroalimentación clara, objetiva y reproducible. El alumno puede revisar su actuación con mayor profundidad, identificar patrones de error y comprender las consecuencias de las decisiones adoptadas en un entorno seguro y controlado. De este modo, la evaluación trasciende su función meramente calificadora y se integra como un elemento activo del proceso formativo, fomentando la reflexión crítica, la mejora continua y una mayor autonomía en el aprendizaje.

2.1.9 Evaluación actual del SIMNAV

El evaluador actualmente integrado en el SIMNAV se basa en un conjunto de criterios cuantitativos relativamente simples para valorar el desempeño del alumno durante los ejercicios.

En lo relativo a la aplicación del RIPA, el sistema analiza fundamentalmente la distancia entre el buque propio y los contactos detectados. Para cada contacto se calcula la mínima distancia registrada durante todo el ejercicio, y en caso de que esta se sitúe por debajo de una serie de límites establecidos, se aplica una penalización progresiva. Esta penalización es mayor cuanto menor sea dicha distancia de paso.

En cuanto a la seguridad de la navegación, la evaluación de la derrota se realiza principalmente mediante el análisis de la distancia del buque al eje de la derrota planificada, dividiendo la navegación

en distintos tramos y asignando una calificación en cada uno de ellos en función de la separación respecto al eje. Posteriormente, se obtiene una nota media final con la media ponderada de los tramos recorridos.

Asimismo, el sistema evalúa los puntos de caída en los *waypoints* comparando la distancia al eje antes y después del punto de paso, utilizando varios registros previos y posteriores para determinar si la maniobra de cambio de rumbo se ha ejecutado correctamente según unas reglas predefinidas.

Finalmente, se incorpora una comprobación de seguridad respecto a la sonda, analizando el valor mínimo de profundidad registrado durante el ejercicio y aplicando penalizaciones en caso de que se sitúe por debajo de unos límites establecidos. No obstante, este enfoque presenta ciertas limitaciones, ya que la evaluación se basa en métricas puntuales o en mínimos registrados, sin considerar en profundidad la evolución temporal de las maniobras, el contexto de las situaciones de navegación ni la interacción dinámica con otros buques, lo que puede dar lugar a valoraciones que no reflejan completamente la complejidad real de la toma de decisiones en el puente.

Estas limitaciones ponen de manifiesto la necesidad de desarrollar métodos de evaluación más avanzados que permitan analizar la navegación de forma más completa. En particular, resulta conveniente incorporar enfoques que tengan en cuenta la evolución temporal de las maniobras, el contexto de cada situación de encuentro y el comportamiento global del buque a lo largo del ejercicio. De esta forma se evita que la valoración dependa únicamente de valores mínimos o métricas puntuales. En este sentido, el empleo de técnicas como el análisis estadístico de trayectorias o la lógica borrosa pueden contribuir a obtener evaluaciones más representativas del desempeño real del alumno y de su capacidad para mantener una navegación segura.

2.1.10 Motivación del Trabajo de Fin de Grado

Ante esta problemática surge la motivación del presente Trabajo de Fin de Grado, cuyo propósito es establecer las bases conceptuales y metodológicas para el desarrollo de un evaluador inteligente integrado en el SIMNAV. Dicho evaluador tiene como objetivo principal aportar un mayor grado de objetividad y consistencia al análisis del desempeño del alumno mediante el empleo de indicadores cuantitativos, métricas medibles y criterios de evaluación sistemáticos. Además, tiene que suplir las carencias presentes en el evaluador actual. La propuesta se orienta a analizar aspectos clave de la navegación, como el seguimiento de la ruta planificada, la gestión del tráfico marítimo y la adecuación de las decisiones tomadas ante distintas situaciones operativas. Asimismo, este sistema pretende facilitar una evaluación formativa estructurada y reproducible, capaz de complementar la labor del instructor, reducir la dependencia de la observación subjetiva y mejorar la calidad global del proceso de enseñanza-aprendizaje. El objetivo final reside en aportar una retroalimentación más precisa y orientada a la mejora continua del alumno.

2.2 La simulación en la formación académica para la navegación

2.2.1 La simulación como herramienta pedagógica fundamental

La simulación marítima constituye un pilar esencial en la enseñanza náutica moderna, al proporcionar un entorno controlado en el que el alumno puede adquirir y consolidar competencias de forma progresiva. Desde una perspectiva pedagógica, la simulación se emplea para facilitar la asimilación gradual de conceptos teóricos, apoyar la práctica supervisada de maniobras complejas, permitir la evaluación del nivel de competencia alcanzado y promover la reflexión crítica sobre las decisiones adoptadas durante el ejercicio. Este enfoque favorece un aprendizaje activo, en el que el alumno no solo ejecuta procedimientos, sino que comprende las consecuencias de sus acciones en un contexto operativo realista. La posibilidad de cometer errores sin riesgo real refuerza además el aprendizaje significativo y la mejora continua. [4]

2.2.2 Marco normativo y evolución tecnológica de los simuladores

La literatura especializada señala que el uso de simuladores en la formación marítima se encuentra respaldado por el marco normativo internacional, siendo regulado por la Organización Marítima Internacional (OMI) y contemplado en el Convenio STCW, el cual permite sustituir una parte de la formación práctica a bordo por entrenamiento en simuladores certificados. Paralelamente, los simuladores han experimentado una notable evolución tecnológica, dando lugar a sistemas de alta fidelidad que reproducen con gran realismo el entorno del puente de mando. Estos sistemas incorporan panorámicas de 360°, escenarios inmersivos y modelado detallado de condiciones meteorológicas, oceanográficas y de tráfico. Gracias a ello, es posible concentrar en un número reducido de horas de simulación ejercicios operativos complejos que, en condiciones reales, requerirían largos periodos de experiencia en la mar. [14]

2.2.3 Beneficios formativos y aplicación en el ámbito militar

Diversos estudios han puesto de manifiesto el impacto positivo de la simulación en el rendimiento del alumnado, evidenciando mejoras significativas en la rapidez de respuesta, la reducción de errores y la toma de decisiones ante situaciones críticas. Por ejemplo, investigaciones muestran que cadetes entrenados mediante simuladores resolvieron averías de máquina en menos tiempo y con mayor eficacia que aquellos que recibieron únicamente formación teórica [15]. En este contexto, instituciones como la Armada y otras marinas integran centros de simulación que abarcan áreas de náutica, comunicaciones y máquinas para la certificación de competencias. En particular, el SIMNAV se emplea de forma habitual para el adiestramiento en maniobras costeras, navegación en tráfico denso y gestión de emergencias. La Tabla 2-1 presenta las principales aportaciones de la simulación marítima al proceso formativo, donde se recogen sus implicaciones pedagógicas, normativas y operativas.

Dimensión formativa	Aportación de la simulación marítima	Impacto en el aprendizaje del alumno
Pedagógica	Facilita la asimilación progresiva de conceptos y la práctica supervisada en entornos controlados	Mejora la comprensión operativa y fomenta la reflexión crítica sobre la toma de decisiones
Normativa	Permite sustituir parcialmente la formación práctica a bordo según el marco OMI–STCW	Garantiza una formación estandarizada y reconocida internacionalmente
Tecnológica	Uso de simuladores de alta fidelidad con panorámicas 360°, escenarios inmersivos	Incrementa el realismo del entrenamiento y la transferencia de habilidades al entorno real
Operativa	Recreación de maniobras complejas, tráfico denso y situaciones de emergencia	Entrenamiento intensivo de situaciones poco frecuentes o de alto riesgo
Evaluativa	Posibilidad de repetir escenarios y monitorizar el desempeño del alumno	Facilita la evaluación objetiva y la comparación entre alumnos y sesiones
Seguridad	Eliminación de riesgos para personas, buques e infraestructuras	Permite el aprendizaje mediante el error sin consecuencias reales

Tabla 2-1: Principales aportaciones de la simulación marítima a la formación náutica.

2.3 Plataformas comerciales y coste/instalación

El desarrollo y la consolidación de la simulación marítima han dado lugar a un mercado amplio y diverso de soluciones tecnológicas orientadas a la formación y al entrenamiento operativo. Estas soluciones presentan distintos niveles de realismo, complejidad técnica y requisitos económicos, lo que condiciona su idoneidad en función de los objetivos formativos, el número de alumnos y los recursos disponibles. En términos generales, es posible distinguir entre simuladores de misión completa (*full-mission),* caracterizados por un alto grado de fidelidad e inmersión, y simuladores de escritorio, concebidos como alternativas más flexibles y económicas.

2.3.1 Simuladores de navegación de misión completa (full-mission)

En el mercado actual existen múltiples soluciones comerciales de simuladores de navegación, destacando los sistemas de misión completa (*full-mission*) desarrollados por fabricantes de referencia como Kongsberg Maritime, Wärtsilä y METRO. Estos simuladores de puente completo reproducen con alto grado de fidelidad el entorno operativo de un buque real, incorporando cabinas físicas, visión panorámica de 360° y la integración de subsistemas esenciales como radar, ECDIS, ARPA, GMDSS y otros equipos de navegación y comunicaciones. No obstante, este elevado nivel de realismo conlleva una inversión considerable, asociada a la necesidad de espacios dedicados, hardware especializado y costes de mantenimientos elevados. [16]

Un ejemplo destacado es el sistema K-Sim de Kongsberg, reconocido internacionalmente por su capacidad para entrenar habilidades críticas relacionadas con la seguridad, la eficiencia operativa y la sostenibilidad. Estas plataformas ofrecen configuraciones flexibles que abarcan desde puentes físicos completamente equipados hasta soluciones híbridas y basadas en la nube. La Figura 2-5 muestra uno de estos ejemplos con el personal operando en el simulador de la empresa mencionada. Además, los simuladores K-Sim de clase A, B y C cumplen los requisitos del Convenio STCW de la Organización Marítima Internacional, y están certificados conforme a la norma DNV-ST-0033 para sistemas de simulación marítima. (Fuente: [16])

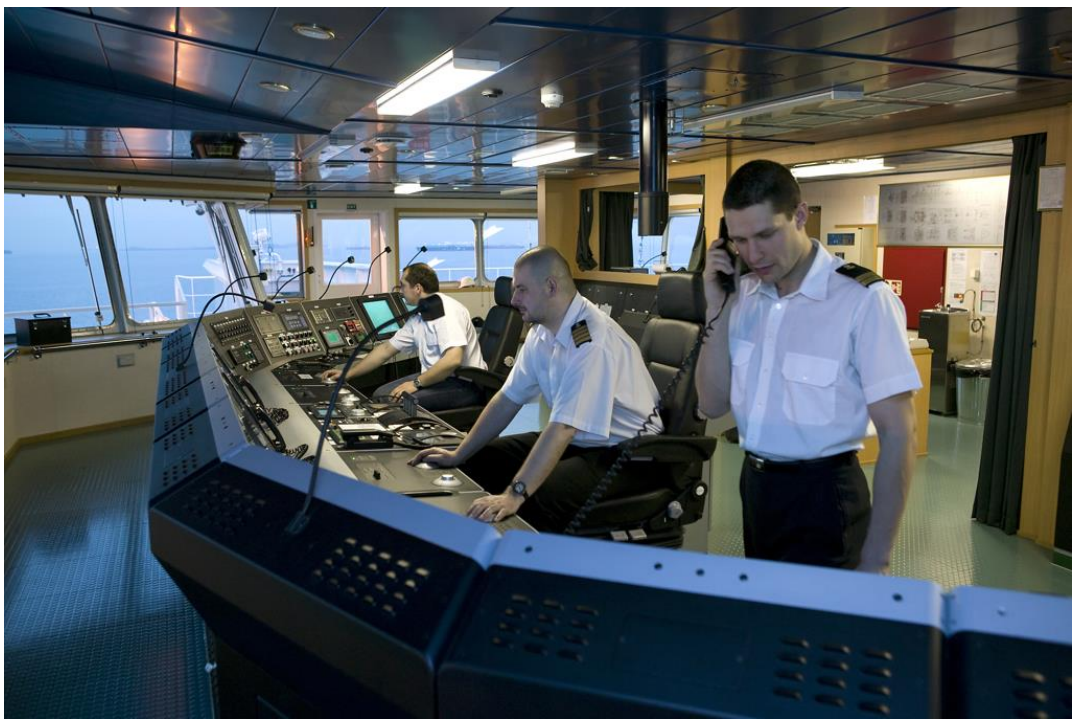


Figura 2-5: Ejemplo de Sistema Integrado de Navegación de la empresa Kongsberg clase A

2.3.2 Simuladores de escritorio como alternativa de menor coste

Como alternativa más asequible a los simuladores de misión completa, diversas compañías ofrecen soluciones de tipo desktop, orientadas a la formación básica y avanzada con menores requisitos de infraestructura. Entre ellas destaca VSTEP, que comercializa el simulador *Nautis Desktop Trainer*, una plataforma portátil basada en PC que suele configurarse con entre tres y seis pantallas.

Este tipo de simulador cubre módulos fundamentales de navegación, radar, GMDSS e incluso sistemas de posicionamiento dinámico (DP), permitiendo su adaptación a las necesidades específicas de cada centro formativo. Gracias a su menor coste y flexibilidad, el *Nautis Desktop Trainer* ha sido adoptado por escuelas náuticas y empresas del sector marítimo para el entrenamiento en maniobras portuarias y el cumplimiento de los requisitos STCW. El coste de instalación de estas soluciones, que puede oscilar entre 64 000 y 128 000 €, demostrando que los simuladores de escritorio permiten reducir de forma significativa la inversión inicial frente a las plataformas de misión completa, a costa de un menor nivel de inmersión física. [17]

2.3.3 Consideraciones económicas y tendencias actuales

Desde un punto de vista económico y de planificación, la implantación de sistemas de simulación marítima requiere considerar diversos factores relacionados con el coste y la instalación. Entre ellos se pueden destacar las necesidades de espacio físico, los sistemas visuales empleados para la representación del entorno, la capacidad de computación necesaria para ejecutar los modelos de simulación y las licencias de *software* requeridas para el funcionamiento de las distintas aplicaciones. Asimismo, deben tenerse en cuenta aspectos como la integración de los diferentes subsistemas, el mantenimiento técnico, la actualización de equipos y la formación del personal encargado de su operación. En el análisis económico de los simuladores aplicados a la docencia es habitual distinguir entre costes de inversión y costes operativos, lo que permite evaluar de forma más precisa la viabilidad del sistema a largo plazo, así como su sostenibilidad y eficiencia en función de los objetivos formativos perseguidos.

Los costes de inversión incluyen la adquisición del hardware, la adecuación de las instalaciones, la infraestructura de red y los sistemas de audio y vídeo necesarios para el funcionamiento del simulador. Por su parte, los costes operativos engloban las licencias de software, el soporte técnico, el mantenimiento y calibración de los sistemas visuales, la actualización de bases de datos y escenarios de simulación, así como la formación y actualización continua del personal instructor. Aunque existen desarrollos emergentes basados en simulación en la nube y realidad virtual, el enfoque predominante en instituciones militares y de formación reglada continúa priorizando soluciones certificadas de alta fidelidad, alineadas con los requisitos del STCW y adaptadas a estándares internacionales de seguridad y calidad.

La Tabla 2-2 presenta una comparación entre los simuladores de misión completa (*full-mission*) y los simuladores de escritorio (*desktop*), destacando sus principales diferencias en términos de nivel de fidelidad, costes asociados, requisitos de infraestructura y aplicabilidad en el ámbito de la formación marítima. Esta comparación permite identificar las ventajas y limitaciones de cada tipo de simulador, así como su adecuación a distintos niveles de entrenamiento y objetivos formativos. Mientras que los simuladores de misión completa ofrecen un entorno altamente inmersivo que reproduce con gran realismo las condiciones operativas de un buque, los simuladores de escritorio proporcionan una alternativa más flexible y accesible, especialmente adecuada para la formación básica, el entrenamiento repetitivo y la optimización de recursos en instituciones educativas o militares.

Característica	Simuladores de misión completa (*full-mission*)	Simuladores de escritorio (*desktop*)
Nivel de fidelidad	Muy alto: cabinas físicas, visión 360° y entorno inmersivo	Medio: entorno virtual en múltiples pantallas
Infraestructura requerida	Espacios dedicados, instalaciones específicas y hardware especializado	Instalación en aulas convencionales o puestos individuales
Sistemas integrados	Radar, ECDIS, ARPA, GMDSS, comunicaciones, máquinas, etc.	Navegación, radar, GMDSS y módulos específicos según configuración
Certificación	Cumplen requisitos STCW y certificaciones de sociedades de clasificación	Pueden cumplir STCW para determinados módulos y niveles
Coste de inversión	Muy elevado	Moderado o bajo
Coste operativo	Alto: mantenimiento, calibración y soporte especializado	Reducido: mantenimiento y soporte más sencillos
Escalabilidad	Limitada por espacio y coste	Alta: fácil ampliación de puestos
Aplicación principal	Formación avanzada, certificación y entrenamiento complejo	Formación básica, intermedia y entrenamiento repetitivo
Adecuación a instituciones militares	Muy alta	Media
Flexibilidad de uso	Media	Alta

Tabla 2-2: Comparación entre simuladores de misión completa y simuladores de escritorio en la formación marítima.

2.4 Normativas y estándares de navegación

El desarrollo de un sistema evaluador inteligente en el ámbito de la navegación debe apoyarse en un marco normativo sólido que garantice la validez técnica, legal y formativa de los criterios empleados. Dicho marco está constituido, por un lado, por las normas internacionales de navegación que regulan el comportamiento de los buques en la mar y, por otro, por los estándares que rigen la formación, certificación y gestión de los sistemas utilizados en entornos docentes. La correcta alineación del evaluador con estas normativas resulta esencial para asegurar que las evaluaciones realizadas sean coherentes con las exigencias profesionales y regulatorias del sector marítimo.

2.4.1 Normas internacionales de navegación y formación marítima

Las normas de navegación internacionales definen el marco fundamental que debe seguir cualquier sistema de evaluación aplicado a la navegación marítima. En primer lugar, el Reglamento Internacional para Prevenir Abordajes (RIPA) o también conocido por sus siglas en inglés como COLREG, establecido por la Organización Marítima Internacional en 1972, regula las conductas obligatorias de los buques con el objetivo de evitar colisiones. Estas reglas abarcan aspectos esenciales como las prioridades de paso, las luces y marcas de navegación, las señales acústicas y luminosas, así como las acciones que deben adoptarse en situaciones especiales como por ejemplo en navegación con visibilidad reducida. En

consecuencia, cualquier algoritmo de evaluación orientado al análisis del riesgo de colisión o de la toma de decisiones del alumno debe referenciar estas reglas como su principal fundamento legal y operativo. [18]

Además de ello, se debe tener en consideración las distintas doctrinas existentes en la Armada referidas a la navegación, como es el caso de la D-CP-09 (Manual de Doctrina de Maniobra y Navegación) que recoge todos los requerimientos exigidos durante la navegación.

De forma complementaria, el Convenio STCW (*Standards of Training, Certification and Watchkeeping for Seafarers)* prescribe las competencias mínimas que deben adquirir los marinos, así como los requisitos de formación y evaluación asociados a cada certificación. Este convenio establece, entre otros aspectos, el número de horas de simulador exigidas para determinadas competencias, como las maniobras costeras, la navegación nocturna o la gestión de situaciones de emergencia. En este contexto, los simuladores empleados en la formación deben cumplir con estándares reconocidos que garanticen su idoneidad formativa. Un ejemplo de ello son los simuladores K-Sim, que cumplen los requisitos del STCW y cuentan con certificación DNV-ST-0033, lo que avala su uso en procesos de formación y evaluación reglados. [16]

2.4.2 Estándares de gestión y soporte tecnológico en entornos de simulación

Además de las normas estrictamente vinculadas a la navegación y a la formación marítima, resulta pertinente considerar estándares de gestión aplicables a la infraestructura tecnológica que sustenta los simuladores. Aunque estos estándares no regulan directamente la navegación, aportan buenas prácticas relevantes para garantizar la fiabilidad, disponibilidad y sostenibilidad de los sistemas de simulación utilizados en entornos académicos.

En este sentido, normas como la ISO/IEC 19770, orientada a la gestión de activos de software, y la ISO 55000, centrada en la gestión de activos físicos, proporcionan un marco adecuado para el control de licencias, el mantenimiento de los equipos y la planificación del ciclo de vida de la infraestructura del simulador. De forma análoga, marcos de gobierno de tecnologías de la información como ITIL 4 y COBIT ofrecen directrices útiles para la gestión del servicio, la gobernanza de los sistemas tecnológicos y la alineación de estos con los objetivos institucionales de un centro de formación. La Tabla 2-3 muestra la comparativa de las diferentes normativas encargadas de la gestión de archivos y soporte tecnológico aplicables dentro de un simulador de navegación.

Normativa / Estándar	Ámbito de aplicación	Contenido principal	Relevancia para SIMNAV
ISO/IEC 19770	Gestión de activos de software	Control de licencias, inventario y ciclo de vida del software	Apoya la gestión eficiente y trazable del software del simulador y de los módulos del evaluador
ISO 55000	Gestión de activos físicos	Gestión del ciclo de vida de activos técnicos e infraestructuras	Facilita el mantenimiento, disponibilidad y sostenibilidad de los equipos del simulador
ITIL 4	Gestión de servicios TI	Buenas prácticas para la gestión y mejora continua de servicios tecnológicos	Útil para estructurar la operación, soporte y evolución del simulador en un centro docente
COBIT	Gobierno de TI	Marco para la gobernanza y control de sistemas de información	Permite alinear la infraestructura del simulador con los objetivos institucionales y formativos

Tabla 2-3: Normativas reguladoras de la gestión y el soporte tecnológico.

Si bien la adopción de estos estándares no es obligatoria en el ámbito de la simulación marítima, su aplicación contribuye a mejorar la calidad, el control y la trazabilidad de los recursos empleados. En conjunto, el sistema evaluador propuesto debe alinearse prioritariamente con las normativas COLREG y STCW, pudiendo apoyarse adicionalmente en estándares ISO y marcos de gestión TI para asegurar una gestión eficiente y robusta de la infraestructura de simulación.

2.5 Planificación y cálculo de rutas marítimas

La planificación de rutas constituye una etapa fundamental previa a la navegación, ya que condiciona tanto la seguridad del buque como la eficiencia de la travesía. En el ámbito profesional y formativo, una planificación adecuada permite anticipar riesgos, optimizar recursos y establecer un marco de referencia claro para la toma de decisiones durante la navegación. En entornos de enseñanza, además, la ruta planificada adquiere un papel central al servir como referencia para el análisis y la evaluación del desempeño del alumno.

2.5.1 Proceso operativo de planificación de rutas

Desde un punto de vista operativo, el proceso de planificación de una ruta marítima se estructura en una serie de etapas bien definidas. En primer lugar, se lleva a cabo la selección de la derrota, que implica la definición de los *waypoints* (WP) y con ello los tramos que conforman la navegación completa desde un punto de partida hasta el punto final al que se quiere navegar. Esta fase establece la geometría básica de la ruta y determina los rumbos y distancias a seguir.

A continuación, se incorporan las restricciones de seguridad, considerando los márgenes respecto a peligros a la navegación, los calados disponibles, las zonas restringidas, los dispositivos de separación de tráfico (DST) y las áreas bajo control de servicios de tráfico marítimo. Posteriormente, se definen los parámetros de navegación, tales como la velocidad objetivo, los tiempos estimados de llegada (ETA), las ventanas de marea y las condiciones meteorológicas previstas.

El proceso concluye con una fase de verificación del plan, que incluye la comprobación de la integridad de la ruta, la identificación de áreas no navegables (*no-go areas*), la definición de contornos de seguridad, la validación de alarmas y la revisión conjunta por parte del equipo de navegación. Esta verificación permite detectar errores de planificación antes de iniciar la navegación y constituye un elemento clave para la seguridad.

En la Armada, existe una doctrina específica que se encarga de establecer todos los requisitos a la hora de planificar rutas y navegaciones. Está recogido en la D-CP-09 y es de obligatorio conocimiento y cumplimiento para los oficiales de la Armada. Además, dispone de una serie de listas para la comprobación de hitos realizados que sirve también para la propia evaluación del personal encargado de la navegación.

2.5.2 Herramientas y métodos de planificación de rutas

Tradicionalmente, los navegantes han trazado derrotas mediante cartas náuticas, seleccionando rutas que eviten peligros fijos y respeten los corredores de tráfico establecidos. La introducción de los sistemas ECDIS (*Electronic Chart Display and Information System*) ha supuesto un avance significativo al permitir integrar cartografía electrónica (ENC), datos de seguridad y herramientas automáticas de cálculo y validación de rutas. La Figura 2-6 muestra una pantalla operando un sistema ECDIS con una ruta plasmada en ella y diferentes ayudas que facilita el sistema mencionado. (Fuente: [19])

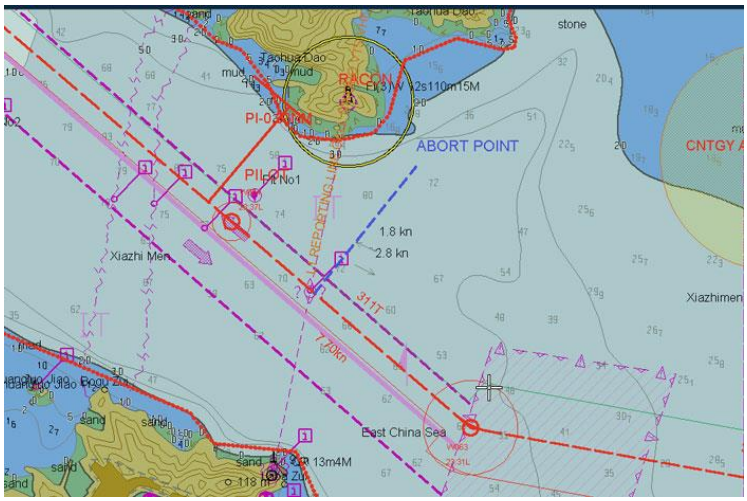


Figura 2-6: Pantalla operando con el sistema ECDIS de cartas digitales

En paralelo, diferentes estudios de investigación han abordado la planificación de rutas mediante algoritmos computacionales, aplicados sobre datos de cartografía electrónica. [20] Algoritmos clásicos como Dijkstra han sido ampliamente utilizados para obtener rutas óptimas en términos de distancia o coste, mientras que variantes como Theta o extensiones tridimensionales permiten generar trayectorias más suaves o adaptadas a velocidades variables. Estos enfoques incorporan además factores marinos relevantes, como el calado del buque, las corrientes o el viento, así como la teoría del dominio del buque, que define márgenes mínimos de seguridad respecto a obstáculos y otros buques.

Más recientemente, han surgido métodos basados en el análisis de datos AIS históricos y técnicas de aprendizaje automático, que permiten identificar patrones reales de navegación y generar rutas automáticas ajustadas al comportamiento observado del tráfico marítimo. En la práctica, los sistemas actuales combinan algoritmos clásicos con análisis de grandes volúmenes de datos AIS para refinar la planificación desde una perspectiva operativa y realista. [21]

2.5.3 Relevancia de la ruta planificada en simuladores de navegación

En los simuladores de navegación, la ruta planificada adquiere una relevancia adicional al convertirse en un elemento de referencia para la ejecución y evaluación del ejercicio. La comparación entre la ruta diseñada y la trayectoria efectivamente seguida por el alumno permite analizar desviaciones, decisiones adoptadas durante la navegación y el grado de cumplimiento de los criterios de seguridad establecidos.

Esta comparación resulta especialmente valiosa en el ámbito formativo, ya que facilita la identificación de errores de planificación, deficiencias en la monitorización de la derrota y reacciones inadecuadas ante situaciones imprevistas. Asimismo, la ruta planificada constituye la base para la definición de métricas objetivas, como el error transversal a la ruta o el cumplimiento de *waypoints*, que pueden ser empleadas por sistemas evaluadores inteligentes para transformar los datos registrados durante la simulación en indicadores cuantificables de desempeño.

2.6 Integración de la ruta planificada en simuladores y apoyo al aprendizaje

La integración de la ruta planificada en los simuladores de navegación constituye un elemento clave tanto desde el punto de vista operativo como formativo. En los entornos de simulación modernos, la derrota diseñada previamente no solo sirve como guía para la ejecución de la navegación, sino que actúa como referencia objetiva para el análisis posterior del ejercicio y la evaluación del desempeño del alumno. Esta integración permite conectar la fase de planificación con la de ejecución, favoreciendo un aprendizaje coherente y estructurado.

2.6.1 Integración de la ruta planificada en simuladores de navegación

En la mayoría de los simuladores de navegación, la ruta planificada se integra a través del sistema ECDIS simulado, donde se introducen los waypoints, los tramos y los parámetros asociados a la derrota. Esta integración permite que el alumno disponga, durante la ejecución del ejercicio, de una representación visual clara de la ruta prevista, facilitando la monitorización continua de la navegación y la detección temprana de desviaciones. Además, se apoya de métodos tradicionales con la carta de papel y la navegación con índices paralelos gracias al uso de la costa y el radar.

Durante la simulación, el alumno debe ejecutar la navegación siguiendo la ruta planificada mediante el uso de los sistemas de gobierno del buque, ya sea de forma manual o asistida por piloto automático. El simulador registra de manera continua la posición, velocidad y rumbo del buque, lo que posibilita la comparación entre la trayectoria prevista y la trayectoria efectivamente seguida. Además, los sistemas de simulación suelen incorporar alarmas y avisos asociados a la planificación, como la aproximación a peligros, la salida de contornos de seguridad o el incumplimiento de parámetros establecidos en la fase de planificación.

Desde el punto de vista técnico, esta integración permite separar claramente dos dimensiones de análisis: por un lado, la calidad del plan de navegación diseñado y, por otro, la corrección de su ejecución durante la simulación. Esta distinción resulta fundamental para una evaluación justa y precisa, ya que un plan adecuado puede verse comprometido por una ejecución deficiente, y viceversa. [22]

2.6.2 Apoyo al aprendizaje y análisis posterior del ejercicio

Más allá de su función operativa, la integración de la ruta planificada en el simulador desempeña un papel esencial como herramienta de apoyo al aprendizaje. La posibilidad de comparar la ruta diseñada con la ruta seguida permite al alumno reflexionar sobre sus decisiones, identificar errores y comprender las consecuencias de desviaciones aparentemente pequeñas en términos de seguridad y eficiencia.

En este contexto, los procesos de *debriefing* adquieren una relevancia particular. Tras la finalización del ejercicio, los simuladores permiten reproducir la sesión completa, mostrando la evolución temporal de la derrota, las maniobras realizadas y los eventos relevantes. Este análisis posterior, guiado por el instructor, facilita la identificación de patrones de comportamiento, la discusión de alternativas de actuación y la consolidación de los aprendizajes adquiridos.

Asimismo, la integración de la ruta planificada posibilita la utilización de métricas objetivas —como el error transversal a la ruta, el cumplimiento de *waypoints* o la gestión de márgenes de seguridad— que pueden emplearse para proporcionar al alumno información estructurada sobre su desempeño. De este modo, el simulador se convierte no solo en un entorno de práctica, sino en una herramienta formativa completa que favorece un aprendizaje activo, reflexivo y basado en evidencias. [22]

2.7 Evaluación del desempeño del alumno en la simulación

La evaluación del desempeño del alumno constituye uno de los aspectos más relevantes y complejos de la formación basada en simuladores de navegación. Si bien estos entornos permiten reproducir escenarios realistas y registrar una gran cantidad de información operativa, la transformación de dichos datos en valoraciones objetivas y formativas sigue siendo un desafío. En este contexto, resulta necesario analizar los enfoques tradicionales de evaluación, sus limitaciones y las tendencias actuales orientadas a una mayor automatización del proceso evaluador.

2.7.1 Enfoques tradicionales de evaluación en simuladores marítimos

Tradicionalmente, la evaluación del alumno en simuladores de navegación se ha basado principalmente en la observación directa del instructor, apoyada en listas de comprobación (*checklists*) y en la experiencia profesional del evaluador. Este enfoque permite valorar aspectos como el cumplimiento de procedimientos, la correcta utilización de los sistemas de navegación, la aplicación de las normas RIPA y el comportamiento general del alumno durante la ejecución del ejercicio.

Este tipo de evaluación resulta especialmente adecuado para analizar competencias no técnicas, como la comunicación en el puente, la gestión de recursos del puente (BRM) o el liderazgo en situaciones de estrés. Además, el juicio experto del instructor aporta un contexto cualitativo difícil de capturar mediante métricas puramente numéricas. Sin embargo, este enfoque presenta una elevada dependencia del criterio individual, lo que puede dar lugar a variaciones significativas entre distintos evaluadores o incluso entre distintas sesiones realizadas por el mismo instructor.

Asimismo, la creciente complejidad de los escenarios simulados, que integran múltiples contactos, condiciones ambientales cambiantes y sistemas electrónicos avanzados, dificulta que el instructor pueda supervisar simultáneamente todos los aspectos relevantes del ejercicio. Como consecuencia, ciertos errores o aciertos pueden no ser detectados o valorados con la precisión necesaria. [3]

2.7.2 Limitaciones de la evaluación subjetiva y necesidad de objetivación

Las limitaciones inherentes a los métodos de evaluación basados exclusivamente en la observación han puesto de manifiesto la necesidad de avanzar hacia enfoques más objetivos, reproducibles y escalables. La subjetividad del evaluador, aunque inevitable hasta cierto punto, puede introducir sesgos que afectan a la equidad del proceso evaluador y dificultan la comparación entre alumnos.

Otro aspecto crítico es la escasa trazabilidad de las decisiones evaluativas. En muchos casos, el alumno recibe una calificación final sin disponer de información detallada sobre los criterios empleados o sobre los elementos concretos que han influido en su valoración. Además, en entornos académicos con un número elevado de alumnos, la evaluación manual se vuelve difícilmente escalable. La repetición de ejercicios similares con distintos grupos requiere un esfuerzo considerable por parte del instructor y aumenta el riesgo de inconsistencias. Estas limitaciones justifican la necesidad de incorporar mecanismos automáticos que permitan apoyar la evaluación, reduciendo la carga del evaluador humano y mejorando la coherencia del proceso. [1]

2.7.3 Uso de métricas objetivas y sistemas de apoyo a la evaluación

Los simuladores de navegación modernos registran de forma continua una gran cantidad de datos durante la ejecución de los ejercicios, incluyendo trayectorias, velocidades, rumbos, eventos y estados de los sistemas. Este registro sistemático ofrece una oportunidad clara para el desarrollo de métricas objetivas que permitan evaluar el desempeño del alumno de forma cuantificable.

Entre las métricas comúnmente consideradas se encuentran la desviación respecto a la ruta planificada, el cumplimiento de *waypoints*, los tiempos de reacción ante situaciones de riesgo, así como indicadores relacionados con la seguridad de la navegación, como la distancia mínima de paso (DCPA) o el tiempo hasta la aproximación más cercana (TCPA).

No obstante, el principal reto no reside únicamente en la disponibilidad de los datos, sino en su correcta interpretación. La conversión de registros brutos en indicadores comprensibles y pedagógicamente útiles requiere la definición de reglas de evaluación claras y transparentes para el alumno. En este sentido, los sistemas de apoyo a la evaluación se presentan como una solución orientada a integrar métricas objetivas con criterios formativos, proporcionando información estructurada que facilite el análisis posterior del desempeño y la mejora progresiva de las competencias del alumno. [3]

La Tabla 2-4 resume las principales características de los distintos enfoques de evaluación del desempeño en simuladores de navegación. Como puede observarse, los sistemas evaluadores inteligentes permiten combinar la objetividad de las métricas automáticas con criterios formativos estructurados, superando las limitaciones de los métodos basados exclusivamente en la observación del instructor.

Aspecto	Evaluación tradicional (observación del instructor)	Evaluación asistida por sistemas inteligentes
Base del proceso evaluador	Juicio experto del instructor	Integración de datos, reglas y modelos de decisión
Tipo de información utilizada	Observaciones cualitativas, listas de verificación	Métricas cuantitativas combinadas con criterios formativos
Grado de objetividad	Bajo–medio, dependiente del evaluador	Alto, con interpretación contextualizada
Reproducibilidad	Limitada	Elevada
Escalabilidad	Baja en grupos numerosos	Alta
Transparencia para el alumno	Limitada	Alta (indicadores interpretables)
Carga de trabajo del instructor	Alta	Baja–media
Adecuación a simuladores modernos	Parcial	Óptima

Tabla 2-4: Comparativa de enfoques de evaluación del desempeño en simuladores de navegación.

2.8 Lógica difusa para evaluación formativa de rutas y maniobras

La evaluación del desempeño en navegación presenta una dificultad inherente: muchas de las decisiones que se toman en el puente no pueden clasificarse de forma estrictamente binaria como correctas o incorrectas. Factores como la anticipación, la proximidad a otros buques o el margen de seguridad aplicado dependen del contexto y admiten distintos grados de adecuación. En este escenario, la lógica difusa se presenta como un enfoque especialmente adecuado para modelar la incertidumbre y la gradualidad propias de la navegación marítima.

2.8.1 Fundamentos de la lógica difusa aplicada a la evaluación en la navegación

A diferencia de los enfoques clásicos basados en umbrales rígidos, la lógica difusa permite representar variables mediante grados de pertenencia a conjuntos lingüísticos, tales como “bajo”, “medio” o “alto”. De este modo, el desempeño del alumno puede evaluarse de forma continua, asignando valores intermedios que reflejen con mayor fidelidad la realidad operativa. Este enfoque resulta particularmente útil en la evaluación de maniobras, donde pequeñas diferencias en parámetros como la distancia o el tiempo pueden tener interpretaciones distintas según el contexto.

En el ámbito de la navegación, la lógica difusa facilita la integración de múltiples indicadores de riesgo como la distancia mínima de paso (DCPA), el tiempo hasta la aproximación más cercana (TCPA) o la densidad de tráfico en un único valor de seguridad global. Este valor no representa una decisión categórica, sino una estimación gradual del nivel de riesgo o de la calidad de la maniobra, lo que permite una evaluación más matizada y coherente con la práctica profesional.

Desde una perspectiva formativa, este tipo de evaluación aporta una ventaja adicional, ya que permite proporcionar al alumno información estructurada sobre su desempeño en términos comprensibles, evitando reducciones excesivas a una simple calificación de aprobado o suspenso. En consecuencia, la lógica difusa se adapta especialmente bien a entornos de simulación orientados al aprendizaje progresivo y a la mejora continua de competencias. [23]

2.8.2 Aplicaciones de la lógica difusa en la evaluación de maniobras y rutas

Diversos trabajos de investigación han aplicado la lógica difusa al análisis de la seguridad en la navegación y a la evaluación de maniobras. Por ejemplo, un estudio propuso un Índice de Riesgo de Colisión Difuso (NCRI), que ajusta dinámicamente un dominio elíptico de seguridad alrededor del buque y asigna ponderaciones difusas a parámetros como DCPA y TCPA. Este modelo integra además factores derivados de las reglas RIPA, como situaciones de cruce, alcance o gobierno mediante un esquema de decisión basado en la lógica difusa. De esta manera se obtiene una evaluación continua de la proximidad crítica. [23]

De forma similar, en el año 2023 una serie de investigadores desarrollaron un sistema de evaluación basado en lógica difusa orientado a comprobar el cumplimiento de las reglas RIPA en escenarios con múltiples buques. En este enfoque, términos inherentemente ambiguos de la normativa, como “paso seguro” o “dar prioridad”, se traducen en funciones lingüísticas cuantificables, permitiendo evaluar el grado de cumplimiento normativo de una maniobra con un nivel de detalle difícil de alcanzar mediante métodos tradicionales. Otro ejemplo relevante es el Índice de Seguridad Marítima propuesto en este mismo estudio, donde se combinan mediante reglas difusas las probabilidades de colisión y varada de un buque. Este índice se calcula a partir de datos numéricos obtenidos en simuladores de maniobras y proporciona un valor continuo de seguridad, validado en distintos escenarios virtuales. [24]

En conjunto, estos estudios demuestran que la lógica difusa constituye una herramienta eficaz para evaluar la calidad de una ruta o maniobra en términos de seguridad, incorporando de forma explícita la incertidumbre inherente a la navegación. En el contexto formativo, su aplicación permite generar indicadores cuantitativos interpretables por el alumno, como niveles de riesgo graduados, que complementan y enriquecen los métodos de evaluación tradicionales.

La Tabla 2-5 recoge una síntesis de algunos trabajos representativos que aplican técnicas de lógica difusa a la evaluación de la navegación marítima, destacando los enfoques empleados y los principales indicadores considerados en cada caso.

Referencia (Año)	Enfoque	Observaciones
[23] (2025)	Índice difuso de riesgo de colisión (NCRI)	Combina DCPA, TCPA y reglas RIPA mediante un dominio elíptico y ponderaciones difusas
[24] (2023)	Evaluación difusa del cumplimiento RIPA	Traduce términos normativos ambiguos en funciones lingüísticas para escenarios con múltiples buques
[24] (2023)	Índice de seguridad marítima basado en lógica difusa	Integra riesgos de colisión y varada usando datos de simulador para obtener un índice continuo de seguridad

Tabla 2-5: Ejemplos de aplicaciones de lógica difusa en la evaluación de la navegación.

2.8.3 Modelado difuso mediante funciones de pertenencia

En los sistemas de lógica difusa es habitual representar los conceptos lingüísticos mediante funciones de pertenencia, que describen el grado en que un determinado valor pertenece a una categoría difusa. Entre las más utilizadas se encuentran las funciones triangulares y trapezoidales, debido a su simplicidad computacional y facilidad de interpretación.

Las funciones triangulares se emplean habitualmente para representar estados intermedios, donde existe un valor central con máxima pertenencia que disminuye progresivamente hacia los extremos. Por su parte, las funciones trapezoidales permiten definir intervalos en los que una condición se cumple plenamente, generando una meseta de pertenencia máxima que proporciona mayor estabilidad frente a pequeñas variaciones de la variable de entrada. La combinación de ambas funciones es especialmente frecuente en aplicaciones de control y evaluación, ya que permite modelar de forma natural zonas seguras, zonas peligrosas y regiones de transición entre ambas. [25]

En el ámbito de la navegación marítima, este enfoque resulta particularmente útil para evaluar parámetros de proximidad a zonas peligrosas, donde las decisiones no suelen depender de umbrales rígidos sino de transiciones graduales entre estados. De este modo, la lógica difusa permite reproducir de forma más realista el razonamiento experto empleado en la toma de decisiones durante la navegación.

La Figura 2-7 muestra las funciones de pertenencia difusas utilizadas en sistemas de evaluación basados en lógica difusa. Las funciones trapezoidales permiten definir intervalos donde el riesgo se considera claramente bajo o alto, mientras que la función triangular representa una zona de transición asociada a valores intermedios del índice de riesgo. (Fuente propia)

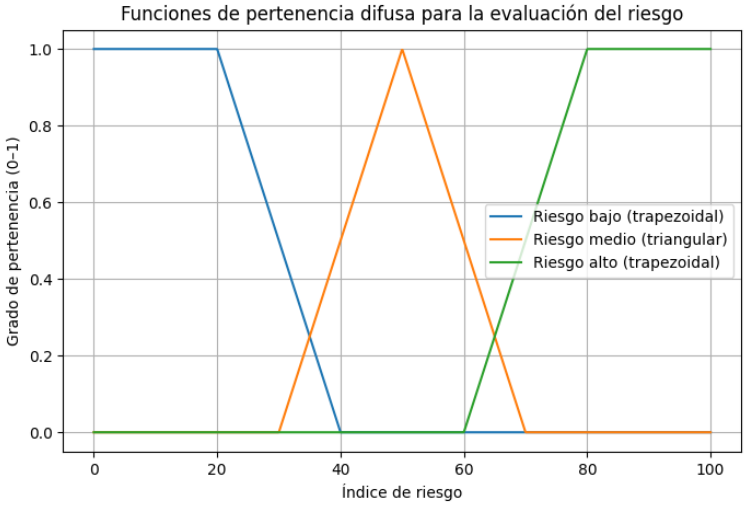


Figura 2-7: Funciones de pertenencia difusas trapezoidal–triangular–trapezoidal aplicadas a un índice de riesgo de navegación.

2.9 Conclusiones del estado del arte

En conclusión, el análisis bibliográfico realizado permite identificar las siguientes tendencias relevantes para el desarrollo del proyecto:

- **La simulación como eje central de la formación**: los simuladores de navegación se han consolidado como elementos fundamentales en la formación náutica moderna, al permitir el entrenamiento de maniobras críticas en entornos seguros, controlados y reproducibles, facilitando la adquisición y evaluación de competencias profesionales.
- **Diversidad de plataformas de simulación**: el panorama actual incluye soluciones comerciales de alta fidelidad, orientadas a simulación de misión completa, así como alternativas de menor coste basadas en estaciones de escritorio. Esta diversidad permite adaptar los sistemas de

simulación a distintos contextos formativos, necesidades docentes y restricciones presupuestarias.

- **Existencia de un marco normativo consolidado**: la navegación marítima y la formación asociada se encuentran reguladas por normas internacionales que establecen los criterios de comportamiento, competencia y certificación. Cualquier sistema evaluador aplicado a la simulación debe alinearse con este marco para garantizar la validez formativa y profesional de los resultados obtenidos, además de la doctrina específica de la Armada.
- **Planificación de rutas como área de investigación activa**: la planificación y el seguimiento de rutas marítimas continúan siendo un ámbito de interés técnico, en el que se aplican tanto algoritmos clásicos de búsqueda y optimización como enfoques más recientes basados en el análisis de datos históricos de tráfico, con el objetivo de mejorar la seguridad y eficiencia de la navegación.
- **Limitaciones de los métodos tradicionales de evaluación**: la evaluación del desempeño del alumno en simuladores sigue siendo, en muchos casos, dependiente de la observación directa del instructor, lo que puede introducir subjetividad y variabilidad en los resultados. Esta situación pone de manifiesto la necesidad de avanzar hacia modelos de evaluación más objetivos, sistemáticos y reproducibles.
- **Potencial de la inteligencia artificial y la lógica difusa**: las técnicas de inteligencia artificial y, en particular, la lógica difusa, se perfilan como herramientas adecuadas para abordar la evaluación del desempeño en navegación, al permitir integrar múltiples indicadores y gestionar la incertidumbre inherente a la toma de decisiones en la mar mediante valoraciones continuas.

En conjunto, el estado del arte pone de manifiesto que el desarrollo de un sistema evaluador integrado en el SIMNAV, apoyado en técnicas de inteligencia artificial y lógica difusa, puede contribuir de manera significativa a mejorar la calidad de la evaluación en el SIMNAV, aportando mayor objetividad, coherencia y valor formativo, sin sustituir el criterio experto del instructor, sino complementándolo de forma eficaz.

3 DESARROLLO DEL TFG

3.1 Enfoque metodológico de la Evaluación

El enfoque metodológico adoptado en el presente trabajo responde a la necesidad de transformar la evaluación tradicionalmente cualitativa de la navegación en simuladores en un sistema estructurado, reproducible y fundamentado en criterios operativos reales.

Este planteamiento parte de la premisa de que la seguridad en la navegación puede modelarse mediante variables espaciales y temporales medibles, siempre que los umbrales que definen dicha seguridad estén alineados con el criterio profesional. Por ello, el sistema evaluador incorpora los resultados obtenidos en una encuesta desarrollada específicamente para este trabajo, permitiendo anclar el modelo matemático a la práctica real.

3.1.1 Caracterización del criterio de seguridad en la navegación

El primer punto del desarrollo del presente trabajo se centra en la elaboración y diseño de una encuesta, la cual constituye la principal herramienta de recogida de información empleada en el estudio. Este instrumento ha sido concebido como un medio estructurado para obtener datos de forma sistemática y homogénea, permitiendo recopilar información relevante de manera eficiente y organizada.

Para el diseño y la elaboración del cuestionario se ha utilizado la herramienta Google Formularios, seleccionada por su accesibilidad, facilidad de uso y capacidad para gestionar y almacenar las respuestas de forma automática. Esta plataforma permite, además, una presentación clara de las preguntas, la incorporación de elementos visuales y una distribución sencilla del cuestionario entre los participantes.

El uso de este tipo de herramienta digital facilita la estandarización de las respuestas, reduce posibles errores en la recogida de datos y permite una posterior explotación de la información obtenida de forma ordenada, contribuyendo así a la fiabilidad y coherencia del proceso metodológico seguido en el trabajo.

3.1.2 Objetivos de la encuesta

La encuesta desarrollada en este trabajo tiene como objetivo principal analizar el criterio operativo y la percepción del riesgo de los marinos ante situaciones potenciales de abordaje, así como los límites de seguridad que consideran adecuados en función del entorno de navegación y del tipo de buque implicado.

De forma más específica, se pretende:

- Identificar qué se considera un cambio de rumbo o de velocidad suficiente para que una maniobra sea clara y apreciable por otros buques.
- Analizar las preferencias de maniobra ante situaciones de riesgo de colisión.

- Establecer referencias sobre distancias mínimas de vigilancia y valores de DCPA considerados seguros tanto en aguas abiertas como en aguas restringidas.
- Conocer el criterio de los participantes respecto al margen de eslora que define a un buque pequeño, mediano o grande.
- Evaluar cómo varían estos criterios en función del tipo de encuentro, del tamaño relativo de los buques y del entorno de navegación.

A partir de los resultados obtenidos en la encuesta, será posible definir una serie de criterios de evaluación fundamentados en el conocimiento y la experiencia de profesionales del ámbito marítimo. Dichos criterios serán posteriormente implementados en el evaluador inteligente del SIMNAV, permitiendo que el sistema incorpore parámetros de valoración coherentes con la práctica operativa real.

3.1.3 Diseño del cuestionario

El cuestionario ha sido diseñado de forma estructurada y progresiva, dividiéndose en dos grandes bloques.

3.1.3.1 Preguntas generales

El primer bloque está compuesto por una serie de preguntas de carácter general destinadas a obtener el criterio base del participante antes de enfrentarse a escenarios concretos. En este bloque se incluyen cuestiones relativas a:

- El cambio mínimo de rumbo considerado suficiente para que una maniobra sea clara y apreciable por otro buque.
- La variación mínima de velocidad que se considera eficaz para evitar una situación de riesgo.
- La preferencia general de tipo de maniobra (cambio de rumbo, cambio de velocidad, combinación de ambos o dependencia de la situación).
- La distancia mínima a la que se iniciaría una maniobra propia en caso de que el buque con obligación de maniobrar no realice ninguna acción.
- La definición del margen de eslora para clasificar buques pequeños, medianos y grandes.
- La distancia mínima de vigilancia que el participante considera necesaria en aguas abiertas y en aguas restringidas.

Además, se han incorporado imágenes ilustrativas en las preguntas con el fin de mejorar la representatividad de los escenarios planteados, facilitando su comprensión por parte de los participantes. La Figura 3-1 muestra una pregunta de este apartado donde se pregunta la distancia mínima de vigilancia navegando en aguas restringidas. (Fuente propia)



Figura 3-1: Ejemplo ilustrativo de una pregunta incluida en el cuestionario

3.1.3.2 Escenarios de encuentro específicos

Tras el bloque general, la encuesta incluye cuatro secciones adicionales, cada una centrada en escenarios de encuentro concretos. En estas secciones se analizan situaciones que combinan:

- Encuentros con buques pequeños o buques medianos/grandes.
- Navegación en aguas abiertas o en aguas restringidas.

En cada escenario se solicita al participante que indique, entre otros aspectos, la distancia DCPA mínima que mantendría y el criterio de seguridad aplicado, lo que permite estudiar cómo varía la percepción del riesgo según el contexto operativo. Además, se pregunta específicamente por la situación de alcance, vuelta encontrada, cruce por la banda de babor y cruce por la banda de estribor.

Todas las preguntas del cuestionario son mayoritariamente cerradas, con rangos de respuesta definidos, incluyendo la opción "Otros" para permitir matizaciones adicionales. Este enfoque facilita el análisis estadístico posterior sin limitar completamente la libertad de criterio del participante. Además, cada sección incorpora una pregunta adicional orientada a determinar cuál debería ser la distancia mínima de seguridad en cualquier situación de navegación.

Por último, cada pregunta se acompaña de una figura ilustrativa que representa el encuentro entre ambas embarcaciones, con el objetivo de facilitar la comprensión de la situación por parte del entrevistado. La Figura 3-2 muestra un ejemplo correspondiente a este bloque de preguntas específicas según la situación, concretamente una situación de vuelta encontrada frente a un contacto de pequeño tamaño navegando en aguas restringidas. (Fuente propia)

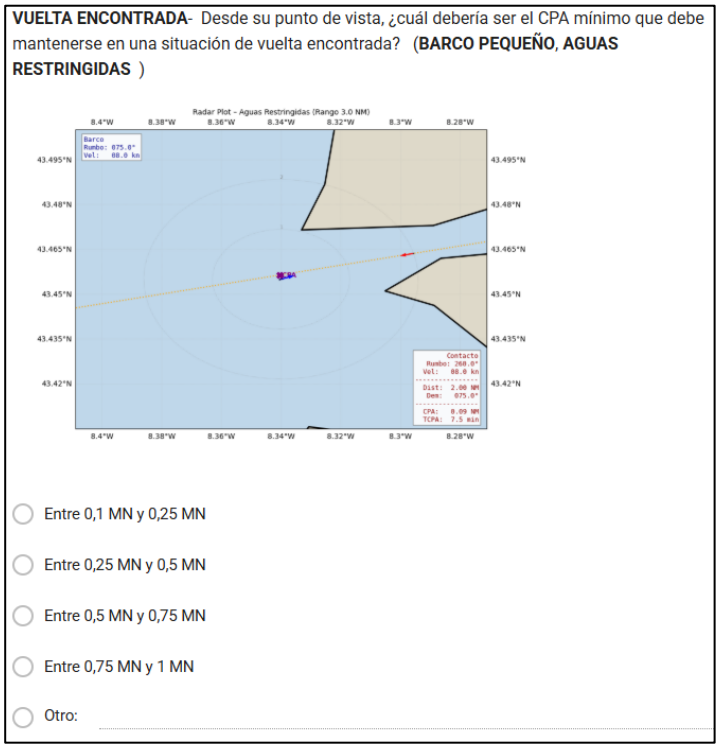


Figura 3-2: Pregunta del cuestionario correspondiente al bloque de preguntas específicas.

3.1.4 Perfil de los encuestados

La encuesta está dirigida a personas relacionadas con el ámbito marítimo, con conocimientos y experiencia suficientes para interpretar correctamente las situaciones planteadas y emitir un criterio fundamentado. El diseño del cuestionario asume que los participantes poseen nociones básicas sobre:

- Maniobra y gobierno de buques.
- Conceptos como CPA, tipos de encuentro y obligaciones de maniobra.

- Diferencias operativas entre navegación en aguas abiertas y en aguas restringidas.

Este perfil permite que las respuestas obtenidas reflejen criterios realistas y aplicables a la navegación real, aportando valor al análisis comparativo con los resultados de las simulaciones desarrolladas en el trabajo. En concreto, los participantes en la encuesta serán oficiales de la Armada destinados en la Escuela Naval Militar, procedentes de los diferentes departamentos que componen la institución.

3.1.5 Análisis e interpretación de los resultados de la encuesta

3.1.5.1 Consideraciones sobre la muestra y el tratamiento de datos

La encuesta recoge un conjunto reducido de respuestas, por lo que sus resultados deben interpretarse con prudencia desde el punto de vista estadístico. No obstante, su valor dentro de este trabajo no reside en la representatividad poblacional, sino en su utilidad como fuente de criterio experto para la construcción del modelo evaluador.

Asimismo, durante el análisis se observa que algunas respuestas han sido introducidas en formato libre. Esta circunstancia no afecta negativamente al estudio, pero sí ha requerido un proceso de normalización previa, con el fin de agrupar respuestas equivalentes y facilitar su interpretación.

Este aspecto resulta, de hecho, metodológicamente relevante, ya que evidencia que el sistema final debe estar preparado para trabajar con criterios expresados de forma heterogénea y transformarlos en reglas objetivas y consistentes.

3.1.5.2 Resultados principales y análisis interpretativo

3.1.5.2.1 Maniobra apreciable: cambio de rumbo y cambio de velocidad

Uno de los bloques iniciales de la encuesta se centra en determinar qué magnitud de maniobra se considera suficientemente evidente para ser apreciada por otro buque.

En relación con el cambio de rumbo, las respuestas muestran una cierta dispersión, aunque con una tendencia clara hacia maniobras no triviales. La mayor parte de los encuestados se sitúa en valores que implican una alteración perceptible de la derrota, lo que sugiere que, desde el punto de vista práctico, no se consideran adecuadas maniobras de muy pequeña entidad cuando se pretende resolver una situación de tráfico de forma clara. La Figura 3-3 presenta la pregunta sobre el cambio de rumbo considerado suficiente en la encuesta, observándose una dispersión de respuestas que coinciden en que el cambio debe ser superior a cinco grados. (Fuente propia)

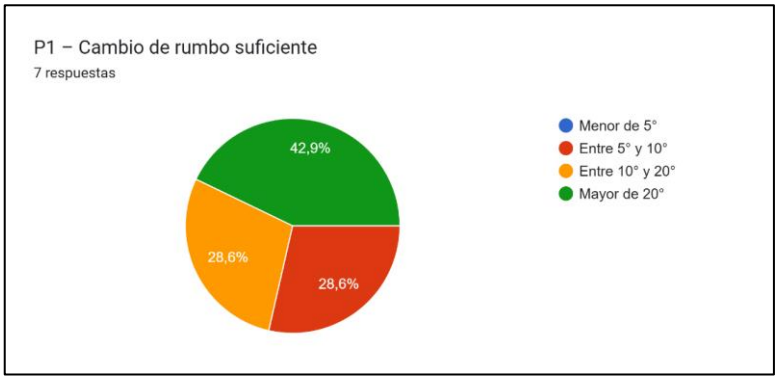


Figura 3-3: Pregunta correspondiente a la encuesta respecto al cambio de rumbo suficiente.

Respecto al cambio de velocidad, el consenso es mayor. La mayoría de las respuestas se concentra en el rango de variaciones moderadas, pero claramente apreciables, lo que permite diferenciar entre una maniobra intencionada y una mera oscilación operativa normal de la navegación. La Figura 3-4 muestra

la pregunta correspondiente a la variación de velocidad suficiente dentro de la encuesta, mostrando una mayoría de respuestas en una variación superior a los tres nudos. (Fuente propia)

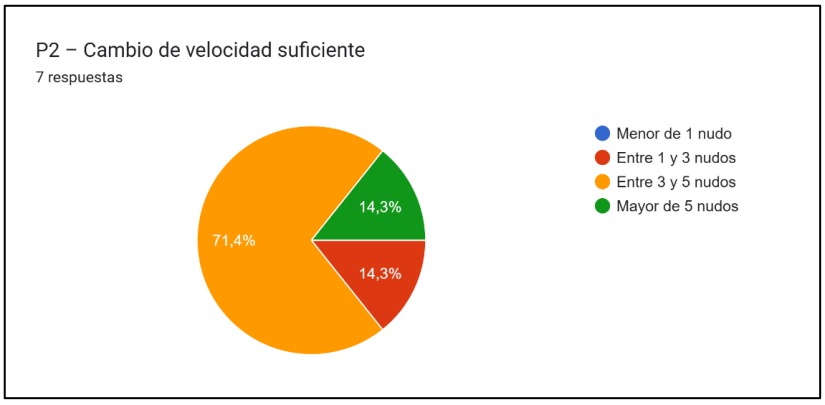


Figura 3-4: Pregunta correspondiente a la encuesta respecto a la variación de velocidad suficiente.

Estos resultados respaldan la conveniencia de introducir en el modelo criterios mínimos de maniobra efectiva. De esta forma, el evaluador pueda distinguir entre ajustes menores sin valor táctico real y maniobras suficientemente claras como para considerarse una respuesta válida y reconocible.

Por ello, dentro de la propia evaluación se considerarán aceptables las maniobras con un cambio de rumbo mayor de 15 grados. Respecto a la variación de velocidad, se considerará aceptable una variación superior a 3 nudos.

Por último, la encuesta muestra una preferencia muy marcada por la combinación de rumbo y velocidad como mecanismo de resolución de situaciones de encuentro. Esta respuesta resulta especialmente significativa para el diseño del sistema, ya que confirma que la evaluación no debe limitarse a un único parámetro.

3.1.5.2.2 Distancia de intervención cuando el buque obligado no maniobra

En la pregunta relativa a la distancia a partir de la cual el buque propio debería actuar si el buque obligado no lo hace, las respuestas se concentran de forma clara en un rango intermedio-alto, que refleja una actitud prudente. Este resultado pone de manifiesto que los encuestados priorizan una intervención con margen suficiente, evitando actuaciones tardías que reduzcan el tiempo de reacción y aumenten el riesgo. La Figura 3-5 muestra la distribución de respuestas relativas a la pregunta previamente mencionada. Los resultados evidencian una clara concentración en el intervalo comprendido entre 1 y 2 millas náuticas, seleccionado por el 85,7 % de los encuestados. (Fuente propia)

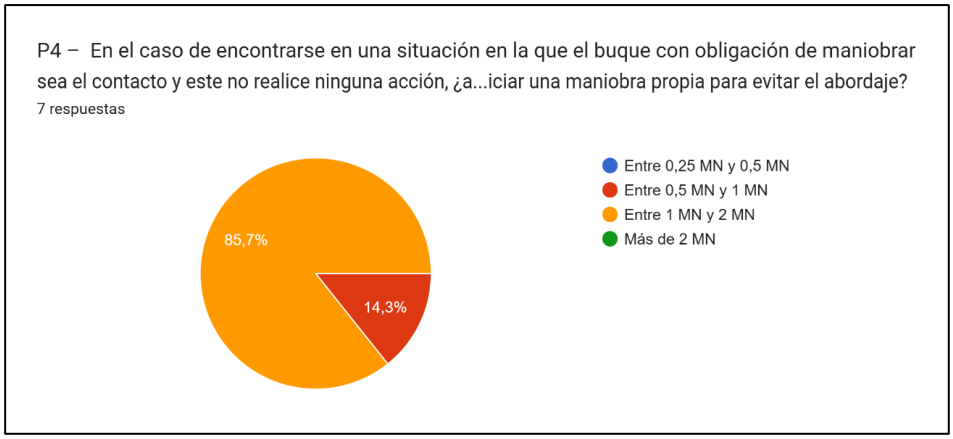


Figura 3-5: Distribución de respuestas sobre la distancia a la que el buque propio debería iniciar una maniobra en caso de que el buque obligado a maniobrar no actúe

La encuesta aporta aquí una base especialmente útil para definir un criterio de intervención tardía, permitiendo que el sistema penalice maniobras iniciadas por debajo de un umbral de seguridad razonable y valore positivamente aquellas realizadas con la debida antelación. Con ello, se establece una milla náutica como límite para comenzar la realización de las maniobras en aguas abiertas y una distancia de quinientas yardas en el caso de navegar en una zona de aguas restringidas.

3.1.5.2.3 Clasificación por tamaño del buque (pequeño, mediano y grande)

Las respuestas relativas a la clasificación por eslora muestran una tendencia bastante definida en los extremos (buques pequeños y grandes), mientras que la categoría intermedia presenta mayor dispersión.

Este patrón es coherente con la práctica habitual: las categorías "pequeño" y "grande" suelen estar más asentadas en la experiencia operativa, mientras que la categoría "mediano" admite mayor flexibilidad según el contexto y el tipo de tráfico analizado.

Estos resultados justifican el uso de categorías de tamaño con fines funcionales dentro del sistema, entendidas como rangos operativos de evaluación y no como clasificaciones normativas absolutas. Esto permite adaptar los márgenes de seguridad a las características del contacto de forma razonable. Por ello, se establecerán dos tamaños distintos para evaluar las distancias de seguridad con los contactos durante la navegación. Se establecerán como barcos de pequeño tamaño únicamente aquellos que tengan una eslora menor de 20 metros. El resto de los contactos se considerarán buques grandes, asignándole las distancias de seguridad correspondientes a ese tamaño.

3.1.5.2.4 Distancias mínimas de vigilancia en aguas libres y aguas restringidas

La encuesta evidencia una diferencia clara entre los criterios de vigilancia en aguas libres y en aguas restringidas.

- En aguas libres, los encuestados tienden a situar la detección y vigilancia en distancias mayores.
- En aguas restringidas, el umbral disminuye, aunque se mantiene un margen suficiente para permitir una valoración temprana de la situación.

Se establecerá como criterio de análisis la consideración de aquellos buques que, en algún momento de la navegación, se encuentren a una distancia inferior a 4 millas náuticas. Los contactos que permanezcan fuera de ese umbral se descartarán, al no aportar información relevante para la evaluación, ya que su lejanía impide que generen una situación susceptible de análisis.

La Figura 3-6 muestra las respuestas relativas a la distancia mínima a partir de la cual, según los encuestados, debe mantenerse vigilancia sobre los contactos en aguas restringidas. La mayoría de los participantes (57,1 %) considera que la vigilancia debería iniciarse al menos a 4 millas náuticas. En conjunto, los resultados reflejan una tendencia general a establecer la vigilancia con una anticipación suficiente. (Fuente propia)

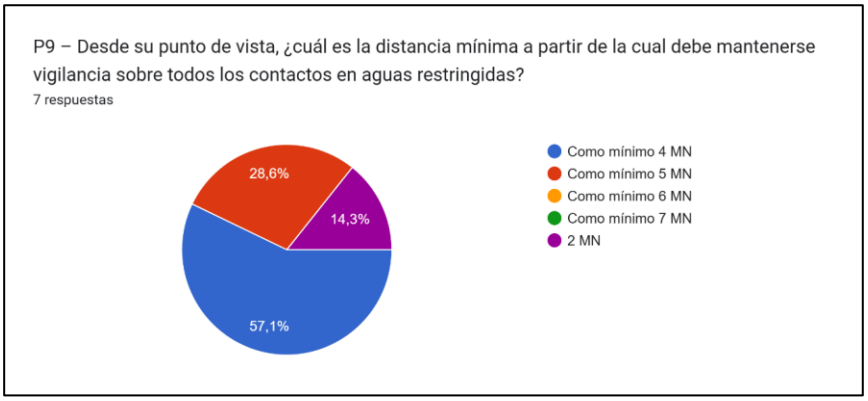


Figura 3-6: Distribución de respuestas sobre la distancia mínima a partir de la cual debería mantenerse vigilancia sobre los contactos en aguas restringidas.

3.1.5.2.5 Análisis de resultados sobre el DCPA

El bloque relativo al DCPA es el más relevante de la encuesta, ya que proporciona una base directa para fijar los márgenes de seguridad que evaluará el sistema automático.

Los resultados muestran una tendencia muy consistente hacia DCPA relativamente amplios, con independencia del tipo de encuentro. Esta preferencia por márgenes holgados refleja una concepción de la seguridad basada en la anticipación, la claridad de maniobra y la previsibilidad.

En aguas libres, los encuestados consideran deseable mantener una separación suficiente que permita evitar situaciones ambiguas y facilite la lectura de intenciones entre buques. Esto permite establecer un criterio de referencia relativamente estable para aguas libres, simplificando el diseño del evaluador sin perder coherencia operativa. Se establece una distancia estándar de 1 MN para todos los contactos que se produzcan en lugares con aguas libres. De esta forma se establece un criterio de seguridad amplio sin diferenciar con el tipo de buque que se produce el encuentro.

En aguas restringidas, las respuestas muestran una reducción de los márgenes aceptados de CPA, lo que resulta esperable debido a las limitaciones del entorno. Sin embargo, el análisis también sugiere que los encuestados no aplican un criterio único para todas las situaciones, sino que ajustan el margen en función de la geometría del encuentro.

Se aprecia una tendencia a exigir mayor prudencia en situaciones más sensibles (por ejemplo, cruce por estribor), mientras que en otros casos se aceptan márgenes más reducidos, siempre dentro de un rango considerado seguro por la práctica operativa.

Este resultado es especialmente valioso porque justifica un modelo de evaluación contextual, en el que el CPA admisible dependa del tipo de encuentro, del entorno (libre o restringido) y del tamaño del contacto.

A partir de los resultados obtenidos en la encuesta, se establecen los márgenes de referencia recogidos en la Tabla 3-1, que servirán como base para la parametrización de las distancias de seguridad utilizadas en el evaluador automático desarrollado en este trabajo. (Fuente propia)

Tipo de buque	Situación	Distancia de referencia (MN)
Buque pequeño	Alcance	0,25 – 0,5
	Vuelta encontrada	0,25 – 0,5
	Cruce por estribor	0,25 – 0,5
	Cruce por babor	0,25 – 0,5
Buque grande	Alcance	0,25 – 0,5
	Vuelta encontrada	0,25 – 0,5
	Cruce por estribor	0,5 – 0,75
	Cruce por babor	0,25 – 0,5
Margen general	Distancia permanente	0,5

Tabla 3-1: Márgenes de referencia de distancia mínima en aguas restringidas por situación

3.1.5.3 Conclusiones del análisis de la encuesta

A partir del estudio de resultados, pueden extraerse las siguientes conclusiones principales:

- La maniobra considerada válida debe ser claramente apreciable, tanto en rumbo como en velocidad, evitando cambios de pequeña magnitud que no reflejen una acción resolutiva.
- Existe una preferencia clara por maniobras que combinan rumbo y velocidad, lo que refuerza el diseño de un evaluador basado en múltiples variables y no en un único parámetro.
- La intervención del buque propio, cuando el buque obligado no maniobra, debe producirse con antelación suficiente de una milla náutica en aguas abiertas y quinientas yardas en aguas restringidas, lo que justifica la introducción de criterios automáticos de maniobra tardía.
- Los encuestados diferencian de forma consistente entre aguas libres y aguas restringidas, tanto en vigilancia como en márgenes de CPA, lo que respalda el uso de umbrales específicos por entorno.
- La encuesta aporta una base práctica y razonada para la definición de umbrales, mejorando la trazabilidad del sistema y reduciendo la arbitrariedad en la configuración del evaluador.

Los resultados de la encuesta se emplean en este trabajo como referencia empírica para la calibración del sistema evaluador, complementando la doctrina aplicable, el análisis técnico y los criterios de diseño del proyecto.

De este modo, los parámetros del sistema no se establecen de forma arbitraria, sino que se fundamentan en una combinación de criterio experto, experiencia operativa y su correspondiente formalización dentro del modelo de evaluación. Asimismo, dichos parámetros se han diseñado para ser modificables, lo que refuerza el objetivo de desarrollar un evaluador robusto y equitativo, pero al mismo tiempo adaptable a las necesidades específicas de los instructores del SIMNAV.

3.2 División del sistema evaluador

El sistema evaluador desarrollado en el presente proyecto se estructura en dos bloques principales con el objetivo de abordar de manera ordenada, coherente y metodológica los aspectos más relevantes vinculados a la navegación. Esta división no responde únicamente a una cuestión organizativa, sino que constituye una decisión conceptual orientada a separar dos dimensiones fundamentales de la seguridad marítima: la seguridad global de la derrota y la gestión individual de contactos.

En consecuencia, el proyecto se articula en:

- Un bloque dedicado a la seguridad global en la navegación, centrado en la evaluación de la permanencia en zonas seguras y el respeto de márgenes espaciales.
- Un bloque dedicado al análisis individual de contactos, orientado a la evaluación del comportamiento del buque propio frente a otras unidades conforme al Reglamento Internacional para Prevenir los Abordajes y distancias de seguridad.

El desarrollo de ambos bloques se lleva a cabo mediante su aplicación en escenarios operativos reales, específicamente en las áreas marítimas de Rota y Ferrol. Esta elección permite enmarcar los resultados obtenidos dentro de contextos habituales de operación y adiestramiento en la Armada, aportando realismo, validez práctica y coherencia con los entornos donde se desarrollan los ejercicios de navegación y formación del personal.

3.3 Entorno de desarrollo y herramientas empleadas

El desarrollo del presente trabajo se ha llevado a cabo mediante un entorno de programación orientado al análisis de datos y a la visualización técnica, seleccionando herramientas que permiten combinar procesamiento de gran cantidad de información, análisis geométrico y generación automática de informes gráficos.

3.3.1 Lenguaje de programación

El lenguaje empleado para el desarrollo del evaluador ha sido Python, debido a su versatilidad, amplia comunidad científica y elevada disponibilidad de librerías especializadas en análisis de datos y representación gráfica.

Python ofrece varias ventajas relevantes para este proyecto:

- Sintaxis clara y estructurada, adecuada para proyectos académicos.
- Amplio ecosistema de librerías científicas.
- Facilidad para la manipulación de datos en formato tabular.
- Integración sencilla con herramientas de generación de informes.
- Capacidad para estructurar el código de forma modular y escalable.

Estas características lo convierten en una herramienta idónea para el tratamiento de registros AIS y el desarrollo de un sistema evaluador basado en criterios normativos.

3.3.2 Entorno de ejecución

El entorno de trabajo se ha configurado mediante Anaconda, utilizando un entorno virtual específico para el proyecto. Esta configuración permite controlar las versiones de las librerías empleadas, garantizar la reproducibilidad del sistema y evitar conflictos entre dependencias.

El desarrollo y las pruebas del código se han realizado en Jupyter Notebook, lo que ha facilitado:

- La ejecución secuencial por bloques.
- La depuración progresiva.
- La visualización inmediata de resultados intermedios.
- El ajuste iterativo de parámetros de evaluación.

Esta metodología ha permitido validar cada fase del procesamiento antes de integrarla en el sistema final automatizado.

3.3.3 Librerías utilizadas

El núcleo funcional del evaluador se basa en un conjunto de librerías especializadas que permiten realizar el tratamiento de datos, análisis geométrico y generación de representaciones gráficas.

3.3.3.1 Pandas

La librería Pandas constituye la base del tratamiento de datos. Su uso se centra en:

- Lectura de archivos CSV generados por el simulador, tanto del barco propio como de los diferentes contactos.
- Limpieza y depuración de registros.
- Filtrado de datos.
- Cálculo de nuevas variables, como por ejemplo el DCPA o el TCPA.

El uso de estructuras bidimensionales y etiquetadas permiten organizar la información de manera estructurada y facilita la aplicación de criterios lógicos de evaluación, analizando trayectorias y movimientos de los diferentes contactos.

3.3.3.2 NumPy

La librería NumPy se emplea para realizar operaciones matemáticas y vectoriales necesarias para:

- Cálculo de distancias relativas.
- Operaciones trigonométricas para determinación de rumbos.
- Conversión de ángulos.
- Cálculos de proyecciones geométricas.

Su eficiencia computacional resulta especialmente útil al trabajar con múltiples contactos simultáneamente.

3.3.3.3 Matplotlib

La librería Matplotlib se utiliza para la generación de representaciones gráficas del ejercicio de navegación. Entre sus aplicaciones se incluyen:

- Representación de derrotas.
- Visualización de evolución temporal de distancias.
- Gráficas de DCPA y TCPA.
- Diagramas comparativos entre contactos.

La representación visual constituye un elemento fundamental para la evaluación cualitativa del ejercicio, pero es de especial importancia en la función didáctica.

3.3.3.4 Cartopy

La librería Cartopy permite integrar datos geográficos en mapas con proyección cartográfica real. Su uso resulta clave para:

- Representar trayectorias sobre cartografía.
- Añadir líneas de costa.
- Visualizar encuentros en contexto geográfico.
- Facilitar la interpretación espacial de las maniobras.

Esto aporta un componente técnico-profesional al evaluador, aproximándolo a herramientas reales de análisis marítimo.

3.3.3.5 Otras librerías auxiliares

Se han empleado además librerías complementarias como:

- *glob* para la lectura automática de múltiples archivos.
- *os* para la gestión de rutas.
- *pathlib* para estructuración de directorios.
- *datetime* para tratamiento de marcas temporales.
- *matplotlib.backends.backend_pdf* para la generación automática de informes en formato PDF.

Estas herramientas permiten automatizar completamente el proceso de evaluación, desde la lectura de datos hasta la generación del informe final.

3.3.4 Filosofía de diseño del sistema

El evaluador ha sido concebido bajo los principios de la automatización completa del proceso y de la reproducibilidad de resultados. De esa forma, se puede obtener una gran escalabilidad ante múltiples escenarios y objetividad en los criterios de evaluación.

El proyecto se ha estructurado siguiendo un enfoque modular, separando:

- Carpeta de datos brutos
- Carpeta de tablas procesadas.
- Carpeta de imágenes generadas.
- Informes PDF finales.

Este diseño permite mantener la trazabilidad de los datos a lo largo de todo el proceso, garantizando que cada resultado pueda relacionarse con su origen y facilitando la verificación y validación del análisis. Además, ofrece una estructura flexible que favorece futuras ampliaciones o modificaciones sin

comprometer la coherencia del sistema. Del mismo modo, posibilita la repetición del análisis bajo distintos escenarios, lo que resulta fundamental para la comparación de resultados y la evaluación de diferentes supuestos. Por último, contribuye a mejorar la claridad estructural del proyecto, organizando la información de forma lógica y comprensible.

3.4 Desarrollo del evaluador automático de seguridad en la navegación

Este bloque de código implementa la evaluación de la seguridad en la navegación. Se ha desarrollado en dos entornos operativos diferentes, Rota y Ferrol. Concretamente se han elaborado para la evaluación de dos ejercicios recogidos en la D-CP-09. A continuación se describe paso a paso sus fundamentos, funcionamiento y evaluación.

3.4.1 Contexto doctrinal y justificación

El desarrollo del presente programa se fundamenta en lo establecido en el manual D-CP-09. En particular, la navegación en aguas restringidas se encuentra regulada en el Volumen II (Navegación), Capítulo 2, Sección I, donde se definen los estándares operativos, las herramientas necesarias y los criterios doctrinales que garantizan una navegación precisa y segura en canales, rías o zonas próximas a costa.

Según la doctrina, la navegación en aguas restringidas se articula en tres fases interdependientes: preparación, briefing y ejecución. El evaluador inteligente desarrollado en este trabajo se centra específicamente en dos de estos pilares fundamentales: la fase de preparación y la fase de ejecución. La fase de briefing, aunque doctrinalmente relevante, queda fuera del alcance técnico del presente desarrollo por su carácter eminentemente humano y comunicativo.

El manual recoge además una serie de elementos técnicos imprescindibles para la correcta elaboración del cuaderno de notas del Oficial Ayudante de Derrota (OAD). Estos elementos constituyen la base técnica sobre la que se sustenta una navegación segura y, por tanto, representan parámetros clave que el sistema desarrollado deberá considerar para permitir una evaluación objetiva y fundamentada. Entre los principales aspectos técnicos destacan los siguientes:

- Línea Límite de Peligro (LDL): Se trata de un veril de seguridad que delimita las aguas navegables en función del calado del buque. Su cálculo se realiza sumando al calado un margen de seguridad, habitualmente dos metros, y restando la altura de la marea prevista.
- Demoras guía: Son referencias visuales alineadas por la proa o por la popa que permiten detectar de manera inmediata cualquier desviación lateral respecto a la derrota prevista. El desarrollo de las derrotas navegables en ambos entornos se desarrollará teniendo en cuenta este factor.
- Puntos de caída (PC): Son los puntos exactos en los que debe iniciarse un giro. Su determinación se basa en la curva de evolución del buque, considerando especialmente el diámetro táctico. Habitualmente se materializan mediante demoras a puntos notables, preferiblemente paralelas al nuevo rumbo, lo que permite corregir desviaciones acumuladas antes de ejecutar la maniobra. Las zonas navegables diseñadas deben contener los márgenes necesarios para contener los desplazamientos producidos por el giro durante los cambios de rumbo.

Todos estos elementos doctrinales han sido incorporados en el diseño de las zonas navegables utilizadas en los entornos operativos previamente mencionados. En consecuencia, el sistema desarrollado permite evaluar de manera indirecta la correcta aplicación de estos criterios técnicos. De esta manera, si el alumno navega adecuadamente por la derrota propuesta, se entiende que ha interiorizado y aplicado correctamente los fundamentos doctrinales que sustentan su preparación.

Asimismo, los dos entornos seleccionados se abordan desde perspectivas operativas diferenciadas. Este hecho permite analizar la navegación en aguas restringidas bajo escenarios distintos pero complementarios.

En el caso de Rota, el estudio se plantea como un ejercicio de navegación en aguas restringidas en el que se introducen una serie de bajos ficticios que delimitan zonas no navegables. Estos bajos generados específicamente para este entorno simulan los empleados en el proceso de calificación operativa de este ejercicio llevado a cabo por el Centro de Valoración y Apoyo a la Calificación Operativa para el Combate (CEVACO).

Por su parte, el entorno de Ferrol se analiza bajo el planteamiento de un ejercicio tipo Pilotex en canal dragada. En esta modalidad, la derrota se encuentra previamente establecida y el margen de seguridad viene determinado por un ancho de seguridad establecido. A diferencia del caso anterior, el énfasis no se sitúa tanto en la identificación de peligros aislados, sino en el mantenimiento preciso del buque dentro de un espacio muy limitado y perfectamente definido.

La selección de estos dos escenarios responde a un criterio plenamente intencionado. Ambos ejercicios constituyen referencias fundamentales en el proceso de obtención de la calificación operativa de las unidades de la flota, y, al mismo tiempo, representan los principales ejercicios de navegación desarrollados en las Lanchas de Instrucción de la Escuela Naval Militar. De este modo, el análisis conjunto de Rota y Ferrol permite abarcar las dos tipologías más relevantes de navegación restringida presentes tanto en el ámbito operativo como en el formativo.

3.4.2 Desarrollo y obtención de datos

En primer lugar, se desarrollan los dos entornos operativos destinados a la obtención y representación de los datos relevantes, que posteriormente serán utilizados en el proceso de evaluación.

3.4.2.1 Carga de capas geoespaciales

La fase inicial del programa consiste en la carga de las capas geográficas necesarias para definir el entorno de estudio. Estas capas constituyen la base cartográfica y batimétrica sobre la que se desarrollará el análisis posterior. Las capas empleadas son las siguientes:

- Archivos SOUNDG.shp: capas puntuales que contienen las sondas. Cada entidad corresponde a una posición geográfica concreta donde se ha registrado un valor de profundidad. Estas capas representan la información batimétrica primaria del área de estudio.
- Línea de costa: capa lineal cuya inclusión es fundamental para distinguir entre áreas terrestres y zonas navegables, así como para identificar celdas o espacios que puedan quedar parcial o totalmente fuera del dominio marítimo. Esta información se obtiene del Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG) procedente del Instituto Hidrográfico de la Marina. [26]

Cada uno de estos archivos se importa generando un *GeoDataFrame* independiente para cada capa posibilitando el almacenamiento, consulta y manipulación de los datos. Esta estructura combina una tabla de atributos con una columna geométrica, permitiendo realizar tanto análisis numéricos como operaciones espaciales sobre las entidades representadas.

3.4.2.2 Homogeneización del sistema de referencia espacial

Una vez cargadas las capas, se procede a la unificación de su sistema de referencia espacial. Todas las capas se proyectan al sistema geodésico WGS84 (EPSG:4326), que utiliza coordenadas geográficas expresadas en latitud y longitud.

Esta etapa resulta crítica desde el punto de vista técnico. Las operaciones de geoprocesamiento requieren que todas las entidades involucradas compartan el mismo sistema de referencia. En caso contrario, podrían producirse desplazamientos aparentes, errores de superposición o resultados geométricamente inconsistentes.

3.4.2.3 Definición del área de interés y delimitación de las capas

Una vez cargadas y homogeneizadas las capas geoespaciales, el siguiente paso del programa consiste en delimitar con precisión el área de estudio sobre la que se desarrollará el análisis. Esta fase resulta

fundamental para optimizar el procesamiento de datos y garantizar que las operaciones posteriores se realicen exclusivamente sobre la zona marítima relevante.

El área de interés se define inicialmente estableciendo límites con latitudes y longitudes específicas. Estos valores determinan un rectángulo envolvente o *bounding box*, que constituye la delimitación espacial del entorno operativo.

Mediante la librería Shapely se construye un polígono rectangular a partir de estos cuatro límites. Este polígono representa geométricamente el marco de análisis preliminar y se transforma posteriormente en un *GeoDataFrame*, permitiendo su utilización en operaciones espaciales posteriores.

La utilización de una caja delimitadora responde a un criterio de eficiencia y coherencia espacial: se restringe el análisis a la zona donde realmente existe información batimétrica disponible, evitando el procesamiento innecesario de áreas externas. La Tabla 3-2 muestra los límites del rectángulo envolvente establecidos en ambos entornos.

Zona de estudio	Longitud Oeste	Latitud Sur	Longitud Este	Latitud Norte
Ría de Ferrol	-8.40	43.375	-8.20	43.49
Bahía de Rota	-6.44	36.47	-6.20	36.67

Tabla 3-2: Límites geográficos de las zonas de estudio

Definido el bounding box, el programa procede al recorte de las capas principales. Esta operación realiza una intersección espacial entre cada capa y el polígono delimitador, conservando únicamente las geometrías que quedan total o parcialmente dentro del área definida.

3.4.2.4 Procesamiento y preparación geométrica de la línea de costa

La línea de costa constituye un elemento estructural clave dentro del modelo espacial desarrollado, ya que define el límite físico entre las áreas navegables y el dominio terrestre. Su tratamiento adecuado resulta esencial para garantizar la fiabilidad del análisis posterior, especialmente en lo relativo a la identificación de zonas no navegables y a la clasificación de riesgo.

La capa original de costa puede estar compuesta por múltiples segmentos independientes, resultado habitual de la digitalización cartográfica. Para facilitar su tratamiento posterior, el programa aplica el método *geometry.unary_union* de la librería Shapely. Esta operación realiza una fusión topológica de todas las geometrías lineales presentes en la capa, generando una única geometría continua que representa la línea de costa consolidada.

El resultado es una representación geométrica única y coherente de la costa, apta para ser utilizada como referencia estructural del dominio marítimo.

Una vez unificada la geometría, el programa aplica un proceso de densificación mediante una función específica denominada *densify_line (line, step)*. Este procedimiento consiste en insertar vértices adicionales a intervalos regulares a lo largo de la línea, según un parámetro de separación previamente definido (*step*). En términos prácticos, la densificación aumenta el número de puntos que describen la geometría sin modificar su forma general.

La necesidad de esta operación responde a criterios de precisión espacial. En su estado original, la línea de costa puede presentar tramos largos con pocos vértices, lo que implica una representación geométrica simplificada. Al incrementar la resolución geométrica de la línea de costa, se mejorará la precisión de las intersecciones espaciales con la construcción futura de una malla hexagonal y se reduce el riesgo de clasificaciones incorrectas de celdas cercanas al litoral.

El resultado del proceso de unificación y densificación se almacena. De este modo, la línea de costa queda preparada para ser utilizada en fases posteriores del programa.

3.4.2.5 Visualización preliminar de sondas y línea de costa

Una vez procesadas las capas principales y delimitado el área de interés, el programa incorpora una fase de visualización inicial cuyo objetivo es verificar la coherencia espacial de los datos y obtener una primera interpretación cualitativa del entorno batimétrico.

Para la generación del mapa preliminar se emplea la librería Cartopy, utilizando una proyección Mercator, adecuada para representaciones náuticas. Sobre esta proyección se representan la línea de costa densificada; las sondas batimétricas, representadas mediante un gráfico de dispersión y una malla de cuadrícula geográfica, que permite identificar fácilmente las coordenadas.

El rango de visualización del mapa se ajusta utilizando los límites previamente definidos por el *bounding box*. La Figura 3-7 muestra la visualización preliminar de las sondas con un gráfico de dispersión según la profundidad y de la línea de costa del entorno de Ferrol. (Fuente propia)

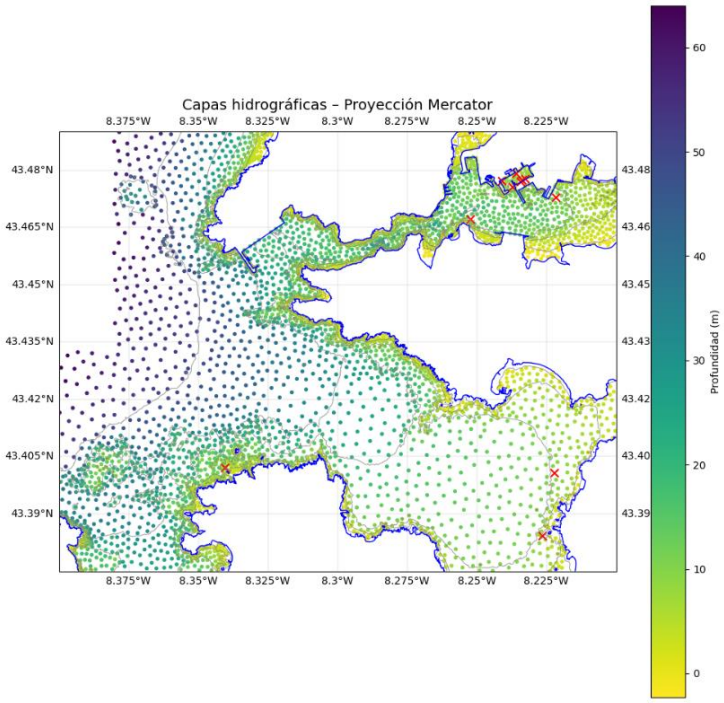


Figura 3-7:Visualización preliminar de sondas y línea de costa de la Ría de Ferrol

3.4.2.6 Creación bajos simulados en el entorno de Rota

La creación de los bajos simulados se lleva a cabo mediante un procedimiento de generación geométrica paramétrica sobre coordenadas geográficas. El objetivo de incorporar al escenario bajos simulados reside en la necesidad de evaluar ejercicios de navegación en aguas restringidas similares a los evaluados en las calificaciones operativas de los buques de la Armada.

En función de la forma deseada, los bajos se modelan a partir de dos configuraciones principales. En unos casos se emplearon geometrías elípticas orientadas, definidas mediante un semieje mayor, un semieje menor y una dirección principal. Esto permite simular bajos alargados y adaptados a una determinada disposición espacial. En otros casos se parte de radios base aproximadamente circulares, adecuados para representar zonas someras de menor extensión. Sobre estas formas teóricas se introduce una irregularidad controlada mediante funciones trigonométricas, modificando ligeramente el radio en cada dirección para evitar contornos excesivamente regulares. De este modo, se obtienen geometrías más naturales y plausibles desde el punto de vista visual y operativo, similares a las irregularidades que presentan los bajos en un entorno real.

Una vez calculadas las coordenadas de todos los puntos del contorno, éstas se agrupan en polígonos mediante la librería Shapely, generando así la representación espacial final de cada bajo simulado. El

uso de un número elevado de puntos para definir el perímetro permite conseguir polígonos suaves y continuos, mejorando su integración posterior en el sistema evaluador. Finalmente, todos los polígonos creados se almacenan en una lista común, lo que facilita su tratamiento conjunto dentro de las fases posteriores del proyecto. La Figura 3-8 muestra la representación espacial de la información batimétrica empleada en el entorno de simulación de Rota junto con la localización de los bajos generados artificialmente para el sistema evaluador. (Fuente propia)

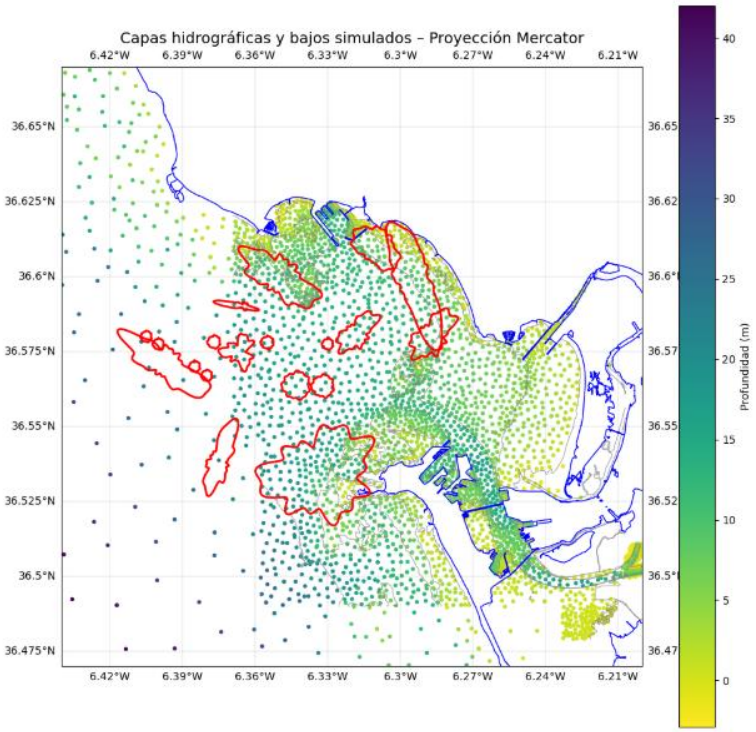


Figura 3-8: Distribución de sondas batimétricas y localización de bajos simulados en el área de Rota

3.4.2.7 Generación de la malla espacial hexagonal mediante H3

Uno de los elementos estructurales del sistema desarrollado es la transformación del espacio marítimo continuo en una representación discretizada que permita realizar análisis cuantitativos y comparables. Para ello se implementa una malla de celdas hexagonales utilizando la biblioteca H3, desarrollada por Uber, basada en un sistema jerárquico de indexación espacial hexagonal.

La elección de una discretización hexagonal frente a otras alternativas (como rejillas cuadradas o triangulaciones irregulares) responde a varias ventajas geométricas y analíticas: los hexágonos presentan menor distorsión direccional, mayor uniformidad en la distancia al centro y reducen problemas de orientación preferente en los ejes cardinales. Esto los convierte en una herramienta especialmente adecuada para modelar espacios de navegación.

El primer paso consiste en definir el polígono que delimitará el área a cubrir por la malla hexagonal. Para ello se utilizan las coordenadas mínimas y máximas previamente obtenidas en los entornos de Ferrol y Rota que describen un rectángulo envolvente en el sistema de referencia WGS84 (EPSG:4326).

El sistema H3 es jerárquico, lo que significa que permite definir distintos niveles de resolución. En este caso se selecciona una resolución igual a once. Este nivel genera celdas con una escala espacial del orden de decenas de metros (aproximadamente 25 metros), lo que proporciona un equilibrio adecuado entre precisión espacial y eficiencia computacional. El uso de resoluciones superiores implicaría un aumento significativo del número de celdas y, por tanto, del volumen de información a procesar durante el análisis. Además, debe tenerse en cuenta que la posición GPS del buque se representa mediante un único punto, mientras que los buques utilizados habitualmente en el simulador, como es el caso de las

fragatas de la clase Álvaro de Bazán, presentan una eslora cercana a los 150 metros. Por ello, una resolución mayor no aportaría un incremento significativo de precisión en la representación de la derrota, manteniendo la resolución 11 como un compromiso adecuado entre detalle y coste computacional.

Una vez definido el polígono exterior y la resolución, se emplea una función que devuelve todos los índices H3 cuyos hexágonos quedan contenidos dentro del polígono definido. El resultado es una lista de identificadores únicos, donde cada identificador representa una celda hexagonal específica dentro del sistema global H3. En este punto, el espacio de navegación ya no se interpreta como un dominio continuo, sino como un conjunto finito y estructurado de unidades espaciales discretas.

Sin embargo, los índices H3 son identificadores abstractos. Para poder realizar más tarde operaciones espaciales con otras bibliotecas como *GeoPandas* o *Shapely*, es necesario convertir cada índice en una geometría poligonal real. A partir de esta transformación, se genera un objeto *Polygon* para cada índice, obteniendo así una representación geométrica explícita de cada celda hexagonal. Una vez convertidos todos los índices en polígonos, se construye un nuevo *GeoDataFrame*.

Todas las geometrías se definen en el sistema de referencia EPSG:4326 (WGS84), garantizando la coherencia espacial con las capas previamente cargadas (sondas y costa).

Se verifica además que tanto la capa de sondas como la malla hexagonal compartan exactamente el mismo SRC (Sistema de Referencia de Coordenadas), condición indispensable para realizar uniones espaciales posteriores.

La generación de la malla H3 representa un punto clave dentro del desarrollo del programa. A partir de este momento:

- El espacio marítimo queda discretizado en unidades homogéneas.
- Cada celda puede asociarse a valores de profundidad.
- Se facilita la clasificación de riesgo por unidad territorial.
- Se prepara el modelo para integrar la derrota del buque dentro de un marco cuantificable.

En síntesis, la malla hexagonal convierte un entorno geográfico complejo y continuo en un sistema estructurado y evaluable, permitiendo establecer métricas objetivas y reproducibles para la posterior fase de evaluación de la navegación.

3.4.2.8 Asignación de sondas a las celdas y determinación de la profundidad mínima

Una vez generada la malla hexagonal H3 que discretiza el espacio marítimo, el siguiente paso consiste en integrar la información batimétrica en dicha estructura. Esta fase transforma la malla geométrica en una malla con información, donde cada celda incorpora un valor representativo de profundidad.

El procedimiento comienza con una unión espacial entre la capa de sondas recortada y el *GeoDataFrame* de celdas hexagonales. Cada punto de sonda se asigna al hexágono que lo contiene geométricamente.

El resultado de esta operación es un nuevo *GeoDataFrame* denominado en el que cada punto de sonda queda vinculado al identificador de la celda hexagonal correspondiente.

Una vez que cada sonda está asociada a un hexágono, se procede a agrupar la información por identificador de celda. Se obtiene un nuevo conjunto de datos donde cada celda queda asociada al valor mínimo de profundidad registrado en su interior.

La elección del valor mínimo no es arbitraria. Desde el punto de vista de la seguridad en la navegación, el criterio conservador exige considerar la menor profundidad disponible dentro de cada unidad espacial. Esto permite modelar el peor escenario posible dentro de la celda y evita sobreestimar el margen de seguridad.

Posteriormente, este resultado se integra nuevamente en la malla hexagonal mediante una operación de unión. De este modo, el *GeoDataFrame* pasa a incluir una nueva columna que representa la profundidad mínima medida en cada celda.

Otra cuestión relevante es el tratamiento de aquellas celdas hexagonales que intersecan con la línea de costa. Estas celdas pueden no contener sondas y, sin embargo, representar zonas claramente no navegables. Para evitar que estas áreas queden clasificadas como profundidad desconocida (*NaN*), se construye una máscara lógica que identifica todas las celdas cuya geometría interseca con la línea de costa previamente procesada. A dichas celdas se les asigna una sonda igual a 0 metros. Además, sirve para que en el siguiente paso de interpolación no se altere la línea de costa y se mantengan celdas con sondas de 0 metros delimitando las zonas de tierra.

3.4.2.9 Interpolación de profundidades faltantes y representación del modelo batimétrico

Tras la asignación de profundidades mínimas a cada celda hexagonal, se observa la existencia de unidades espaciales sin información directa de sonda. Estas celdas presentan valores nulos (*NaN*) en el atributo de sonda mínima, lo que impide disponer de un modelo continuo del fondo marino. Para resolver esta limitación se implementa un procedimiento de interpolación espacial mediante el método IDW (*Inverse Distance Weighted*), permitiendo estimar la profundidad en aquellas zonas donde no existen mediciones directas.

El *GeoDataFrame* hexagonal se proyecta a un sistema de referencia métrico, concretamente EPSG:25829. Esta transformación garantiza que las distancias se calculen en metros y no en grados geográficos. Sobre la versión proyectada se calculan los centroides de cada hexágono, incorporando sus coordenadas cartesianas como columnas. Estos centroides actúan como puntos representativos de cada celda para el cálculo de proximidad espacial.

El conjunto de celdas se divide en dos grupos: las celdas con profundidad conocida, que constituyen el conjunto de referencia y las celdas sin dato de profundidad, que requieren estimación.

Del primer grupo se extraen las coordenadas de los centroides y los valores asociados de sondas. Del segundo grupo se obtienen las coordenadas a interpolar. Esta diferenciación permite aplicar el algoritmo únicamente sobre las unidades que carecen de información directa.

La interpolación se implementa utilizando una estructura de búsqueda espacial basada en *KDTree* (árbol k-dimensional), que permite identificar de forma eficiente los k vecinos más próximos a cada celda sin dato (en este caso, k = 4).

Para cada punto a estimar se calculan pesos en función de la distancia a sus vecinos más cercanos según la expresión:

$$w_i = \frac{1}{d_i^p} \qquad \textbf{Ecuación 3-1}$$

Dentro de esta ecuación, (d) representa la distancia al vecino (i) y (p) es el exponente de ponderación (habitualmente p = 2). Este planteamiento se fundamenta en el principio de autocorrelación espacial: los valores cercanos influyen en mayor medida que los alejados.

El valor interpolado se obtiene como la suma ponderada de las profundidades conocidas dividida por la suma total de los pesos. Se aplican normalizaciones para evitar inestabilidades numéricas en caso de distancias extremadamente pequeñas.

Las celdas que carecían de dato original reciben el valor interpolado, de modo que cada unidad hexagonal dispone ahora de una profundidad final, ya sea medida directamente o estimada mediante interpolación.

Posteriormente, el *GeoDataFrame* se proyecta nuevamente a EPSG:4326 (WGS84), manteniendo la coherencia con el resto de las capas del sistema.

Con este paso, el modelo espacial queda completamente informado desde el punto de vista batimétrico, eliminando discontinuidades y garantizando cobertura total del dominio de estudio.

Como parte del proceso de validación y análisis exploratorio, el programa prepara los parámetros necesarios para la representación gráfica de la profundidad interpolada. La Figura 3-9 muestra la representación gráfica de la profundidad mínima efectiva de la bahía de Cádiz. (Fuente propia)

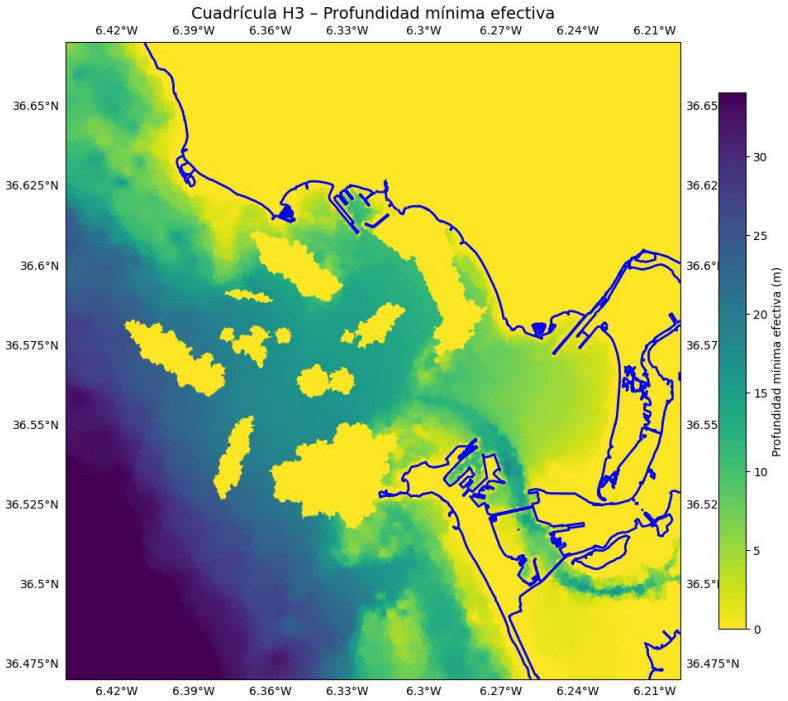


Figura 3-9: Representación de la profundidad mínima efectiva en la bahía de Rota junto con los bajos simulados

3.4.2.10 Carga y procesamiento de la derrota del buque

Una vez construido el modelo batimétrico continuo sobre la malla hexagonal, el siguiente paso consiste en incorporar la derrota realizada por el buque al sistema.

La derrota se importa desde un archivo en formato CSV, que contiene los puntos secuenciales que definen la trayectoria del buque. Cada registro incluye una columna denominada posición, en la que se encuentran combinadas las coordenadas geográficas (latitud y longitud) donde el programa procesará la información separándolo en dos columnas independientes denominadas lat (latitud) y lon (longitud).

Ambos valores se convierten a tipo numérico (*float*) para garantizar su correcta interpretación como coordenadas geográficas y permitir su posterior tratamiento geométrico. Una vez descompuestas las coordenadas, se genera el nuevo *GeoDataFrame* del barco. Este *GeoDataFrame* se define en el sistema de referencia EPSG:4326 (WGS84), asegurando coherencia espacial con la malla hexagonal y con el resto de las capas geográficas empleadas en el análisis.

La Figura 3-10 muestra el resultado de la representación georreferenciada de la derrota del buque en el entorno de Ferrol, donde cada punto corresponde a una posición registrada dentro de la trayectoria. En las representaciones gráficas, los puntos individuales pueden conectarse para formar una línea continua que represente el trayecto del buque, facilitando la interpretación visual del recorrido dentro del entorno analizado. (Fuente propia)

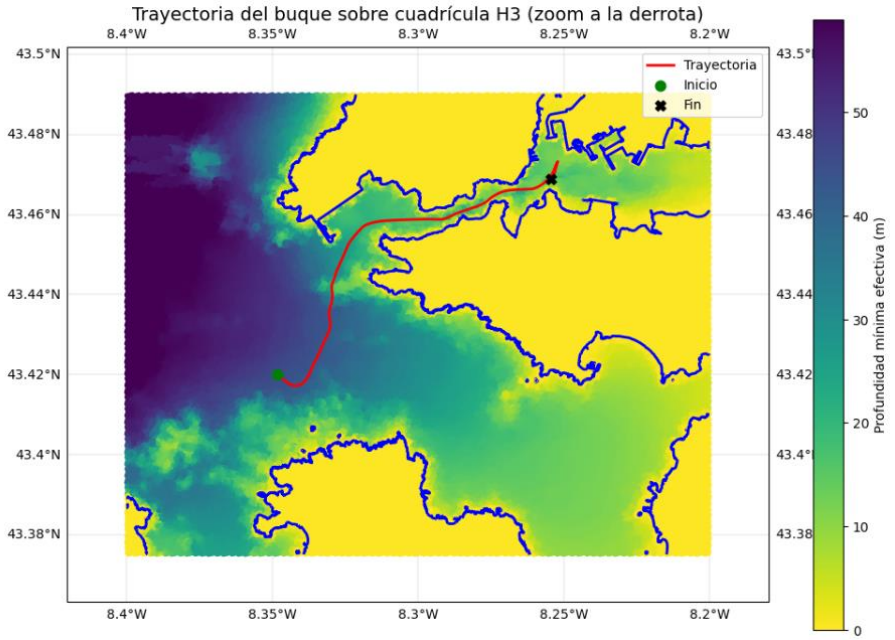


Figura 3-10: Trayectoria del buque sobre cartografía batimétrica del área de navegación en el entorno de Ferrol

3.4.2.11 Integración de la derrota con la malla hexagonal y celdas recorridas

Una vez construidos el modelo batimétrico continuo y el *GeoDataFrame* que representa la derrota del buque, el siguiente paso consiste en integrar ambos elementos. Esta fase permite determinar con precisión qué unidades espaciales discretizadas han sido atravesadas por la trayectoria y qué condiciones batimétricas presentaban.

De manera análoga al procedimiento empleado para las sondas, se realiza una unión espacial entre los puntos de la derrota y la malla hexagonal final.

Para ello se realiza una operación de unión entre *GeoDataFrame* y la malla final. Esta unión se realiza a través de la asignación espacial de cada punto a la celda contenida por el polígono. El resultado de esta operación es un nuevo *GeoDataFrame* en el que cada posición del buque queda asociada a un identificador correspondiente a la celda hexagonal en la que se encuentra.

Además, se realiza un mecanismo de filtrado de puntos que no estén contenidos en ninguna celda. Este hecho garantiza el análisis posterior, realizándolo únicamente sobre puntos válidos dentro del área de estudio establecida.

Una vez que cada punto de la derrota tiene asignada una celda hexagonal, se incorpora el valor de la sonda asociada a la celda correspondiente. De este modo, cada posición del barco queda enriquecida con el identificador de la unidad espacial y la profundidad en dicha unidad.

Como control adicional, se imprime el número de puntos que carecen de profundidad asociada. En condiciones normales, este número debería ser nulo, ya que los puntos fuera del dominio han sido previamente filtrados.

A partir del conjunto de puntos ya asociados a celdas hexagonales, se extrae la lista de identificadores atravesados por la trayectoria. Esta lista constituye el conjunto de celdas recorridas. El resultado es una representación espacial explícita del área exacta cubierta por la derrota dentro del modelo hexagonal. Este *GeoDataFrame* permite aplicar posteriormente clasificaciones de riesgo exclusivamente sobre las zonas realmente navegadas.

3.4.2.12 Definición del modelo de riesgo

Con el área navegada correctamente delimitada, se procede a definir un modelo sencillo pero coherente de clasificación de riesgo basado en criterios físicos y operativos.

El modelo se fundamenta en tres parámetros principales del buque y del entorno:

- Calado: altura mínima sumergida del buque.
- Margen de seguridad: incremento adicional que se añade al calado como medida conservadora. Se establece en tres metros.
- Altura de la marea: corrección debida al estado de la marea en el momento considerado.

A partir de estos parámetros se calcula la profundidad mínima segura:

$$D_{\text{SEGURA}} = CALADO + MARGEN - ALTURA\_MAREA \qquad \textbf{Ecuación 3-2}$$

Este valor representa el umbral por debajo del cual la navegación se considera potencialmente comprometida.

La marea predeterminada se establece como la media de la marea histórica del año anterior, modificable por el instructor en caso de que así lo considere.

Se implementa una función que categoriza cada celda según su profundidad final en relación con los umbrales definidos, el calado del barco y la sonda existente en esa zona. El criterio adoptado establece cuatro niveles:

- CRÍTICO: cuando la profundidad es inferior al calado.
- ALTO: cuando la profundidad es superior al calado, aunque inferior o igual a D_{SEGURA}.
- MEDIO: cuando la profundidad es superior a D_{SEGURA} pero inferior a dos veces la D_{SEGURA}.
- BAJO: cuando la profundidad supera dos veces la D_{SEGURA}.

Este modelo responde a una lógica progresiva de severidad, permitiendo discriminar entre situaciones de varada, margen reducido y condiciones seguras de navegación.

La función de clasificación se aplica a todas las celdas del *GeoDataFrame* de la malla final y de cada punto de la derrota del barco, generando una nueva columna denominada riesgo. De este modo, cada unidad espacial queda categorizada según su nivel de seguridad para la navegación.

3.4.2.13 Identificación de zonas críticas y construcción de corredores de navegación

Una vez clasificada cada celda hexagonal según su nivel de riesgo, el modelo avanza hacia un análisis espacial más estructurado, orientado a evaluar la interacción entre la derrota y las zonas potencialmente peligrosas, así como el margen lateral disponible durante la navegación.

Tras la asignación de la categoría de riesgo a cada celda, se identifican dos subconjuntos de especial interés operativo:

- Celdas clasificadas como CRÍTICO.
- Celdas clasificadas como ALTO.

Ambos conjuntos representan áreas de profundidad comprometida. Aunque pueden analizarse de forma independiente, también pueden considerarse conjuntamente como “zonas peligrosas”, al constituir regiones donde el margen de seguridad es insuficiente o reducido.

Con el objetivo de facilitar análisis espaciales posteriores, cada conjunto se transforma en una única geometría compuesta mediante el método *unary_union* de Shapely. Esta operación fusiona múltiples

polígonos individuales en una única geometría continua, eliminando límites internos y simplificando la estructura espacial. Como resultado se obtienen dos objetos geométricos principales, el crítico y el alto.

La unificación geométrica aporta varias ventajas analíticas, entre las que podemos destacar la capacidad de realizar comprobaciones de intersección directa con la derrota y la mejor capacidad para la visualización de áreas continuas de riesgo.

La Figura 3-11 representa la trayectoria seguida por el buque durante el ejercicio de navegación en relación con las zonas consideradas potencialmente peligrosas desde el punto de vista de la seguridad. (Fuente propia)

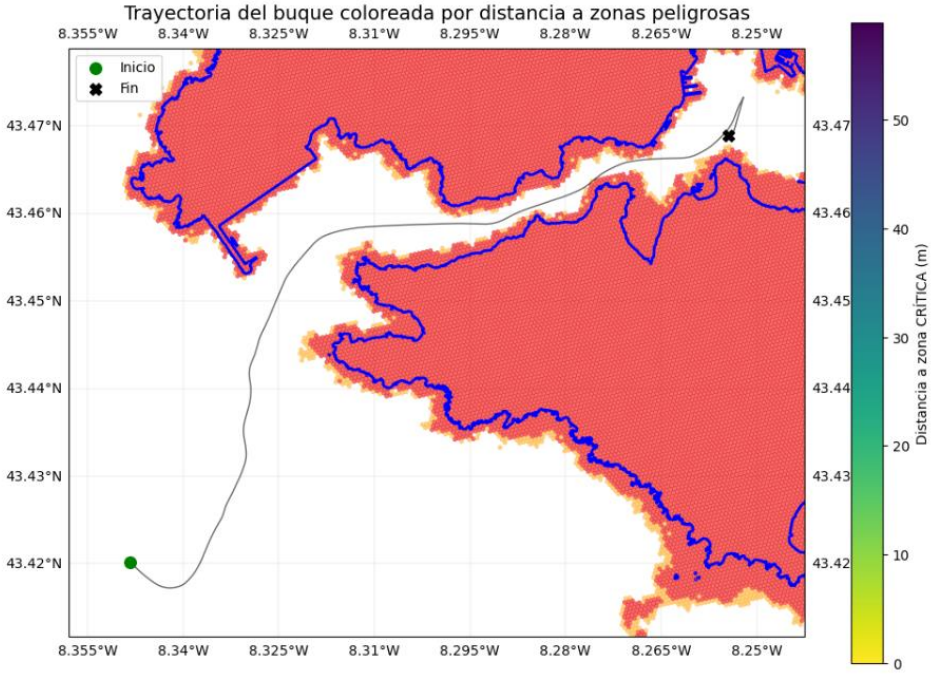


Figura 3-11: Trayectoria del buque en relación con la distancia a zonas críticas de seguridad

3.4.2.14 Corredores de navegación

Con el fin de evaluar el comportamiento del buque respecto a la derrota eficaz, se construyen corredores de navegación alrededor de la ruta teórica. Los corredores de navegación se establecen en función de las demoras guía, enfilaciones de entrada y pasos entre boyas de los entornos de navegación.

Se abordarán desde dos perspectivas distintas los dos entornos a analizar debido a la diferencia entre los ejercicios que evalúa cada uno.

3.4.2.14.1 Corredores en el entorno de Ferrol

Se define inicialmente la derrota eficaz en el sistema de referencia geográfico WGS84 (EPSG:4326). Sin embargo, para poder generar corredores con anchura real en metros, la línea se proyecta al sistema métrico, concretamente al sistema de referencia EPSG:25829 (UTM). Esta transformación permite aplicar operaciones de distancia con precisión.

Sobre la línea proyectada se aplica la función para generar los corredores con distintos anchos de canal, correspondiendo a (ancho total sumadas ambas bandas) 100 yardas, 200 yardas y 400 yardas convertidas previamente a metros (1 yarda ≈ 0.9144 m).

Los corredores generados en sistema métrico se proyectan nuevamente a WGS84 (EPSG:4326), garantizando coherencia con el resto del modelo espacial.

Una vez construidos los corredores de navegación de alrededor de la derrota, el siguiente paso consiste en discretizar dichas superficies en términos de la malla hexagonal H3, con el objetivo de estructurar el espacio lateral de navegación en bandas diferenciadas.

A partir de los tres polígonos generados previamente, se procede a su discretización mediante el sistema H3. Para cada polígono se emplea la misma función de resolución espacial definida en fases anteriores (resolución 11), garantizando coherencia con la malla batimétrica global. Se prioriza la existencia de una zona crítica antes que una zona del corredor, por lo que si hay un hexágono de la malla asignado como "CRÍTICO" o "ALTO" no se le asigna el valor correspondiente del corredor.

Con los tres conjuntos definidos, se establecen las bandas espaciales mediante operaciones de diferencia entre conjuntos:

- Núcleo (CORE): Representa la zona central, comprendida dentro de las 100 yardas de la derrota.
- Banda intermedia (MEDIO): Incluye las celdas situadas entre 100 y 200 yardas.
- Banda periférica (EXTERIOR): Corresponde al anillo comprendido entre 200 y 400 yardas.
- Banda (FUERA): Zona de aguas navegables que transcurren fuera de los corredores, pero que no deben ser utilizadas en la navegación de precisión.

Una vez definidas las bandas, se construye un *DataFrame* que asocia cada identificador con su zona correspondiente, pudiendo ser "CORE", "MEDIO", "EXTERIOR" o "FUERA". Este esquema permite etiquetar cada celda del entorno del corredor con una categoría espacial independiente del riesgo batimétrico. El *DataFrame* resultante se exporta a un archivo CSV, lo que facilita su futura utilización, trazabilidad e integración en otros sistemas de evaluación.

La Figura 3-12: Trayectoria del buque junto a los corredores y zonas críticas en FerrolFigura 3-12 muestra la trayectoria de un buque durante una navegación en el entorno de Ferrol. La trayectoria está superpuesta sobre la zonificación utilizada por el sistema evaluador para analizar la seguridad de la derrota dentro del canal navegable. El entorno marítimo aparece dividido en distintas áreas según su nivel de seguridad respecto a los corredores y a las zonas críticas. (Fuente propia)

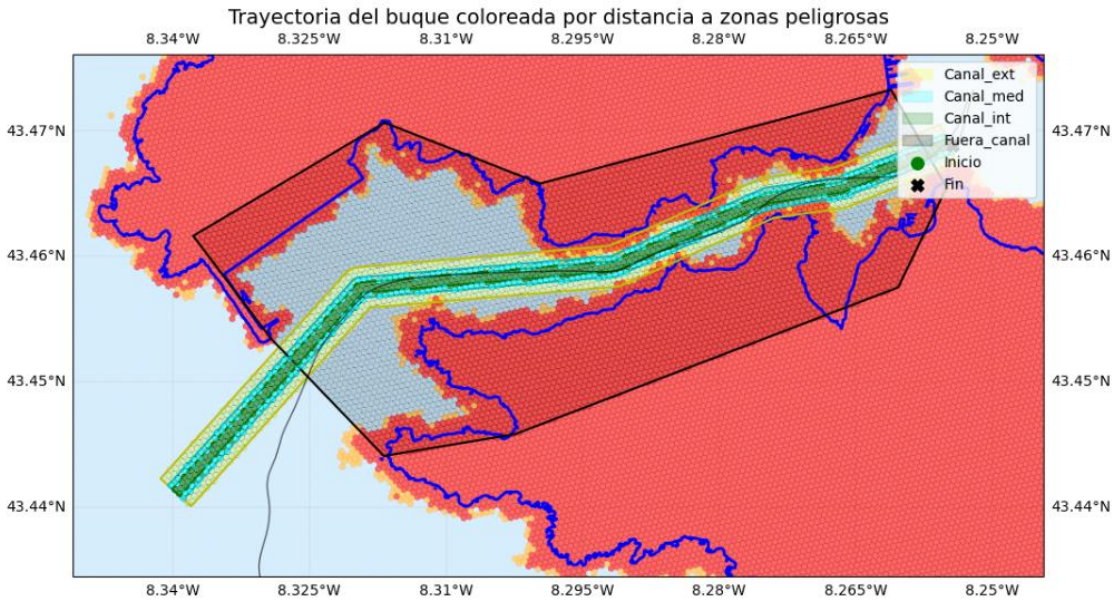


Figura 3-12: Trayectoria del buque junto a los corredores y zonas críticas en Ferrol

3.4.2.14.2 Corredores en el entorno de Rota

La zonificación del entorno de Rota no parte de una derrota eficaz definida mediante una línea central, sino de la construcción geométrica de un corredor navegable a partir de distintos tramos seleccionados de varios polígonos de referencia previamente generados. Estos polígonos proceden de expansiones espaciales realizadas sobre elementos del entorno y, de cada uno de ellos, se extraen aquellos segmentos de contorno que resultan útiles para definir el canal de navegación que se desea evaluar. La unión ordenada de estos tramos permite formar un nuevo polígono continuo que representa la envolvente principal del corredor de evaluación.

Una vez construido este polígono en el sistema geográfico WGS84 (EPSG:4326), se proyecta al sistema métrico EPSG:25830 (UTM), con el fin de poder aplicar operaciones espaciales con precisión en metros. Sobre este polígono proyectado se aplica un buffer negativo de 45,72 metros, valor equivalente a 50 yardas, obteniéndose así un segundo polígono interior más restringido. De este modo, el modelo genera dos niveles espaciales dentro del canal: un dominio exterior, correspondiente al corredor amplio de navegación, y un dominio interior, que representa la parte más centrada y segura del canal.

Una vez definidos ambos polígonos, el siguiente paso consiste en discretizarlos mediante la malla hexagonal H3, empleando la misma resolución espacial utilizada en fases anteriores del proyecto, concretamente la resolución 11. Esta discretización permite transformar las superficies continuas en conjuntos de celdas hexagonales, facilitando su clasificación y tratamiento posterior dentro del sistema evaluador.

A partir de estos conjuntos se establecen las bandas espaciales mediante operaciones de diferencia entre celdas H3:

- Núcleo (CORE): representa la zona interior del canal y, por tanto, a la navegación más precisa y segura.
- Banda exterior (OUTER): incluye las celdas situadas entre el límite del canal interior y el contorno del corredor general, constituyendo una franja de tolerancia dentro del canal.
- Banda fuera de canal (FUERA): corresponde a las aguas comprendidas dentro del área global de evaluación, pero fuera del corredor navegable definido.

Además de estas tres bandas principales, se define un polígono adicional que delimita el área general de evaluación del entorno de Rota. Este polígono permite identificar todas aquellas celdas navegables que no pertenecen al canal, pero que siguen formando parte del espacio analizado. A partir de él, y tras sustraer las celdas correspondientes al núcleo y a la banda exterior, se obtiene la zona clasificada como “FUERA”. Posteriormente, estas celdas se combinan con la capa de zonas críticas, asignando también las zonas de riesgo “CRÍTICO” y “ALTO”. De esta forma se obtiene una clasificación espacial completa del entorno navegable.

La Figura 3-13 muestra la trayectoria de un buque durante una navegación en el entorno de Rota. La trayectoria está superpuesta sobre la zonificación utilizada por el sistema evaluador para analizar la seguridad de la derrota dentro del canal navegable. El entorno marítimo aparece dividido en distintas áreas según su nivel de seguridad respecto a los corredores y a las zonas críticas. (Fuente propia)

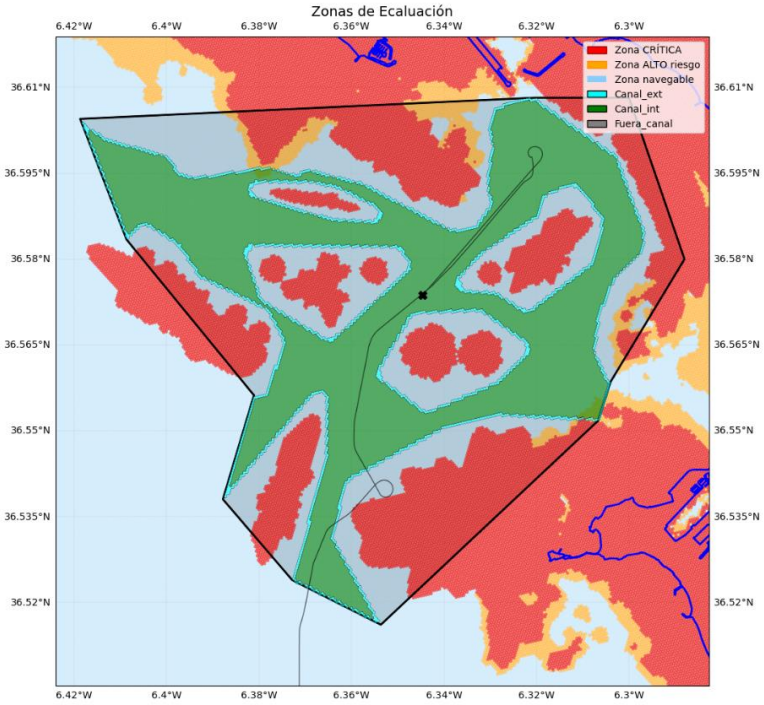


Figura 3-13: Trayectoria del buque junto a los corredores y zonas críticas en Rota

3.4.2.15 Identificación de celdas activadas y asignación de niveles de riesgo

Tras definir las bandas del corredor y clasificar cada celda según su nivel de riesgo, el siguiente paso consiste en determinar qué unidades espaciales han sido efectivamente atravesadas por el buque y cómo se combinan en ellas los dos criterios fundamentales del modelo: el riesgo batimétrico y la navegación de precisión.

Tras la obtención de celdas por las que cruza la trayectoria del buque, se realizan intersecciones de conjuntos con las bandas previamente establecidas. De este modo se identifica en qué zona del corredor se ha producido el paso del buque.

De forma complementaria, las celdas tocadas se intersecan con las categorías de riesgo previamente definidas. Esto permite determinar celdas críticas atravesadas, celdas de riesgo alto atravesadas y en qué zona del corredor se produjo la intersección.

Además, se construye la lista final, donde cada celda atravesada recibe una etiqueta combinada de:

- Celdas “CRÍTICO” → color rojo.
- Celdas “ALTO” → naranja.
- Celdas “FUERA” → negro.
- Celdas “EXTERIOR” → amarillo.
- Celdas “MEDIO” o “OUTER” → cian
- Celdas “CORE” → verde.

Esta codificación no tiene únicamente finalidad estética, sino que permite representar visualmente la calidad de la navegación sobre el mapa, facilitando la interpretación inmediata de los resultados. Además, se debe reseñar que no existe la clasificación “EXTERIOR” en el entorno de Rota.

La Figura 3-14 muestra la trayectoria del buque durante el ejercicio junto con las celdas hexagonales efectivamente ocupadas a lo largo de la navegación. Esta representación permite comprobar no solo el recorrido seguido, el riesgo real asumido durante la navegación. (Fuente propia)

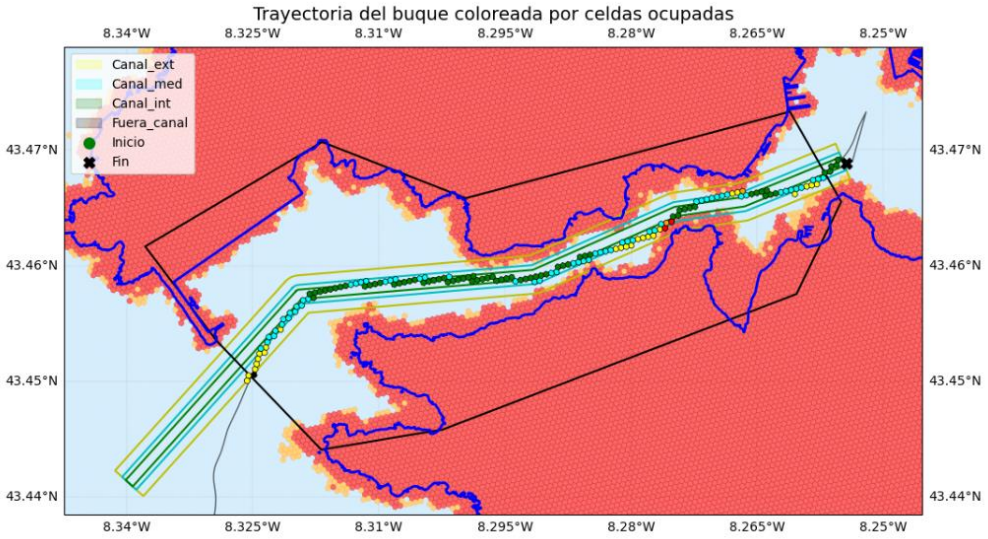


Figura 3-14: Trayectoria intersecada con las zonas en el entorno de Ferrol

3.4.3 Algoritmo de evaluación

3.4.3.1 Diseño del evaluador y fundamento metodológico

Con el objetivo de disponer de una valoración objetiva, trazable y reproducible de la seguridad en la navegación, se desarrolla el evaluador automático basado en el análisis de las zonas recorridas por el buque obtenidas de la malla.

Cada celda activada tiene su propia clasificación que garantiza la interpretación unívoca del recorrido. Las categorías empleadas son las mencionadas anteriormente, resaltando la carencia de zona "EXTERIOR" en el entorno de Rota.

Este planteamiento permite analizar cómo ha navegado el buque por la zona establecida. Además, con qué grado de adherencia a la derrota principal, con qué desviación y con qué exposición a zonas de riesgo. De este modo, la evaluación deja de depender de apreciaciones exclusivamente subjetivas y pasa a apoyarse en métricas espaciales objetivas. En primer lugar, se describirá la evaluación del entorno de Rota, y para finalizar se reseñarán las diferencias que existen entre los dos entornos.

Se ha optado por un enfoque de lógica difusa porque la modelación de la seguridad en la navegación es más adecuada a través de la lógica difusa que con el establecimiento de umbrales rígidos. En la práctica, la transición entre una navegación "adecuada" y una "mejorable" no se produce de forma brusca, sino de manera gradual, dependiendo de la combinación de varios factores.

3.4.3.2 Comprobación inicial zona "CRÍTICA"

Debido a que el análisis espacial se realiza mediante una malla hexagonal con una resolución determinada, es necesario realizar una comprobación inicial de la profundidad realmente recorrida por el buque durante toda la navegación. Para ello, se utiliza el archivo de registro del buque en formato CSV, a partir del cual se identifica la sonda mínima registrada a lo largo de toda la derrota. Esta profundidad mínima se compara posteriormente con el calado del buque utilizado en el ejercicio.

En caso de que la sonda mínima registrada sea superior al calado con un margen mayor de medio metro, se considera que el buque no ha llegado a varar, ya que en ningún momento la profundidad bajo la quilla ha sido inferior o igual a medio metro. Esto es debido a que el evaluador puede establecer la derrota seguida por el buque dentro de un hexágono catalogado como "CRÍTICO" por la resolución seleccionada, pero realmente no haber navegado en una zona de sonda menor al calado. En este caso, el sistema transforma automáticamente las zonas asignadas como "CRÍTICO" a zonas "ALTO". Por el

contrario, en el caso que la diferencia entre los dos sea inferior o igual a medio metro se considera que se ha aproximado en exceso a un veril peligroso y no se modificarán las zonas asignadas.

Esta decisión se fundamenta en el hecho de que, aunque el buque no haya encallado, su trayectoria se ha aproximado peligrosamente a áreas donde la profundidad disponible es muy reducida. Por este motivo, el ejercicio no se suspende automáticamente, ya que no se ha producido una varada real; no obstante, la cercanía a estas zonas peligrosas se penaliza dentro del proceso de evaluación. Por último, esto no afectará a los bajos simulados del entorno de Rota ya que en esas zonas de navegación las sondas son muy grandes.

3.4.3.3 Etapas de la lógica difusa

La lógica difusa es un paradigma de razonamiento que modela la incertidumbre y la imprecisión permitiendo valores intermedios entre 0 ("totalmente falso") y 1 ("totalmente verdadero"). A diferencia de la lógica clásica (verdadero/falso), aquí cada variable puede tener grados de pertenencia a conjuntos difusos. Por ello, se distinguirán tres fases dentro de esta lógica:

- Fuzzificación: convertir entradas numéricas precisas en grados de pertenencia difusos mediante funciones de pertenencia. Se emplearán funciones triangulares y trapezoidales.
- Inferencia difusa: aplicar reglas que combinan condiciones difusas con mínimos y máximos para determinar conclusiones difusas.
- Defuzzificación: convertir la salida difusa resultante en un valor numérico preciso procesable.

Estos conceptos permiten razonar con ambigüedad y unir criterios cualitativos de forma cuantitativa durante la navegación.

3.4.3.4 Variables y métricas utilizadas

A partir del conjunto de celdas activadas, el evaluador calcula el número total de celdas y su distribución por categorías. Posteriormente, se transforman estos recuentos en porcentajes respecto al total de celdas activadas, lo que permite que la evaluación sea proporcional a la longitud real de la derrota analizada. Esta decisión metodológica es importante, ya que evita que el resultado final dependa de valores absolutos y facilita la comparación entre ejercicios de distinta duración o extensión.

Las métricas principales empleadas son las siguientes:

- Porcentaje de celdas interiores (pct_green): refleja el grado de permanencia del buque en la banda principal del corredor de navegación. Calcula el porcentaje total de celdas "CORE" respecto al número total de celdas.
- Porcentaje de celdas medias (pct_cyan): representa desviaciones leves, compatibles en muchos casos con una navegación controlada y gobierno de contactos durante la navegación. Calcula el porcentaje total de celdas "MEDIO" respecto al número total de celdas.
- Porcentaje de celdas exteriores (pct_yellow): cuantifica desviaciones laterales más acusadas respecto a la derrota principal. Calcula el porcentaje total de celdas "EXTERIOR" respecto al número total de celdas.
- Porcentaje de celdas fuera de corredor (pct_black): identifica salidas del corredor evaluado. Calcula el porcentaje total de celdas "FUERA" respecto al número total de celdas.
- Porcentaje de celdas de riesgo alto (pct_orange) y crítico (pct_red): mide la exposición a zonas de mayor severidad. Calcula el porcentaje total de celdas "ALTO" y "CRÍTICO" respecto al número total de celdas.

Además, el sistema construye indicadores agregados que resumen el comportamiento global de la derrota:

- Porcentaje de desvío lateral (pct_desvio), que mide la separación global respecto a la derrota principal de navegación. Suma los porcentajes pct_yellow y pct_black.

- Porcentaje de exposición a riesgo (pct_riesgo), que resume la presencia en zonas de mayor severidad. Suma los porcentajes pct_orange y pct_red.
- Índice global de severidad (idx_global), calculado mediante una ponderación de las categorías de celda según su criticidad. Los pesos agregados son: al verde se le asigna cero, al cian se le asigna dos, al amarillo se le asigna cinco, al negro se le asigna ocho, al naranja se le asigna nueve y al rojo se le asigna diez. Obtenemos un índice normalizado de 0 a 100.
- Severidad máxima (severidad_max), se le aporta un valor de severidad del 0 al 100 según la peor categoría presente durante su navegación. Los valores que se asignan son: al rojo se le asigna 100, al naranja se le asigna 85, al negro se le asigna 70, al amarillo se le asigna 50, al cian se le asigna 25 y al verde se le asigna 0.

3.4.3.5 Fuzzificación con funciones trimf y trapmf

En la etapa de fuzzificación, cada métrica numérica se transforma en grados de pertenencia a categorías difusas (“bajo”, “medio” o “alto”) usando funciones de pertenencia triangulares y trapezoidales. El código define cinco categorías difusas representadas en las Figura 3-15, Figura 3-16, Figura 3-17, Figura 3-18 y Figura 3-19. En ellas se representa cada una de las variables en términos difusos como bajo, medio y alto. Esto permite construir reglas que reflejan el razonamiento esperado en la evaluación de la navegación. (Fuente propia)

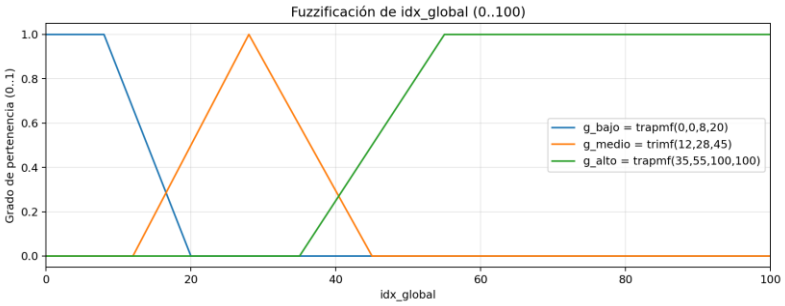


Figura 3-15: Lógica difusa correspondiente al idx_global

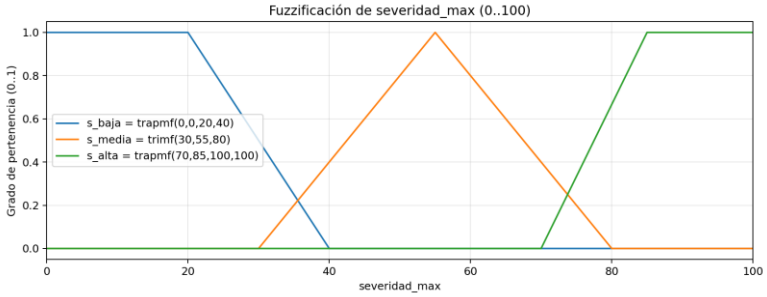


Figura 3-16: Lógica difusa correspondiente a severidad_max

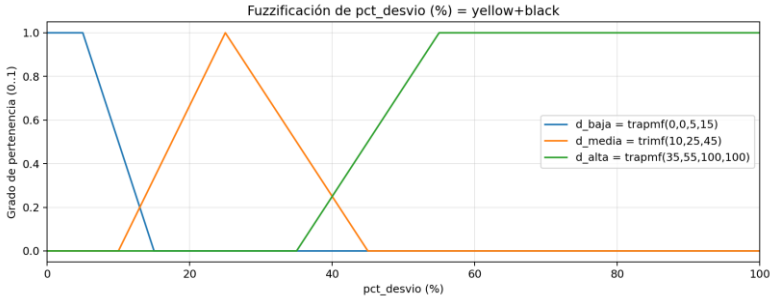


Figura 3-17: Lógica difusa correspondiente al pct_desvio

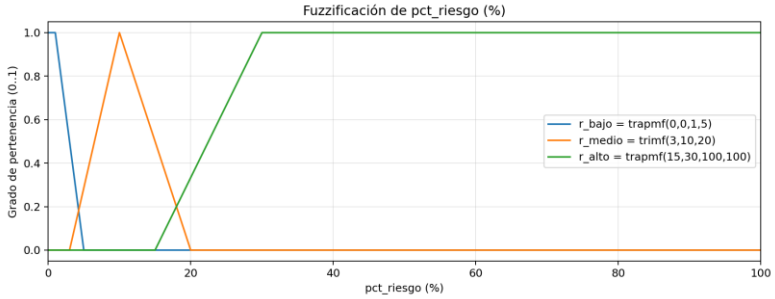


Figura 3-18: Lógica difusa correspondiente al pct_riesgo

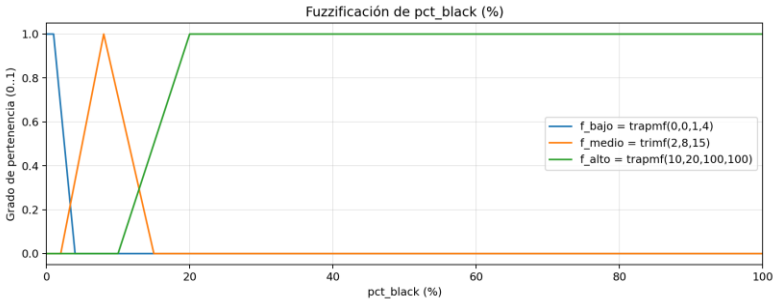


Figura 3-19: Lógica difusa correspondiente al pct_black

Las funciones trimf (triangular) y trapmf (trapezoidal) asignan a cada valor un grado entre 0 y 1 según la cercanía al intervalo definido. De este modo, cada métrica numérica se convierte en valores difusos de pertenencia.

3.4.3.6 Reglas difusas e inferencia

Con las pertenencias calculadas, el sistema aplica reglas difusas para evaluar el nivel de riesgo. Cada regla combina varias condiciones usando el operador mínimo (AND) y después se agregan varias ramas con máximo (OR). En el código se definen cinco reglas principales:

- R1 – Excelente: esta regla se activa únicamente con min(g_bajo, r_bajo, d_baja, s_baja, f_bajo). En lenguaje natural se activa cuando todas las medidas de riesgo son bajas suponiendo una navegación muy segura.
- R2 – Adecuada: combina situaciones moderadas. Se activa en las siguientes situaciones:
  - min(g_medio, r_bajo, d_baja)
  - min(g_bajo, r_medio, d_baja)
  - min(g_bajo, r_bajo, d_media)
  - min(g_bajo, s_media)

  El valor final de R2 es el máximo de varias combinaciones de este tipo.
- R3 – Mejorable: mezcla condiciones medias/altas. Se activa en las siguientes situaciones:
  - min(g_medio, d_media)
  - min(g_medio, r_medio)
  - min(d_alta, r_bajo)
  - min(s_media, d_media)

  El valor final de R3 es el máximo de varias combinaciones de este tipo.
- R4 – Deficiente: combina riesgos altos con varios factores. Se activa en las siguientes situaciones:
  - min(g_alto, r_medio)
  - min(g_medio, r_alto)
  - min(d_alta, r_medio)
  - min(f_alto, r_medio)

  - min(s_alta, d_media)

  El valor final de R4 es el máximo de varias combinaciones de este tipo.

- R5 – Crítica: combina escenarios muy severos. Se activa en las siguientes situaciones:
  - min(s_alta, r_alto)
  - min(s_alta, d_alta)
  - min(f_alto, r_alto)
  - min(s_alta, r_medio)
  - min(s_alta, d_media)

  El valor final de R5 es el máximo de varias combinaciones de este tipo.

En resumen, cada regla R1–R5 genera un grado de activación en [0,1] según las entradas difusas.

3.4.3.7 Defuzzificación y cálculo final

Tras aplicar las reglas, el resultado difuso se convierte en un valor numérico de riesgo mediante una defuzzificación. El código asigna a cada regla un peso o centro (8 para "Excelente", 22 "Adecuada", 45 "Mejorable", 70 "Deficiente", 92 "Crítica"). Luego calcula una media ponderada:

$$riesgo\_fuzzy = \frac{\sum_{\text{regla}} (\text{grado\_regla} \times \text{centro\_regla})}{\sum_{\text{regla}} \text{grado\_regla}}. \qquad \textbf{Ecuación 3-3}$$

Este es un método tipo "centroide" (media ponderada) de defuzzificación. A continuación, se mezcla con el índice global original para evitar salidas demasiado extremas:

$$riesgo\_eval = 0.55 \cdot riesgo\_fuzzy + 0.45 \cdot idx\_global \qquad \textbf{Ecuación 3-4}$$

Para complementar la evaluación, se aplican una serie de penalizaciones adicionales. Se aplica una penalización si el porcentaje de celdas negras es alto. Específicamente, se le suman 12 unidades al riesgo de evaluación en caso de tener un porcentaje de celdas negras superior al 16% y se le suman 6 unidades al riesgo de evaluación en caso de tener un porcentaje de celdas negras superior al 8%. En caso de darse las dos, solo se aplica la más penalizante.

Después, como criterio normativo adicional, se establece una restricción de puntuación máxima en función del número de celdas críticas activadas durante la derrota. Esta decisión responde a la necesidad de impedir que una navegación con incursiones en zonas de criticidad obtenga calificaciones elevadas, incluso si la mayor parte del recorrido ha sido correcta.

La limitación adoptada es la siguiente:

- 1 celda crítica (red): puntuación máxima 25/100.
- 2 celdas críticas (red): puntuación máxima 20/100.
- 3 o más celdas críticas (red): puntuación máxima 10/100.

Esta restricción se aplica al final del proceso de evaluación y actúa como un techo doctrinal, reforzando explícitamente la relevancia de la criticidad batimétrica dentro del modelo de evaluación.

Después, se obtiene el resultado final restando a 100 el riesgo de evaluación final obtenido. La calificación mínima es un 0. Los resultados posibles son:

- Score $\geq 85 \rightarrow$ Excelente
- $70 \leq$ Score $< 85 \rightarrow$ Adecuada
- $55 \leq$ Score $< 70 \rightarrow$ Mejorable
- $35 \leq$ Score $< 55 \rightarrow$ Deficiente
- Score $< 35 \rightarrow$ Crítica.

En resumen, este evaluador convierte los conteos de colores en métricas porcentuales y luego, mediante funciones de pertenencia triangulares y trapezoidales, infiere un nivel de riesgo con reglas

borrosas. Finalmente calcula un riesgo difuso y lo convierte a una nota final ajustando con penalizaciones adicionales.

3.4.3.8 Diferencias con el evaluador del entorno de Rota

Aunque ambos evaluadores comparten la misma arquitectura metodológica basada en la discretización espacial mediante mallas hexagonales H3 y la posterior evaluación mediante lógica difusa, existen algunas diferencias en su implementación que responden a las particularidades del entorno geográfico analizado.

La principal diferencia se encuentra en la clasificación de las zonas de navegación. En el caso del entorno de Ferrol, el espacio marítimo se estructura en seis categorías de riesgo diferenciadas. Por el contrario, en el evaluador correspondiente a Rota se emplea una clasificación simplificada compuesta por cinco categorías (verde, cian, negro, naranja y rojo), eliminándose la celda “EXTERIOR”. Esta simplificación responde a la configuración del entorno de navegación, donde la transición entre zonas seguras y zonas de riesgo es más directa.

Esta diferencia en la estructura de zonas también afecta a la forma en que se calcula el desvío lateral de la derrota. En el evaluador de Ferrol el pct_desvio se obtiene considerando la proporción de celdas clasificadas como amarillas y negras, que representan áreas progresivamente alejadas del eje de navegación seguro. En el caso de Rota, al no existir la categoría amarilla, el pct_desvio se calcula a partir de las celdas clasificadas como cian y negras, interpretándose cualquier salida del núcleo seguro de navegación como una desviación respecto a la trayectoria óptima. La Figura 3-20 muestra las funciones de pertenencia difusa asociadas a la variable pct_desvio, que representa el porcentaje de trayectoria del buque fuera del núcleo de navegación seguro. Se definen tres categorías lingüísticas: desvío bajo, desvío medio y desvío alto. (Fuente propia)

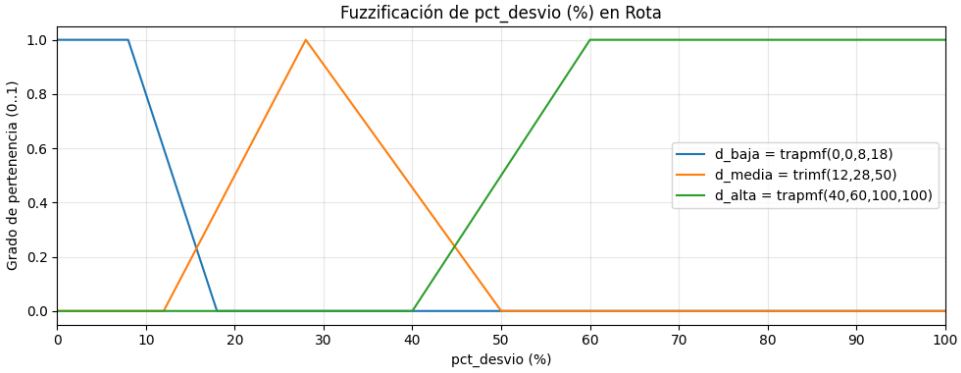


Figura 3-20: Funciones de pertenencia difusa utilizadas para la variable pct_desvio en el entorno de Rota.

Asimismo, el índice global de riesgo utilizado en el proceso de evaluación se obtiene mediante un sistema de ponderaciones asociado a cada categoría de celda. Debido a la ausencia de la zona amarilla en el modelo de Rota, se realiza un ligero ajuste en los pesos asignados a las categorías intermedias, incrementando la penalización asociada a la zona cian para reflejar que esta representa ya una salida del núcleo de navegación seguro. Se establecen las ponderaciones de la siguiente forma: verde se establece en cero, cian se establece en tres, negro se establece en ocho, naranja se establece en nueve y rojo se establece en diez.

A pesar de estas diferencias, el funcionamiento general del evaluador se mantiene idéntico en ambos entornos. En ambos casos, la trayectoria del buque se transforma en una secuencia de celdas hexagonales activadas durante la navegación, a partir de la cual se calculan diferentes métricas espaciales relacionadas con el nivel de riesgo de la derrota. Estas métricas alimentan posteriormente el sistema de evaluación basado en lógica difusa, que permite obtener una valoración final del nivel de seguridad de la navegación.

De este modo, ambos evaluadores mantienen una estructura metodológica común, adaptando únicamente determinados parámetros espaciales y de clasificación de zonas para reflejar de forma más realista las características específicas de cada entorno de navegación.

3.4.4 Generación automática de la calificación y del informe de evaluación

Una vez calculada la evaluación de la seguridad en la navegación mediante el modelo borroso, el sistema genera de forma automática la calificación final, su interpretación cualitativa y un informe asociado al ejercicio. Este proceso tiene como finalidad no solo proporcionar una nota numérica, sino también ofrecer una explicación estructurada de los factores que han condicionado dicha valoración, facilitando así la comprensión del resultado por parte del alumno e instructor.

El punto de partida de este proceso es la salida del evaluador difuso, que devuelve un objeto estructurado con cuatro elementos principales: la puntuación final de seguridad, la categoría cualitativa asociada, el conjunto de métricas calculadas durante la evaluación y los grados de activación de las reglas borrosas. De este modo, la calificación no se limita a un único valor final, sino que queda acompañada por toda la información intermedia necesaria para interpretar cómo se ha alcanzado.

A partir de estas variables, se construye una tabla resumen automática que reúne los principales indicadores espaciales de la derrota. Entre ellos se incluyen el número total de celdas activadas, el número y porcentaje de celdas pertenecientes a cada nivel de severidad, el porcentaje de desviación respecto al corredor de navegación, el porcentaje de exposición a zonas de riesgo, el índice global ponderado de severidad y, en su caso, la salida difusa previa a la aplicación de penalizaciones doctrinales. Esta tabla permite sintetizar de forma ordenada la información numérica más relevante del ejercicio, constituyendo la base objetiva de la valoración final.

Sobre esta base cuantitativa, el sistema genera además un comentario automático interpretativo. Para ello, la puntuación final obtenida se clasifica en una de las categorías definidas por el evaluador: excelente, adecuada, mejorable, deficiente o crítica. A cada una de estas categorías se asocia un texto base que describe el nivel global de seguridad de la navegación. Posteriormente, este comentario se enriquece con matices adicionales obtenidos a partir de los principales indicadores del ejercicio, como la permanencia en la banda interior del corredor, el grado de desviación lateral, la exposición a celdas de riesgo alto o crítico, la existencia de salidas fuera del corredor evaluado o la presencia de celdas críticas. De esta manera, el sistema no se limita a asignar una etiqueta cualitativa, sino que explica qué aspectos concretos de la derrota han influido en la nota.

Además del comentario interpretativo, el sistema formula automáticamente una recomendación principal de mejora. Esta recomendación se obtiene identificando cuál ha sido el factor dominante de penalización durante el ejercicio. Para ello se priorizan distintos criterios, tales como la presencia de celdas críticas, la navegación fuera del corredor evaluado, la exposición a zonas de riesgo alto o la desviación lateral sostenida. En función del factor detectado, el sistema selecciona una recomendación específica orientada a corregir el aspecto de mayor impacto negativo en la seguridad de la derrota. Este enfoque permite transformar la evaluación en una herramienta de aprendizaje, ya que la nota queda acompañada de una indicación clara sobre el aspecto prioritario a mejorar.

Finalmente, toda esta información se integra automáticamente en un informe PDF de evaluación. El documento generado incluye una página inicial de presentación, una portada con la puntuación final y la categoría obtenida, las figuras de evidencia gráfica del ejercicio, una página de interpretación automática con el comentario y la recomendación, y una tabla resumen con las métricas calculadas. De este modo, la generación de la nota no se concibe únicamente como un proceso de cálculo, sino como la producción de un documento completo de *feedback* que permite justificar la calificación y facilitar su revisión posterior.

En conjunto, este procedimiento convierte la salida del evaluador borroso en una calificación trazable, interpretable y documentada, reforzando el objetivo del sistema desarrollado: proporcionar una

evaluación automática robusta, homogénea y útil tanto para la instrucción como para el aprendizaje del alumno.

3.4.5 Repositorio del proyecto

Con el objetivo de garantizar la transparencia del trabajo y facilitar el acceso a los resultados generados durante el desarrollo del evaluador, se ha creado un repositorio digital donde se almacenan diversos documentos e informes producidos por el sistema. Este repositorio incluye 10 ejemplos de los informes generados automáticamente en ejercicios respecto a la seguridad en la navegación. Específicamente son cinco ejercicios de Ferrol y cinco ejercicios de Rota. Esto permite visualizar el tipo de retroalimentación que el evaluador proporciona al alumno e instructor tras la realización de un ejercicio de navegación en el simulador. De este modo, se facilita la consulta y revisión de los resultados obtenidos durante las distintas pruebas realizadas en el marco del presente trabajo. [27]

Además de ello, el tercer anexo del presente documento contiene dos informes de evaluación completos. De estos informes, uno se desarrolla en el entorno de Ferrol y el otro se desarrolla en el entorno de Rota.

3.5 Desarrollo del evaluador automático de análisis de encuentros

Este bloque de código implementa la evaluación de los diferentes encuentros que se producen durante la navegación. El objetivo del desarrollo es transformar registros de navegación en información estructurada para el análisis de la seguridad. Incluye el estudio de las trayectorias, detección de episodios relevantes y generación de salidas verificables. Se basa en el uso del Reglamento para la Prevención de Abordajes.

3.5.1 Contexto doctrinal y justificación

La navegación se sustenta en un principio doctrinal fundamental: la seguridad no se entiende como un resultado puntual, sino como una condición que debe mantenerse de forma continuada durante toda la derrota. Esta condición se alcanza mediante la vigilancia constante y el control permanente de los contactos existentes en el entorno marítimo.

Durante la navegación, se integra la información disponible de los sistemas existentes (sensores, AIS, radar), se realiza una evaluación de amenazas y se toman decisiones propias que permiten sostener una navegación controlada. Esta visión doctrinal establece un enlace directo con la práctica profesional: navegar con seguridad implica anticipación, establecer márgenes adecuados y ser coherente en las maniobras, especialmente en entornos con tráfico intenso y restricciones geográficas.

En el ámbito operativo, la prevención de abordajes se apoya en la aplicación sistemática del RIPA y en la monitorización de indicadores que permiten cuantificar el riesgo de encuentro. En un entorno real, la decisión de maniobrar no deriva de una única variable, sino del análisis combinado de la geometría relativa y su evolución temporal. Por ello, la evaluación del riesgo se beneficia del seguimiento de métricas como:

- DCPA/TCPA como referencias de proximidad y horizonte temporal del encuentro.
- Evolución temporal del riesgo, que revela si el buque mantiene márgenes o los degrada progresivamente.
- Necesidad de maniobra, entendida como la obligación de actuar para sostener márgenes seguros y evitar incertidumbre en situaciones específicas.
- Tipo de encuentro según la clasificación recogida dentro del RIPA.

Estos indicadores ofrecen una forma de traducir la seguridad a magnitudes medibles y comparables, permitiendo un análisis más sistemático del comportamiento durante el ejercicio.

En la instrucción con simulador, la evaluación se ha basado tradicionalmente en la observación del instructor y en criterios construidos desde la experiencia. Aunque este enfoque es valioso, presenta

limitaciones prácticas. En este contexto, el desarrollo del evaluador se justifica por tres necesidades principales: la trazabilidad, la homogeneización de criterios y la mejora del aprendizaje mediante la retroalimentación.

3.5.2 Estructura general del procesamiento

El flujo del cuaderno se organiza como una cadena de etapas consecutivas y dependientes, equivalente a un proceso ETL (Extracción, Transformación y Carga). Esta estructura permite partir de registros brutos del simulador y terminar en productos finales directamente utilizables para evaluación: eventos segmentados, métricas verificables, visualizaciones y un informe exportable.

La primera etapa corresponde a la lectura y clasificación de archivos. El cuaderno identifica y separa las tramas procedentes del buque propio de aquellas asociadas a contactos. Después, realiza una extracción de los campos relevantes para el análisis posterior. De esta manera se establece la base tabular sobre la que operarán el resto de los módulos.

Una vez ingeridos los datos, se aplica un proceso de depuración orientado a garantizar consistencia interna. En esta fase se homogeniza el eje temporal, se gestionan duplicidades y registros inconsistentes. Además, se eliminan filas incompletas o inválidas reduciendo el ruido y evitando que errores de entrada propaguen resultados incorrectos en etapas posteriores.

Con los datos ya limpios y normalizados, el flujo realiza la alineación temporal entre el estado del buque propio y cada contacto. Esta sincronización se implementa mediante una tolerancia de segundos, de manera que para cada instante del contacto se obtiene el estado más coherente del barco propio en ese entorno temporal.

A partir de la sincronización se calculan las métricas que cuantifican la relación geométrica y cinemática entre plataformas. El cuaderno obtiene, entre otras, la distancia relativa, la marcación y los cálculos de DCPA/TCPA basados en las velocidades y los rumbos. Estas variables constituyen el núcleo analítico del sistema.

Sobre el conjunto de contactos ya enriquecidos con métricas, se detectan los episodios de máximo acercamiento con los contactos. El criterio no se basa únicamente en picos instantáneos, sino en ventanas temporales con continuidad para representar un encuentro con entidad operativa. El resultado de esta etapa es un conjunto de eventos recortados y almacenados de forma independiente, lo que habilita la evaluación segmentada y facilita el análisis posterior por casos.

Cada evento extraído se etiqueta según una clasificación heurística basada en el RIPA, de modo que el encuentro quede descrito por un tipo de situación (por ejemplo, cruce o vuelta encontrada). En paralelo, se incorporan detectores complementarios que enriquecen el contexto del evento: identificación de corte de proa y análisis de la maniobra realizada por el buque propio (variaciones netas y acumuladas de rumbo y velocidad en la fase previa al instante crítico). Esta combinación permite evaluar no solo la severidad del encuentro, sino también la calidad y coherencia de la respuesta.

La fase final transforma los resultados en productos directamente explotables para revisión y trazabilidad. El cuaderno proporciona visualizaciones por evento (mapas, tramos de riesgo y tablas resumen) que genera un informe PDF y le aporta un valor numérico a cada evento según los criterios establecidos. Cada encuentro crítico queda documentado con evidencia gráfica y métricas cuantificadas. Esta salida facilita tanto la validación técnica como su integración en un proceso de evaluación, al proporcionar un soporte claro y reproducible de qué ocurrió en cada segmento y cómo se interpretó desde el punto de vista del riesgo.

3.5.3 Desarrollo y obtención de datos

En primer lugar, se desarrollan dos entornos operativos destinados a la obtención y representación de los datos relevantes, que posteriormente serán utilizados en el proceso de evaluación. Los dos entornos operativos desarrollados son Rota y Ferrol.

3.5.3.1 Datos de entrada, entorno de ejecución y alcance

El cuaderno se apoya en dos corrientes de datos claramente diferenciadas, que representan los dos actores esenciales del escenario de navegación:

- Registro NMEA del buque propio. Este fichero recoge la información generada por los sistemas del buque del alumno durante la ejecución: posición, rumbo, velocidad y las magnitudes necesarias para reconstruir la derrota seguida y su evolución temporal. Este flujo constituye la referencia principal del análisis, ya que permite evaluar cómo se gobierna el buque frente a los contactos detectados.
- Registros AIS de contactos. Estos datos se organizan de manera que el cuaderno trabaja con la información de cada contacto de forma individual, incorporando tanto información dinámica (posición, rumbo, velocidad) como estática (identificación y dimensiones). Esta separación por contacto facilita el tratamiento independiente de cada encuentro y permite, posteriormente, segmentar el ejercicio en eventos críticos y asignar métricas específicas a cada interacción.

A lo largo del flujo de procesamiento, el sistema genera de forma automática carpetas y figuras intermedias con datos ya normalizados, contactos filtrados, segmentos críticos, figuras y resúmenes. Esta generación automática aporta una gran trazabilidad del sistema. En la práctica, esto significa que el análisis no se limita a producir un resultado final, sino que construye un conjunto de productos intermedios que sirven tanto para depuración técnica como para la posterior integración del evaluador.

El alcance del análisis descrito se centra en la lógica del cuaderno y en las salidas que genera: la cadena de procesamiento, las transformaciones aplicadas y los productos exportados (tablas, métricas, figuras e informes). Es importante señalar que la exactitud numérica final de los resultados depende de la calidad de los datos de entrada. En particular, influyen de manera directa:

- Frecuencia de muestreo: un muestreo irregular o demasiado espaciado puede degradar la detección de tendencias y maniobras.
- Presencia de valores nulos o pérdidas de señal: introduce discontinuidades que obligan a la interpolación o al descarte de tramos en casos muy afectados.
- Coherencia temporal: desajustes de tiempo o duplicidades afectan a la sincronización entre buque propio y contactos, elemento clave para el cálculo de métricas relativas.

Por tanto, el cuaderno proporciona un marco robusto de procesamiento y evaluación, pero su rendimiento y precisión quedan condicionados por la integridad y consistencia de los registros originales del simulador.

3.5.3.2 Normalización, limpieza y sincronización temporal

El análisis desarrollado en el cuaderno es, por naturaleza, comparativo: para cada instante de un contacto se necesita conocer cuál es el estado del buque propio en ese mismo momento. Esto convierte la alineación temporal en un requisito crítico. Cualquier desfase puede alterar la geometría relativa y, en consecuencia, la detección de eventos críticos, la interpretación de maniobras y cálculo de métricas como el DCPA o la marcación.

Por este motivo, antes de calcular métricas de riesgo, el cuaderno aplica un conjunto de etapas destinadas a asegurar que las series temporales sean consistentes, depuradas y comparables.

La primera parte del tratamiento se centra en la depuración de la información de los contactos. Los criterios aplicados pueden agruparse en tres líneas principales:

- Recorte de contactos fuera de ventana de análisis. Se establece como inicio de la ventana de análisis el primer instante del buque propio. Se descartan registros de contactos que ocurren antes de ese instante temporal. El objetivo es evitar procesar información innecesaria.

- Normalización a resolución de segundo y gestión de duplicados. Para homogeneizar el muestreo y facilitar el acoplamiento entre series, las marcas temporales del buque propio y de los contactos se redondean a nivel de segundo. En aquellos casos en los que existen varias muestras dentro del mismo segundo, el cuaderno resuelve duplicidades conservando la muestra más representativa, evitando así que la densidad irregular de datos distorsione cálculos posteriores.
- Depuración por plausibilidad y completitud. Antes de llevar a cabo la sincronización de los datos, se aplican una serie de filtros preliminares cuyo objetivo es descartar aquellos contactos que no resultan relevantes para el proceso de análisis. Entre estos filtros se pueden destacar:
    - MMSI inválidos o no interpretables.
    - Trayectorias con número insuficiente de puntos para caracterizar un movimiento.
    - Registros sin latitud/longitud (variables esenciales para distancia y marcación).
    - Filas con magnitudes críticas ausentes que impedirían computar métricas relativas de forma fiable.

Este conjunto de medidas reduce ruido, evita fallos en etapas posteriores y concentra el análisis en contactos con entidad operativa.

Una vez depurado cada contacto, el cuaderno realiza la sincronización con el buque propio usando la tolerancia temporal del orden de segundos. En la práctica, esto implica asociar a cada muestra del contacto el estado del barco propio. Los datos procedentes del SIMNAV producen registros del buque propio cada segundo aproximadamente y de los contactos cada 2-3 segundos. Este hecho facilita la sincronización de datos ya que existen muchos más registros del buque propio que registros procedentes de los contactos. Esta sincronización es el paso que habilita el cálculo de métricas relativas.

Tras la sincronización, existe la posibilidad que ciertas columnas presenten valores perdidos (por ejemplo, por falta puntual de actualización del sensor o por una discrepancia en los tiempos exactos). Para evitar discontinuidades, el cuaderno aplica interpolaciones controladas en aquellas variables consideradas críticas (latitud, longitud, rumbos y velocidades).

3.5.3.3 Visualización preliminar del buque propio y los contactos

Previo al cálculo sistemático de métricas y a la detección de eventos críticos, el cuaderno incorpora una fase de visualización preliminar cuyo objetivo es doble. En primer lugar, permite validar la carga, limpieza y sincronización de los datos (continuidad temporal, ausencia de saltos y consistencia espacial). En segundo lugar, proporciona un primer diagnóstico del escenario de navegación. Se pueden interpretar la distribución de contactos, la densidad del tráfico marítimo y los patrones generales de interacción con el buque propio.

El primer nivel de visualización se basa en la representación de trayectorias sobre un mapa georreferenciado. Para ello, se proyectan las coordenadas del buque propio y de los contactos sobre una proyección cartográfica, mostrando:

- Derrota seguida por el buque propio, con marcas de inicio y fin para contextualizar el sentido de avance.
- Trayectorias de contactos, dibujadas de forma independiente con marcas de inicio y fin para contextualizar el sentido de avance.
- Extensión del mapa ajustada al área real de maniobra, aplicando un margen automático que evita visualizaciones excesivamente abiertas y demasiado recortadas.

Como resultado, se muestra la trayectoria seguida por el buque propio durante el ejercicio de navegación, representada mediante una línea negra continua, junto con las trayectorias de los distintos contactos AIS presentes en el área de estudio. Para cada contacto se representa su evolución mediante líneas de colores, indicando además el punto inicial y final de la trayectoria analizada.

Tras esta representación, se le aplican dos filtros para descartar buques que no son de interés para el análisis. En primer lugar, se descartan todos aquellos buques que se encuentren siempre a una distancia superior a 4 millas náuticas del buque propio. Además, se eliminan también todos aquellos buques que se encuentren en puerto durante toda la navegación. Para ello se han delimitado las zonas de puerto existentes en ambos entornos operativos y se han desechado todos aquellos contactos que se encuentren en esas áreas delimitadas en todo momento.

La Figura 3-21 muestra la representación de la trayectoria del buque propio y de los contactos AIS detectados durante el ejercicio de navegación. En el panel izquierdo se presentan todos los contactos inicialmente identificados, mientras que en el panel derecho se muestran únicamente aquellos contactos que permanecen tras aplicar los filtros de lejanía y puerto. (Fuente propia)

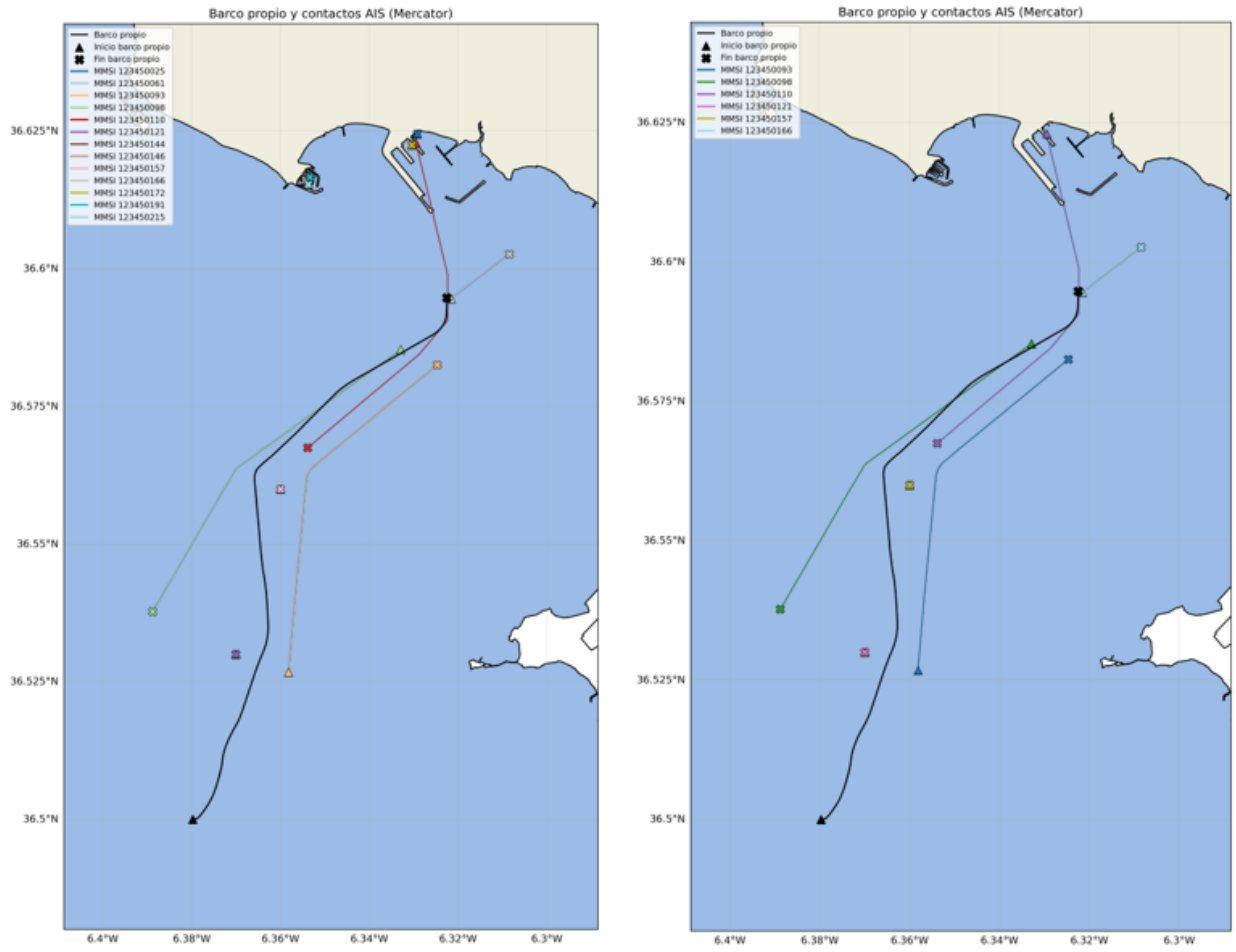


Figura 3-21: Comparación de la representación antes (izquierda) y después (derecha) de aplicar el filtro de distancia y el filtro de eliminación de barcos en puerto en el entorno de Rota

3.5.3.4 Cálculo de métricas relativas: distancia, demora y DCPA/TCPA

Una vez que el estado del buque propio y el de cada contacto han sido depurados y sincronizados temporalmente, el cuaderno calcula un conjunto de métricas que permiten describir, de forma cuantitativa, la situación relativa instante a instante. El cálculo se realiza sobre cada fila sincronizada del evento, de forma que cada muestra representa información relevante de la relación geométrica y cinemática entre plataformas.

3.5.3.4.1 Cálculo de la distancia relativa

Con objeto de cuantificar la separación espacial entre el buque propio y cada contacto AIS en cada instante de tiempo, se incorpora un bloque específico de cálculo de distancias geográficas. A partir de las coordenadas de ambos buques, el procedimiento emplea la fórmula de *Haversine*, ampliamente utilizada para determinar la distancia ortodrómica entre dos puntos sobre la superficie terrestre. Esta aproximación resulta adecuada al trabajar con latitudes y longitudes, ya que tiene en cuenta la curvatura terrestre y proporciona una estimación más realista que una formulación plana.

El valor calculado se incorpora a cada registro temporal en una nueva columna. De este modo, cada archivo de contacto AIS queda enriquecido con una medida directa de proximidad respecto al buque propio, lo que permite utilizar posteriormente esta variable tanto en los filtros iniciales de selección de contactos como en la evaluación de situaciones de riesgo y cumplimiento del RIPA.

3.5.3.4.2 Cálculo de la demora verdadera (bearing) y de la marcación

Con el fin de caracterizar geométricamente la posición de cada contacto AIS respecto al buque propio, se incorpora un bloque de cálculo de demora verdadera y marcación relativa. Para cada registro temporal, el procedimiento parte de las coordenadas geográficas del buque propio y del contacto, así como del rumbo sobre el fondo del buque propio. A partir de dichas variables, se calcula en primer lugar la dirección desde el buque propio hasta el contacto respecto al norte geográfico, obteniendo así la demora verdadera. Este cálculo se realiza mediante relaciones trigonométricas sobre coordenadas geográficas.

Posteriormente, la marcación relativa se obtiene como la diferencia entre la demora verdadera y el rumbo del buque propio. De esta forma, el ángulo deja de estar referido al norte y pasa a expresarse respecto a la proa del propio buque. Esta variable resulta especialmente útil para el análisis de situaciones de encuentro, ya que permite identificar de forma directa la posición del contacto en sectores relativos a proa, popa, amuras y aletas.

Los valores calculados se almacenan en dos nuevas columnas dentro de cada archivo de contacto. De este modo, cada trayectoria AIS queda enriquecida con información angular adicional, necesaria para posteriores procesos de clasificación de encuentros y evaluación del cumplimiento del RIPA.

3.5.3.4.3 Cálculo de DCPA/TCPA

Con objeto de evaluar el riesgo potencial asociado a cada encuentro entre el buque propio y los contactos, se incorpora un bloque de cálculo de DCPA y TCPA, variables fundamentales en el análisis de prevención de abordajes. El TCPA representa el tiempo restante hasta el punto de máxima aproximación entre dos buques, mientras que el DCPA expresa la distancia mínima prevista en dicho instante. Ambas magnitudes se calculan bajo la hipótesis de movimiento rectilíneo y uniforme, considerando constantes el rumbo y la velocidad de ambos buques en cada registro temporal.

El cálculo se basa en un modelo de movimiento relativo, en el que el contacto se analiza desde un sistema de referencia solidario con el buque propio. Para ello, se determina en primer lugar el vector de posición relativa entre ambos buques y posteriormente la velocidad relativa, obtenida a partir de la diferencia entre sus vectores de velocidad. Este enfoque permite describir la evolución de la separación entre ambos como un movimiento lineal en el plano, lo que facilita determinar analíticamente el instante en el que dicha distancia alcanza su valor mínimo.

A partir de esta formulación, el TCPA se obtiene como el instante en el que la proyección de la posición relativa sobre la velocidad relativa produce la mínima separación entre los buques. Posteriormente, se calcula la posición relativa correspondiente a ese instante y se obtiene el DCPA como la norma del vector resultante. Los valores calculados se almacenan en dos nuevas columnas de cada archivo de contacto AIS. Estas variables constituyen un elemento fundamental para la evaluación posterior de situaciones de encuentro y para el análisis del cumplimiento del RIPA.

3.5.3.5 Visualización interactiva de contactos y generación de evidencias gráficas

Con el objetivo de facilitar el análisis individual de cada encuentro entre el buque propio y los contactos AIS, se desarrolla un bloque de visualización interactiva que permite representar de forma conjunta la evolución espacial y temporal de las principales variables del encuentro. El sistema trabaja sobre los archivos de contactos generados en las fases anteriores del procesamiento y genera, para cada contacto, una figura compuesta por cuatro gráficas complementarias.

La primera gráfica muestra un mapa de las trayectorias del buque propio y del contacto. En esta representación se destacan los tramos de la derrota en los que la DCPA se sitúa por debajo del umbral establecido de 2000 yardas, identificándolos como zonas de mayor riesgo potencial.

Las tres gráficas restantes representan la evolución temporal de rumbo, velocidad y distancias de seguridad. En ellas se muestran respectivamente los rumbos de ambos buques, sus velocidades y la evolución del DCPA junto con la distancia real entre buques. Esta combinación permite interpretar de forma clara el comportamiento cinemático de ambos durante el encuentro.

Estas representaciones se emplean posteriormente como apoyo visual en el análisis de encuentros y en la generación de informes de evaluación.

La Figura 3-22 presenta el análisis completo del encuentro entre el buque propio y el contacto AIS considerado. En el panel superior se muestran las trayectorias de ambos buques sobre el entorno geográfico, destacándose en rojo los tramos en los que el DCPA se sitúa por debajo del umbral establecido de 2000 yardas, identificando así las zonas de mayor riesgo potencial durante el encuentro. Los otros gráficos muestran la evolución del encuentro representando velocidades, rumbos y distancias de ambos. (Fuente propia)

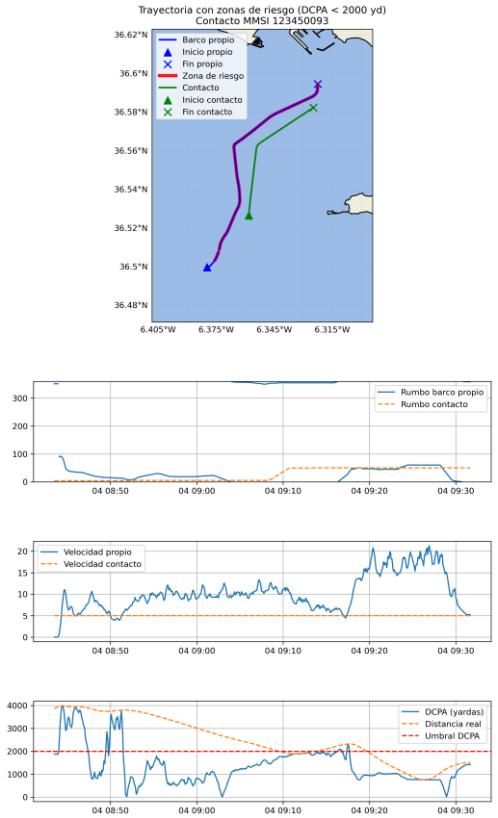


Figura 3-22: Representación del encuentro entre el buque propio y un contacto, mostrando las trayectorias, la evolución de rumbos, velocidades y distancias.

3.5.3.6 Detección de eventos críticos y recorte temporal

Para que el análisis de los encuentros sea operativo y no quede dominado por ruido o información no relevante, el sistema evita evaluar la navegación como una secuencia continua e indiferenciada. Si estos valores se interpretasen literalmente, podrían generar numerosas alertas sin relevancia real desde el punto de vista de la seguridad de la navegación.

Por este motivo, el evaluador adopta un enfoque basado en eventos críticos, entendidos como ventanas temporales en las que existe una proximidad sostenida entre el buque propio y un contacto con entidad suficiente como para representar un encuentro potencialmente relevante. Este planteamiento permite reducir la aparición de falsos positivos y transformar la navegación en una colección de episodios discretos que pueden analizarse y evaluarse de forma homogénea.

La detección de un evento crítico se fundamenta en dos condiciones complementarias:

- Umbral de proximidad. El sistema identifica, para cada contacto, la distancia mínima registrada durante el encuentro, siempre que esta sea inferior a 4 millas náuticas. A partir de dicho valor se establece un umbral dinámico de análisis definido como la distancia mínima más un margen adicional de 200 yardas. De esta forma, no solo se analiza el instante exacto de máxima aproximación, sino también los tramos en los que la separación entre buques se mantiene en valores próximos a dicha distancia mínima. Este criterio permite capturar el contexto completo del encuentro y evitar que el análisis se limite a un único punto temporal.
- Duración mínima (persistencia del riesgo). Para evitar que una única medición anómala dispare la detección de un evento crítico, la condición de proximidad debe mantenerse durante un intervalo temporal mínimo. Es decir, el sistema no busca instantes aislados, sino segmentos temporales con continuidad, en los que la separación entre buques permanezca dentro del umbral definido durante un periodo suficiente como para considerarse una situación de interacción real entre embarcaciones.

Cuando ambas condiciones se cumplen, el sistema identifica el instante de mínima distancia dentro del tramo detectado y recorta una ventana temporal centrada en ese punto, que incluye tanto un periodo previo de cuatro minutos como otro posterior de un minuto al mismo. Este recorte no solo conserva el momento de máxima aproximación, sino también el contexto cinemático del encuentro, incluyendo la evolución de la distancia, los rumbos y las velocidades de ambos buques.

El resultado final de este proceso es un conjunto de ventanas temporales independientes, cada una correspondiente a un evento crítico detectado durante la navegación. Un mismo contacto puede presentar varios eventos críticos. Estas ventanas constituyen la unidad básica de análisis del sistema por tres motivos principales:

- Resumen y caracterización: permiten calcular parámetros relevantes del encuentro (distancias mínimas, tendencias de rumbo o velocidad) dentro del intervalo acotado.
- Clasificación: sirven como base para identificar el tipo de situación de encuentro conforme a reglas heurísticas derivadas del RIPA y detectar configuraciones particulares, como posibles cortes de proa.
- Evaluación segmentada: permiten que la valoración del ejercicio se realice por episodios concretos, evitando mezclar fases irrelevantes de la navegación con momentos en los que existe una interacción significativa entre buques.

En síntesis, este procedimiento transforma un registro continuo de navegación en una colección estructurada de episodios críticos comparables, sobre los cuales puede aplicarse posteriormente un análisis más robusto, trazable y orientado a la evaluación del comportamiento del buque propio frente a otros tráficos.

3.5.3.7 Clasificación de situaciones según geometría relativa RIPA

Una vez detectados y delimitados los eventos críticos, el cuaderno incorpora un bloque destinado a clasificar la situación de encuentro entre el buque propio y cada contacto. El objetivo de esta etapa no es únicamente asignar una etiqueta descriptiva, sino que permita interpretar su naturaleza desde el punto de vista de la navegación.

En particular, esta clasificación permite interpretar el tipo de interacción entre buques, relacionar la geometría del encuentro con la posible necesidad de maniobra y facilitar la evaluación posterior del ejercicio, ya que los márgenes de seguridad y las respuestas esperadas no son equivalentes en todas las configuraciones de encuentro.

La clasificación se apoya en variables que ya han sido calculadas durante el procesamiento previo y que forman parte de cada evento crítico:

- Marcación relativa del contacto respecto al buque propio, utilizada para determinar el sector en el que se encuentra.
- Rumbos de ambos buques.
- Velocidades de ambos buques.

El método adoptado sigue un enfoque heurístico basado en reglas geométricas. En lugar de resolver un modelo físico complejo del movimiento relativo, el sistema aplica reglas basadas en sectores angulares y comparaciones de rumbo y velocidad, que resultan suficientes para identificar las configuraciones de encuentro más relevantes desde el punto de vista operativo.

Estas reglas permiten asignar a cada instante del evento una categoría de situación de navegación, coherente con los patrones definidos en el RIPA. El clasificador contempla ocho categorías.

Por último, dado que pequeñas variaciones en los datos pueden provocar cambios puntuales en la categoría asignada, el sistema incorpora un mecanismo de estabilización temporal. En lugar de aceptar inmediatamente cada cambio de clasificación, se exige que un mismo tipo de situación se mantenga durante un número mínimo de registros consecutivos antes de considerarse válido. De este modo se evita que fluctuaciones aisladas en los datos generen interpretaciones erráticas del encuentro.

3.5.3.7.1 Fondeado

Un contacto se considera fondeado o prácticamente detenido cuando su velocidad es inferior a un umbral reducido (menor de 0.5 nudos) permanentemente. En estas condiciones no se interpreta como un encuentro dinámico entre buques en navegación.

3.5.3.7.2 Vuelta encontrada

Las situaciones de vuelta encontrada se identifican cuando se cumplen simultáneamente dos condiciones:

- El contacto se encuentra muy próximo a la proa del buque propio, dentro de un sector estrecho centrado en la marcación relativa 0°.
- Los rumbos de ambos buques presentan oposición significativa, cercana a los 180°.

Esta configuración corresponde a la situación clásica en la que ambos buques avanzan aproximadamente en direcciones opuestas sobre trayectorias convergentes.

3.5.3.7.3 Alcance

Las situaciones de alcance se identifican cuando uno de los buques se aproxima al otro desde su sector de popa, es decir, desde un arco superior a 22,5° a popa del través. Este criterio se implementa utilizando la marcación relativa y verificando simultáneamente la similitud de rumbos entre ambos buques.

En términos geométricos, el clasificador considera que existe una situación de alcance cuando se cumplen tres condiciones principales:

- El contacto se encuentra en el sector de popa, definido por marcaciones relativas comprendidas entre 112.5° y 247.5° respecto al buque. Este intervalo corresponde a la zona situada detrás del través del buque.
- Los rumbos de ambos buques son similares, lo que indica que sus trayectorias son aproximadamente paralelas. Para verificar esta condición se calcula la diferencia angular entre los rumbos, exigiendo que esta sea inferior a un determinado umbral.
- El buque que se sitúa en la popa tiene una mayor velocidad que el que se sitúa por la proa.

La situación se clasifica como "ALCANZANDO" cuando el buque propio presenta mayor velocidad que el contacto y, desde la perspectiva del contacto, el buque propio se encuentra situado en su sector de popa. Se realiza también la comprobación de rumbos.

Por el contrario, la situación se clasifica como "ALCANZADO" cuando el contacto presenta mayor velocidad que el buque propio, se encuentra en el sector de popa del buque propio y tienen rumbos prácticamente paralelos.

3.5.3.7.4 Cruce

Las situaciones de cruce se producen cuando el contacto se encuentra en los sectores laterales del buque propio. Se distinguen dos configuraciones principales. En primer lugar, se produce un "CRUCE POR ESTRIBOR" cuando el contacto se encuentra entre 0° y 112.5° de marcación relativa, es decir, por el costado de estribor del buque propio. En segundo lugar, se produce un "CRUCE POR BABOR" cuando el contacto se sitúa entre 247.5° y 360°, correspondiente al costado de babor. Además, para mejorar la interpretación del encuentro, el algoritmo también evalúa cómo se ve el buque propio desde el contacto. Para ello se calcula la marcación relativa inversa, es decir, la posición del buque propio desde la perspectiva del contacto.

Si ambos buques se observan desde el mismo lado relativo, el sistema identifica configuraciones simétricas representadas mediante etiquetas como:

- "CRUCE_ER_ER"
- "CRUCE_BR_BR"

3.5.3.7.5 Alejamiento

Las situaciones de alejamiento se dan cuando la diferencia entre los rumbos de ambos buques es suficientemente grande (superior a un determinado umbral), el sistema interpreta que las trayectorias son divergentes y que la situación deja de representar un encuentro convergente relevante.

3.5.3.7.6 Sin clasificación

Las situaciones establecidas como "NO_CLASIFICADO" se utilizan como categoría de control cuando no existen las columnas mínimas necesarias, faltan datos críticos o la geometría del encuentro no encaja de forma robusta en ninguna de las reglas definidas.

3.5.3.8 Detección de "corte de proa" como descriptor operativo adicional

Además de la clasificación principal del encuentro según el RIPA, el cuaderno incorpora un calculador complementario de corte de proa, destinado a identificar una geometría de cruce especialmente relevante desde el punto de vista operativo.

La detección se basa en la posición relativa entre buque propio y contacto, expresada inicialmente en coordenadas planas aproximadas. A partir de las diferencias de latitud y longitud entre ambos, el sistema construye un vector relativo en metros, que representa la separación espacial entre los dos buques en cada instante del evento.

Una vez obtenido este vector, la geometría se analiza en un sistema de ejes ligado al rumbo del contacto. Esto permite describir la trayectoria relativa del buque propio desde la referencia del otro buque, que es precisamente la base necesaria para detectar si llega a cruzar por delante de su proa.

El evento se considera compatible con un corte de proa cuando se verifican conjuntamente dos condiciones geométricas:

- El buque propio se encuentra por delante del contacto, lo que se comprueba exigiendo que la componente longitudinal sea positiva.
- La componente transversal cambia de signo a lo largo del evento, lo que indica que el buque propio pasa de una banda a la otra respecto al contacto.

La comprobación se realiza de forma secuencial a lo largo de los registros del evento. Para evitar interpretaciones erróneas, el sistema solo marca el corte de proa en aquellos instantes en los que el buque propio se mantiene por delante del contacto en dos observaciones consecutivas y, entre ellas, se produce el cambio de signo de la componente transversal. De este modo se evita etiquetar como corte de proa situaciones en las que existe únicamente una oscilación lateral sin una verdadera travesía por la zona de proa.

Cuando todo el evento ha sido previamente clasificado como “FONDEADO”, el descriptor no se considera aplicable, ya que no existe una interacción dinámica comparable a un encuentro entre buques en navegación. En ese caso, el resultado se marca como no relevante para esta evaluación.

En consecuencia, el corte de proa se emplea como un atributo adicional de caracterización del evento crítico, útil para enriquecer la evaluación posterior y diferenciar encuentros que, aun compartiendo la misma categoría RIPA, no presentan la misma complejidad operativa.

3.5.3.9 Detección acumulativa de maniobra del buque propio en la fase de acercamiento

Una vez clasificados los eventos críticos e incorporados los descriptores geométricos adicionales, se realizan una serie de cálculos para comprobar si el buque propio ha realizado una maniobra apreciable antes del punto de máxima aproximación. El objetivo de esta etapa es identificar, dentro de cada evento, si durante la fase de acercamiento existieron cambios significativos de rumbo, de velocidad o de ambos, de forma que puedan ser utilizados posteriormente en la evaluación de la respuesta del alumno ante el encuentro.

Para ello, el análisis toma como referencia el instante en el que la distancia entre buques alcanza su valor mínimo, es decir, el punto de máxima aproximación. A partir de ese instante se reconstruye hacia atrás la fase continua de acercamiento, entendida como el tramo temporal en el que la distancia entre ambos buques venía disminuyendo de forma sostenida. De este modo, la detección de maniobra no se aplica sobre todo el evento, sino únicamente sobre la parte realmente relevante desde el punto de vista de la toma de decisión previa al encuentro.

Sobre esta fase de aproximación se evalúan de manera independiente dos dimensiones de la maniobra del buque propio:

- Cambio de rumbo. El sistema analiza la evolución del rumbo del buque propio a lo largo del tramo previo a la distancia mínima. Con esta información se obtiene el giro acumulado hacia estribor y hacia babor, así como un cambio neto global. Si el cambio total supera un umbral mínimo predefinido, se considera que ha existido una maniobra de rumbo reseñable.
- Cambio de velocidad. De forma análoga, se analiza la evolución de la velocidad del buque propio durante la misma fase de acercamiento. Se calculan los incrementos instantáneos, se suavizan para reducir ruido y se estiman tanto los aumentos acumulados como las reducciones acumuladas. Si dicha variación supera el umbral establecido, el sistema considera que ha existido una maniobra de velocidad reseñable, distinguiendo además si la tendencia general corresponde a una aceleración o a una reducción.

A partir de ambos análisis se obtiene una clasificación sintética de la respuesta del buque propio, distinguiendo entre maniobra de rumbo, maniobra de velocidad, maniobra combinada y ausencia de maniobra reseñable.

El resultado se incorpora al archivo del evento mediante un conjunto de variables resumen, entre las que se incluyen la magnitud acumulada del cambio de rumbo, el sentido del giro, la variación de velocidad y varios indicadores booleanos que señalan si la maniobra ha existido o no.

Con el objetivo de sintetizar la información más relevante de cada encuentro, el sistema genera una tabla resumen asociada a cada evento crítico. Esta tabla recoge los principales indicadores obtenidos durante el análisis, incluyendo el identificador del contacto (MMSI), la categoría de situación según RIPA, la distancia mínima registrada durante el encuentro, el DCPA mínima, la detección de corte de proa y los indicadores de maniobra del buque propio previos al punto de máxima aproximación. Asimismo, se incorporan las variaciones acumuladas de rumbo y velocidad, junto con la tendencia general de la maniobra. La Figura 3-23 muestra un ejemplo de una tabla generada automáticamente que presenta los principales indicadores del encuentro, incluyendo la categoría de situación según RIPA, las distancias mínima y DCPA, la detección de corte de proa y los indicadores de maniobra del buque propio previos al punto de máxima aproximación.

MMSI	**123450093**
RIPAM	ALCANZANDO
Dist mín (yd)	762.0
DCPA mín (yd)	756.3
Corte de proa al contacto	No
Maniobra total	Sí
Maniobra rumbo	Sí
Maniobra velocidad	Sí
Δ rumbo neto (°)	**15.0 ESTRIBOR**
Δ rumbo BABOR (°)	0.6
Δ rumbo ESTRIBOR (°)	15.6
Δ velocidad neta (kn)	**1.33**
Δ aumento vel (kn)	2.88
Δ reducción vel (kn)	1.41
Tendencia velocidad	ACELERACION

Figura 3-23: Resumen de métricas del evento crítico

3.5.3.10 Visualización integrada de los eventos críticos

Con el objetivo de facilitar la interpretación de los encuentros detectados, el cuaderno incorpora un bloque de visualización integrada de los eventos críticos, en el que se representan de forma simultánea distintos aspectos geométricos y cinemáticos de cada interacción entre el buque propio y los contactos. Esta representación permite analizar el evento desde diferentes perspectivas complementarias, combinando una vista tipo radar, una representación cartográfica y la evolución temporal de las variables de navegación.

La figura generada para cada evento se compone de cuatro paneles principales. En el panel superior izquierdo se muestra una representación tipo radar en referencia *north-up*, donde se reconstruye la posición relativa del contacto respecto al buque propio a partir de la marcación relativa y la distancia entre ambos. Esta representación permite visualizar de forma intuitiva la evolución del contacto alrededor del buque propio, incluyendo la dirección de los rumbos mediante flechas y la trayectoria seguida durante el evento. Asimismo, se destaca el instante en el que se produce la mínima distancia

entre ambos buques, representado mediante una línea discontinua que une las posiciones relativas correspondientes.

En el panel superior derecho se presenta la trayectoria geográfica del encuentro sobre una carta Mercator, construida a partir de las posiciones de ambos buques. El fondo cartográfico se genera empleando la línea de costa, lo que permite diferenciar visualmente las zonas de mar y tierra. Las trayectorias del buque propio y del contacto se representan sobre esta carta junto con los puntos inicial y final de cada derrota, así como el instante correspondiente a la mínima separación.

En los paneles inferiores se representan las variables temporales del encuentro. El panel inferior izquierdo muestra la evolución de los rumbos de ambos buques, mientras que el panel inferior derecho presenta la evolución de sus velocidades sobre el fondo. Estas gráficas permiten identificar posibles maniobras realizadas durante el evento, así como analizar la dinámica relativa del encuentro.

La combinación de estas cuatro representaciones proporciona una visión completa del evento crítico, integrando la geometría relativa del encuentro, su contexto geográfico y la evolución temporal de las variables de navegación. De este modo, la Figura 3-24 constituye un ejemplo de figura que visualización integrada de los eventos críticos.

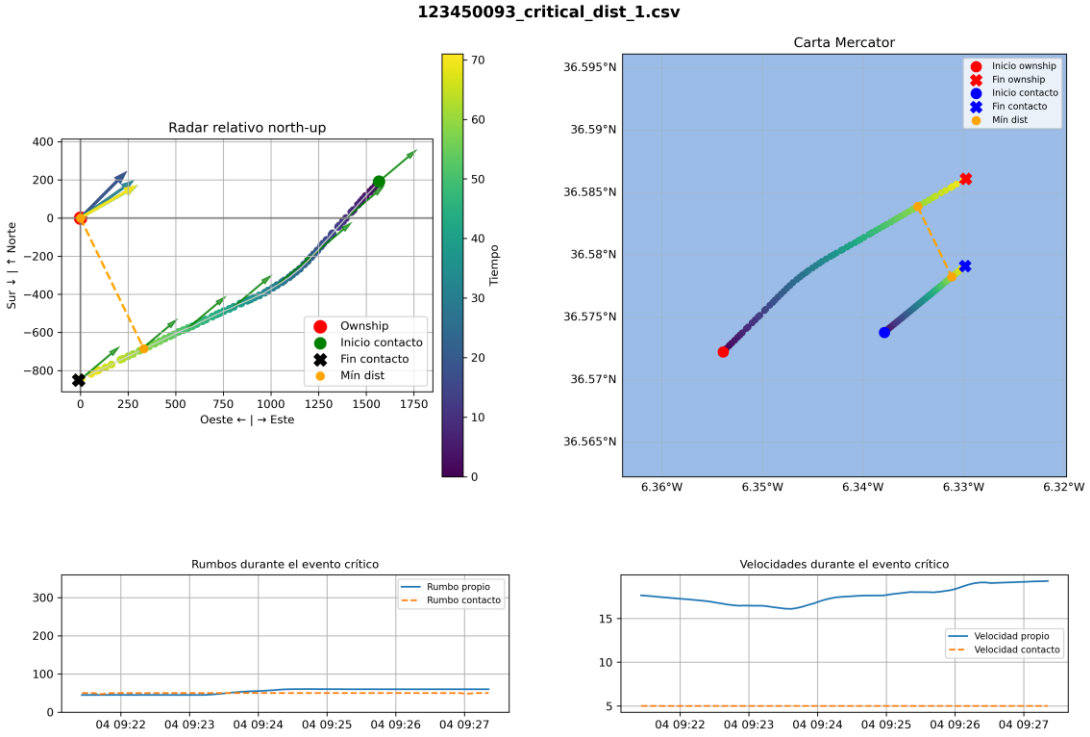


Figura 3-24: Representación integrada de un evento crítico

3.5.3.11 Caracterización radial del encuentro con el histograma de permanencia

Con el fin de complementar el análisis geométrico de los eventos críticos, el sistema incorpora un bloque de caracterización radial del encuentro basado en la reconstrucción de la posición relativa del contacto en un plano tipo radar y en la posterior obtención de un histograma de permanencia por franjas radiales. Este procedimiento permite describir no solo la trayectoria del contacto respecto al buque propio, sino también cómo se distribuye temporalmente su proximidad durante el evento. Este histograma será la base de la futura evaluación de los eventos críticos.

El punto de partida es la definición de una distancia de referencia que no se fija de manera uniforme para todos los encuentros, sino que se adapta en función de dos factores: la situación RIPA representativa del evento y el tamaño del contacto, aproximado mediante su eslora. A partir de ambos elementos, el

sistema asigna un umbral de separación de referencia. Esta distancia actúa como escala base para normalizar el análisis radial.

Una vez establecido el umbral, se reconstruye la posición relativa del contacto en coordenadas cartesianas a partir de la marcación relativa, la distancia entre buques y el rumbo del buque propio. De este modo se obtiene una representación radar del encuentro, en la que el buque propio permanece en el origen y el contacto se proyecta en función de su posición relativa instantánea.

Sobre esta representación se define una malla de anillos concéntricos generados desde el centro, con incrementos radiales proporcionales al umbral de referencia. En concreto, el espacio se divide en bandas del 10 % del umbral, extendiéndose hasta el 150 % de dicho valor. Esta discretización permite transformar la distancia continua en una serie de intervalos radiales normalizados, comparables entre encuentros de distinta naturaleza.

A continuación, cada observación del evento se asigna a la franja radial que le corresponde según su distancia al origen. A partir de esta asignación se construye un histograma temporal de permanencia, que expresa la proporción de tiempo que el contacto ha permanecido en cada banda de distancia relativa. El resultado no se interpreta, por tanto, como un histograma de frecuencias puramente geométricas, sino como una medida de ocupación temporal de zonas de proximidad.

Este enfoque aporta una información especialmente útil para la evaluación, ya que permite distinguir entre encuentros que, aun pudiendo presentar una distancia mínima similar, difieren en la persistencia temporal dentro de las zonas más próximas.

Como resultado del bloque, el sistema genera dos salidas complementarias: un archivo tabular con los valores del histograma radial que se usará en la evaluación de eventos y una figura combinada radar–histograma, en la que la geometría del encuentro y la distribución temporal de la proximidad quedan representadas de forma conjunta. Ejemplo de esta representación es la Figura 3-25, que muestra ambos gráficos un encuentro entre el buque propio y un contacto.

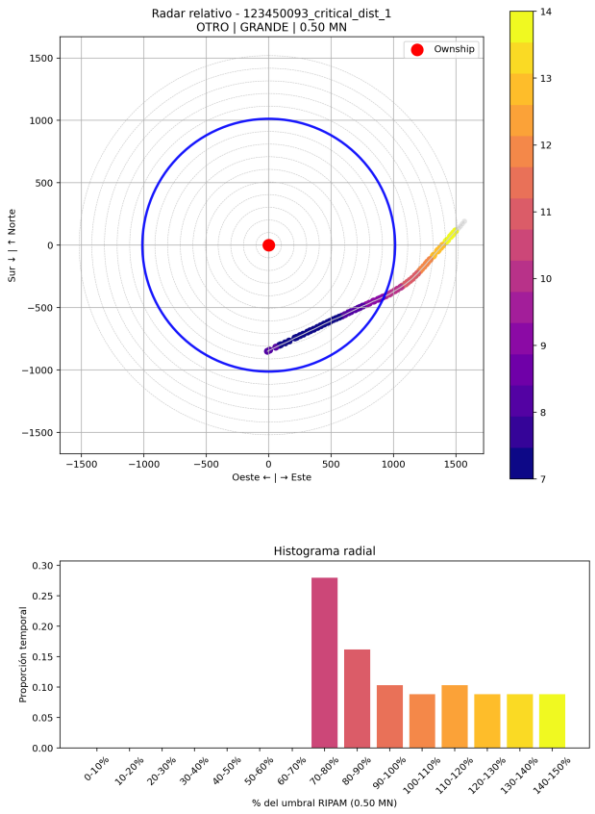


Figura 3-25: Caracterización radial de un evento crítico mediante radar relativo e histograma de permanencia

3.5.4 Algoritmo de evaluación

3.5.4.1 Diseño del evaluador y fundamento metodológico

El evaluador desarrollado en este bloque tiene como objetivo transformar cada evento crítico en una valoración cuantitativa de seguridad, expresada mediante una puntuación en escala 0–10 y una categoría cualitativa asociada. Para ello, el sistema no se limita a considerar una única magnitud geométrica, como la distancia mínima entre buques, sino que combina distintas dimensiones del encuentro con el fin de obtener una valoración más próxima al criterio operativo de un instructor.

El fundamento metodológico del evaluador parte de una idea central: la seguridad de un encuentro no depende solo de cuán cerca llegaron a estar los buques, sino también de durante cuánto tiempo permanecieron en una zona comprometida, de si la situación exigía o no maniobra, de si dicha maniobra se realizó y de si la evolución general del evento presentó rasgos especialmente desfavorables. En consecuencia, el sistema integra tres planos de análisis complementarios.

En primer lugar, incorpora una dimensión geométrica de proximidad, basada en la distribución temporal de las distancias relativas respecto a una referencia crítica adaptada a cada caso específicamente. Este criterio permite evaluar la severidad espacial del encuentro no de manera puntual, sino atendiendo a la permanencia del contacto en diferentes bandas de proximidad.

En segundo lugar, incorpora una dimensión operativa de respuesta, centrada en determinar si el buque propio maniobró cuando debía hacerlo, si evitó maniobrar cuando no era necesario y, en ciertos tipos de encuentro, si la dirección de la maniobra fue coherente con la respuesta esperada.

Finalmente, el evaluador añade una dimensión de agravantes dinámicos, destinada a identificar patrones que, sin quedar plenamente recogidos por la clasificación RIPA o por la distancia mínima, reflejan una evolución más comprometida del encuentro, como sucede cuando el DCPA disminuye de forma sostenida o cuando se produce un corte de proa en ciertos encuentros.

Este planteamiento responde a una lógica de evaluación deliberadamente no reducida a promedios simples. El sistema busca que la nota final recoja de forma interpretable tanto la geometría del riesgo como la adecuación de la actuación del buque propio, evitando que un único descriptor domine por completo la valoración.

3.5.4.2 Determinación de la distancia crítica de referencia

El primer paso del evaluador consiste en establecer una distancia crítica de referencia para cada evento. Esta distancia actúa como base de la evaluación y se adapta en función de la configuración concreta del encuentro, en lugar de aplicarse de forma uniforme a todos los casos. Estas distancias críticas de referencia se obtienen de la encuesta realizada a los expertos en navegación durante el desarrollo del trabajo.

Para ello, cada evento se asocia en primer lugar a una situación RIPA dominante, normalizada en un conjunto reducido de categorías operativas: alcance, vuelta encontrada, cruce por estribor, cruce por babor u otros casos residuales. A continuación, el contacto se clasifica por tamaño a partir de su eslora, distinguiendo entre buques pequeños y grandes. La combinación de ambos factores permite seleccionar un intervalo de separación admisible previamente definido.

Este criterio resulta metodológicamente relevante, ya que permite adaptar la severidad del análisis a la naturaleza del caso. Una misma distancia observada puede tener significados distintos en un cruce, en un alcance o en una vuelta encontrada, y también puede interpretarse de forma diferente en función del tamaño del buque con el que se produce la interacción.

3.5.4.3 Evaluación de la proximidad mediante histograma temporal radial

Una vez fijada la distancia crítica de referencia, el evaluador analiza la distribución temporal de la proximidad entre ambos buques. Para ello, la distancia instantánea registrada en cada observación del

evento se expresa como porcentaje de la distancia crítica del caso, construyendo así una escala radial normalizada.

Sobre esta escala se definen bandas consecutivas de 10 %, desde el 0 % hasta el 150 % de la distancia de referencia. Cada registro del evento queda asignado a una de estas franjas radiales. A diferencia de un histograma convencional basado solo en frecuencia de observaciones, aquí la contribución de cada registro se pondera por el tiempo real transcurrido entre una observación y la siguiente. En consecuencia, el resultado expresa la proporción temporal de permanencia del contacto en cada nivel de proximidad.

Este enfoque permite diferenciar entre eventos que pueden presentar una distancia mínima similar, pero cuya estructura temporal es distinta. No tiene la misma gravedad un contacto que penetra brevemente en una zona próxima y vuelve a separarse que otro que permanece un tiempo prolongado en ella. Por ello, el evaluador no se basa únicamente en el mínimo alcanzado, sino en la ocupación temporal de las distintas zonas radiales.

Cuando la información temporal no está disponible o no es válida, el sistema utiliza como alternativa una ponderación uniforme. No obstante, la formulación principal está pensada para trabajar con duración real entre registros, ya que esta opción reproduce de forma más fiel la evolución efectiva del encuentro.

3.5.4.4 Criterio de "peor zona" y puntuación base del evento

El evaluador no calcula la puntuación base a partir de una media global, sino mediante un criterio de "peor zona". El objetivo es que la valoración de seguridad debe estar dominada por el nivel de proximidad realmente alcanzado con cierta entidad temporal, y no por una compensación estadística entre fases seguras y fases más comprometidas.

Para ello, el sistema identifica la primera banda radial significativa en la que el contacto presenta una permanencia no despreciable. Esa banda se interpreta como la peor zona efectivamente ocupada durante el evento y se usa para establecer una puntuación base de seguridad.

La conversión entre proximidad y puntuación se realiza mediante una función de utilidad definida sobre el centro de cada porcentaje. Las zonas más interiores, claramente por debajo del umbral crítico, reciben puntuaciones muy bajas, mientras que las bandas exteriores reciben valores progresivamente más altos. El esquema empleado hace que el valor de referencia del caso, es decir, el 100 % de la distancia crítica, marque un punto intermedio de la escala, y que las posiciones claramente exteriores a ese umbral se asocien a puntuaciones más favorables.

Este planteamiento pretende evitar que una media global o una agregación excesivamente compensatoria desdibuje la gravedad de encuentros que, aunque hayan tenido fases relativamente benignas, han llegado a situarse en zonas muy próximas.

3.5.4.5 Penalización por permanencia bajo el umbral crítico

La puntuación base derivada de la peor zona se corrige posteriormente mediante una penalización ligada al tiempo acumulado por debajo del umbral crítico del caso. En esta formulación, el umbral crítico coincide con el 100 % de la distancia de referencia seleccionada para ese evento.

El evaluador calcula, por tanto, la proporción temporal del encuentro en la que la distancia entre buques permanece por debajo de ese límite. Cuanto mayor sea dicha proporción, mayor será la reducción aplicada sobre la puntuación base.

Este ajuste añade una dimensión importante a la evaluación, ya que distingue entre eventos en los que la penetración en la zona crítica es puntual y aquellos en los que esa situación se mantiene de forma sostenida. De este modo, la severidad no depende exclusivamente de la proximidad alcanzada, sino también de la persistencia temporal del riesgo.

3.5.4.6 Determinación de la obligación de maniobra

Una segunda dimensión esencial del evaluador consiste en determinar si, dadas las características del encuentro, el buque propio debía maniobrar. Esta decisión se vincula principalmente a la clasificación RIPA dominante del evento.

En aquellos tipos de encuentro donde el reglamento o la interpretación operativa atribuyen claramente al buque propio la responsabilidad de actuar, el sistema marca de forma directa que existe obligación de maniobra. Estos son los casos de cruce por estribor, vuelta encontrada y alcanzando. En otros casos, donde la lógica del encuentro no exige esa respuesta al propio, se considera que no debe maniobrar. Finalmente, para situaciones ambiguas, condicionadas o poco definidas, la decisión se apoya en un criterio subsidiario de proximidad: si la distancia mínima observada cae por debajo de un valor crítico general (un cuarto de milla), se interpreta que la situación sí requería una actuación. Este es el caso de buques fondeados y de buques sin situación clasificada.

Este paso es especialmente importante porque permite contextualizar la detección de maniobra. Una misma alteración de rumbo o de velocidad no tiene el mismo significado si se produce en una situación donde maniobrar era obligatorio que si aparece en un escenario en el que la respuesta más adecuada habría sido mantener la derrota.

3.5.4.7 Evaluación de la maniobra realizada

Una vez establecida la obligación de maniobra, el sistema incorpora la información procedente del bloque de detección acumulativa para determinar si el buque propio realizó una maniobra reseñable antes del punto de máxima aproximación. Esta maniobra puede consistir en un cambio apreciable de rumbo, de velocidad o en una combinación de ambos.

Si la situación exigía maniobra y no se detecta ninguna actuación significativa, el evaluador aplica una penalización por falta de maniobra. Se trata de una de las correcciones más severas del modelo, ya que responde a la ausencia de reacción ante una configuración potencialmente comprometida.

Por el contrario, si la situación no requería intervención y aun así se detecta maniobra, se aplica una penalización más moderada por maniobra innecesaria.

De este modo, el evaluador no solo analiza la existencia material de cambios en la conducta del buque propio, sino también su adecuación a la situación del encuentro.

3.5.4.8 Evaluación de la dirección de la maniobra

En determinados tipos de encuentro, no basta con que exista maniobra, sino que también resulta relevante comprobar si su dirección es la esperada desde el punto de vista operativo. Por ello, el evaluador examina el sentido predominante del giro detectado en el buque propio.

Este control se aplica específicamente en situaciones como el cruce por estribor y la vuelta encontrada, en las que la lógica de resolución adoptada exige que la maniobra, cuando existe, se realice hacia estribor. Si el sistema detecta una maniobra, pero el giro dominante no corresponde a esa banda, se aplica una penalización adicional por dirección incorrecta.

La inclusión de este criterio aporta una capa de evaluación cualitativa especialmente útil, ya que diferencia entre maniobras que, aun siendo apreciables, no resultan coherentes con la solución esperada para el tipo de encuentro analizado.

3.5.4.9 Penalizaciones adicionales por evolución desfavorable del encuentro

Además de la proximidad y de la maniobra, el evaluador contempla dos patrones adicionales que actúan como factores agravantes del evento.

El primero es la detección de un DCPA decreciente. Para identificarlo, el sistema analiza la evolución temporal de la magnitud de DCPA disponible y estima su tendencia general a través de una

regresión lineal y comparando los estados iniciales y finales. Si se observa una disminución apreciable a lo largo del evento, se interpreta que la situación evoluciona de forma desfavorable, incrementando progresivamente el riesgo de aproximación. En consecuencia, se aplica una penalización adicional.

El segundo agravante es la existencia de corte de proa, obtenida a partir del bloque geométrico específico desarrollado previamente. Cuando aparece, el evaluador reduce la puntuación del evento, salvo en determinados tipos de encuentro en los que esta geometría forma parte de la propia configuración esperable y, por tanto, no se considera un factor adicional de agravamiento. Estos casos son el de vuelta encontrada y el de cruce por babor.

Estas penalizaciones complementarias permiten que la valoración final recoja no solo el nivel de proximidad alcanzado y la respuesta del buque propio, sino también ciertos rasgos de la dinámica evolutiva del encuentro que incrementan su complejidad o severidad.

3.5.4.10 Obtención de la puntuación final y clasificación cualitativa

La puntuación final del evento se obtiene aplicando sucesivamente las penalizaciones definidas sobre la puntuación base derivada del histograma radial. El resultado se expresa en una escala de 0 a 10, acotada para garantizar su consistencia e interpretabilidad.

A partir de esta puntuación continua, el sistema asigna además una clasificación cualitativa de seguridad. Los eventos con puntuaciones altas se consideran seguros; aquellos con resultados intermedios se clasifican como aceptables o justos, según el grado de compromiso observado; y los eventos con puntuaciones bajas se etiquetan como peligrosos.

Esta doble salida, numérica y cualitativa, facilita tanto la explotación automática de los resultados como su lectura docente posterior. La puntuación aporta una medida continua de severidad, mientras que la clase cualitativa ofrece una interpretación más inmediata del nivel de seguridad del encuentro.

3.5.5 Generación automática del informe de evaluación

Como fase final del proceso, al igual que el sistema establecido en el evaluador de seguridad en la navegación, el sistema genera automáticamente un informe de evaluación en formato PDF que integra de forma estructurada todos los resultados obtenidos durante el análisis de los eventos críticos. El objetivo de este bloque es transformar las distintas salidas producidas por el evaluador —gráficas, tablas y métricas de seguridad— en un documento único y coherente, fácilmente interpretable y utilizable tanto para revisión técnica como para retroalimentación docente.

El informe comienza con una portada que identifica el análisis realizado. A continuación, se incluyen dos páginas iniciales con los mapas generales del tráfico marítimo, donde se representa la totalidad de contactos detectados y el conjunto resultante tras aplicar los filtros operativos del sistema. Estas páginas proporcionan una visión global del escenario analizado antes de entrar en el estudio detallado de cada interacción.

Posteriormente, el documento se organiza por contactos, incorporando para cada uno de ellos el análisis de los eventos críticos detectados. Para cada evento se generan varias páginas consecutivas que recogen: una tabla resumen con los parámetros principales del encuentro, una representación espacial que combina radar relativo y carta Mercator, el histograma radial de proximidad respecto al umbral de referencia y, finalmente, una página de evaluación en la que se muestran la puntuación de seguridad obtenida, la clasificación cualitativa del evento y los criterios utilizados para su cálculo.

El informe concluye con una página de síntesis, en la que se calcula la media global de las puntuaciones obtenidas y se destacan los eventos mejor y peor valorados del conjunto analizado. Este resumen permite obtener rápidamente una visión general del nivel de seguridad del ejercicio y de los puntos donde se concentran los encuentros más comprometidos.

De esta forma, el sistema convierte automáticamente los resultados generados durante el análisis en un informe completo y ordenado, que facilita tanto la interpretación de los eventos individuales como la evaluación global del ejercicio de navegación.

3.5.6 Repositorio del proyecto

Con el objetivo de garantizar la transparencia del trabajo y facilitar el acceso a los resultados generados durante el desarrollo del evaluador, se ha creado un repositorio digital donde se almacenan diversos documentos e informes producidos por el sistema. Este repositorio incluye 4 ejemplos de los informes generados automáticamente en ejercicios respecto al análisis de contactos. Específicamente son dos ejercicios de Ferrol y dos ejercicios de Rota. Esto permite visualizar el tipo de retroalimentación que el evaluador proporciona al alumno e instructor tras la realización de un ejercicio de navegación en el simulador. De este modo, se facilita la consulta y revisión de los resultados obtenidos durante las distintas pruebas realizadas en el marco del presente trabajo. [27]

Además de ello, el tercer anexo del presente documento contiene dos informes de evaluación completos. De estos informes, uno se desarrolla en el entorno de Ferrol y el otro se desarrolla en el entorno de Rota.

.

4 RESULTADOS

Una vez desarrollado el evaluador inteligente, la validación de su funcionamiento se ha realizado a partir de los informes automáticos generados por el propio sistema en los dos bloques definidos en este trabajo. Por una parte, la evaluación de la seguridad en la navegación respecto a la derrota prevista y, en segundo lugar, la evaluación automática de los encuentros con contactos conforme a los criterios del RIPA. La salida final de ambos bloques no se limita a una puntuación numérica, sino que se materializa en informes PDF estructurados que incorporan mapas, métricas, comentarios interpretativos y recomendaciones de mejora, lo que permite analizar no solo la nota obtenida, sino también las causas concretas que la justifican.

Dentro del repositorio se encuentran ejemplos de PDF generados automáticamente a través del programa desarrollado. Además, el anexo número tres del presente documento contiene la valoración completa de un ejercicio en el entorno de Rota y otro ejercicio en el entorno de Ferrol.

Para el bloque de seguridad en la navegación, se han considerado diez informes correspondientes a los entornos de Ferrol y Rota. Éstos cubren los distintos niveles de desempeño, desde ejercicios clasificados como excelentes hasta casos críticos. En paralelo, para el bloque de análisis de encuentros se han tomado como referencia cuatro informes globales de evaluación, dos en Ferrol y dos en Rota. Cada uno de ellos presenta su correspondiente media final, valoración cualitativa y número de eventos evaluados. Además, estos ejercicios también están valorados respecto a la seguridad en la navegación. Esta base documental permite valorar el comportamiento del sistema en escenarios diferenciados y comprobar si las métricas obtenidas son coherentes con la calidad real de la navegación desarrollada.

4.1 Resultados del evaluador de seguridad en la navegación

Los resultados obtenidos en el bloque de evaluación de la derrota muestran que el sistema es capaz de discriminar con claridad distintos niveles de seguridad a partir de variables espaciales objetivas, como la permanencia en la banda central, la desviación lateral acumulada, la navegación fuera del corredor y la exposición a zonas de severidad alta o crítica. En todos los informes analizados, la puntuación final aparece acompañada de una categoría cualitativa y de una interpretación automática coherente con los indicadores calculados, lo que confirma que el evaluador no sólo clasifica, sino que además justifica la calificación obtenida.

4.1.1 Resultados en el entorno de Ferrol

4.1.1.1 Calificación excelente

En el caso de Ferrol, el mejor resultado observado corresponde al ejercicio clasificado como excelente, con una puntuación final de 92,97/100. En este caso, el sistema registró 185 celdas activadas, de las cuales 143 pertenecían a la banda interior, lo que equivale a una permanencia del 77,3 % en la

zona de navegación más favorable. La desviación global fue reducida (7,03 %) y la exposición a zonas sensibles fue prácticamente nula, con solo un 0,54 % de presencia en celdas de riesgo alto y ninguna incursión en celdas críticas.

Además, la valoración global obtenida resulta coherente con el comportamiento general de la derrota analizada. La elevada permanencia en la banda interior indica que la mayor parte de la trayectoria se desarrolló dentro del corredor óptimo de navegación, lo que implica un seguimiento preciso del eje previsto y una correcta gestión del rumbo durante el ejercicio. A ello se suma una desviación global reducida y una presencia prácticamente inexistente en zonas de riesgo elevado, lo que confirma que la trayectoria se mantuvo dentro de márgenes de seguridad adecuados. En conjunto, estos indicadores reflejan una navegación estable, precisa y segura, por lo que la clasificación del ejercicio dentro de la categoría más alta. Por ello, la puntuación final obtenida resulta plenamente consistente con las métricas calculadas por el sistema de evaluación. La Figura 4-1 muestra la trayectoria seguida por el buque durante el ejercicio valorado como excelente superpuesta a la discretización espacial utilizada por el evaluador en el entorno de Ferrol. (Fuente propia)

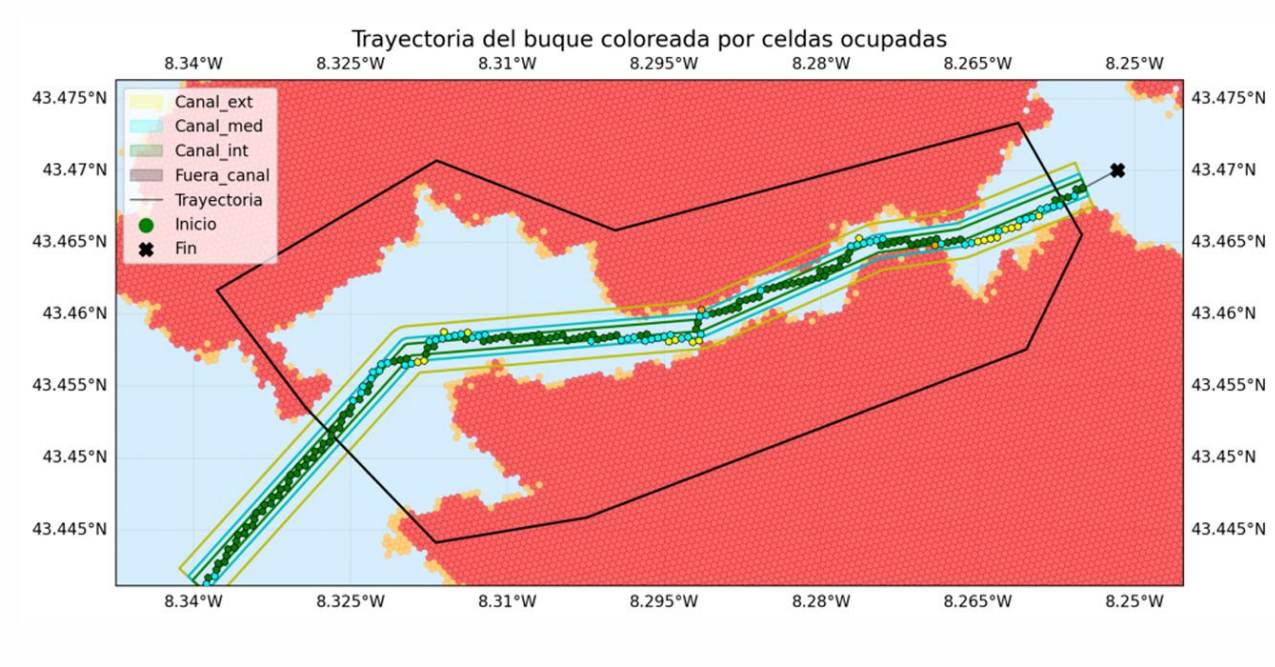


Figura 4-1: Trayectoria del buque durante el ejercicio valorado como excelente en Ferrol

4.1.1.2 Calificación adecuada

En el ejercicio clasificado como adecuado, la puntuación final fue de 74,8/100, con un total de 146 celdas activadas durante la trayectoria analizada. De ellas, 79 celdas correspondieron a la banda interior, lo que representa una permanencia del 54,11 % en el corredor principal. El resto de la trayectoria se distribuye entre 40 celdas en la banda media (27,4 %) y 25 celdas en la banda exterior (17,12 %), además de 2 celdas fuera del corredor evaluado (1,37 %). Esta distribución espacial refleja una navegación mayoritariamente alineada con la derrota prevista, aunque con desviaciones laterales moderadas que elevan la desviación global hasta el 18,49 %. No se detectaron celdas clasificadas como de riesgo alto o crítico, lo que confirma que, pese a las desviaciones, el margen de seguridad se mantuvo dentro de valores aceptables.

La Figura 4-2 presenta el conjunto de métricas espaciales utilizadas por el evaluador para cuantificar el comportamiento de la derrota durante el ejercicio valorado como adecuado. La tabla incorpora el indicador que se clasifica, su valor y la interpretación dentro del evaluador. (Fuente propia)

Tabla resumen de métricas

Indicador	Valor	Interpretación
Total celdas activadas	146	Base del análisis espacial de la derrota
Celdas interior (green)	79	Tránsito por la banda interior de navegación, próxima al eje de la derrota
Celdas medio (cyan)	40	Separación leve respecto al eje de la derrota
Celdas exterior (yellow)	25	Desviación lateral significativa dentro de la zona navegable evaluada
Celdas fuera (black)	2	Salida de los límites laterales de la zona navegable evaluada
Celdas riesgo alto (orange)	0	Zonas de riesgo alto
Celdas riesgo crítico (red)	0	Zonas de riesgo crítico
% interior (green)	54.11	Permanencia en la banda interior de navegación
% medio (cyan)	27.4	Separación leve respecto al eje
% exterior (yellow)	17.12	Desviación lateral apreciable
% fuera (black)	1.37	Pérdida de la zona navegable evaluada
% alto (orange)	0.0	Exposición a riesgo alto
% crítico (red)	0.0	Exposición a riesgo crítico
% desvío (yellow+black)	18.49	Desviación global respecto al eje de la derrota
% riesgo (orange+red)	0.0	Exposición global a zonas sensibles
% fuera de la banda central	45.89	Porcentaje fuera de la banda interior de navegación
Índice global (0-100)	15.14	Severidad agregada ponderada por tipo de celda
Riesgo fuzzy (0-100)	33.5	Salida difusa antes de penalizaciones y techo doctrinal
Severidad máxima (0-100)	70.0	Peor nivel de severidad observado a lo largo de la derrota
Score seguridad (0-100)	74.76	Puntuación final (100 = mejor seguridad)
Categoría final	Adecuada	Clasificación final de seguridad en la navegación

Figura 4-2: Resumen de métricas calculadas por el evaluador para el ejercicio clasificado como adecuado

4.1.1.3 Calificación mejorable

En el ejercicio clasificado como mejorable, la puntuación descendió hasta 59,8/100, lo que refleja un deterioro más claro en la precisión de la navegación. En este caso se activaron 184 celdas, de las cuales 113 pertenecen a la banda interior (61,7 %). Sin embargo, la presencia de 33 celdas en la banda exterior (17,55 %) y especialmente 38 celdas fuera del corredor evaluado (20,21 %) indica una pérdida de control lateral más significativa. Se registra una celda de riesgo alto, que penaliza notablemente la calificación final obtenida.

La Figura 4-3 muestra la trayectoria seguida por el buque durante el ejercicio sobre un mapa del área de navegación, donde el entorno ha sido discretizado en una malla espacial que clasifica cada zona en función de su proximidad a áreas potencialmente peligrosas. Esta representación permite visualizar de forma directa la relación entre la derrota del buque y el nivel de riesgo asociado a cada posición. (Fuente propia)

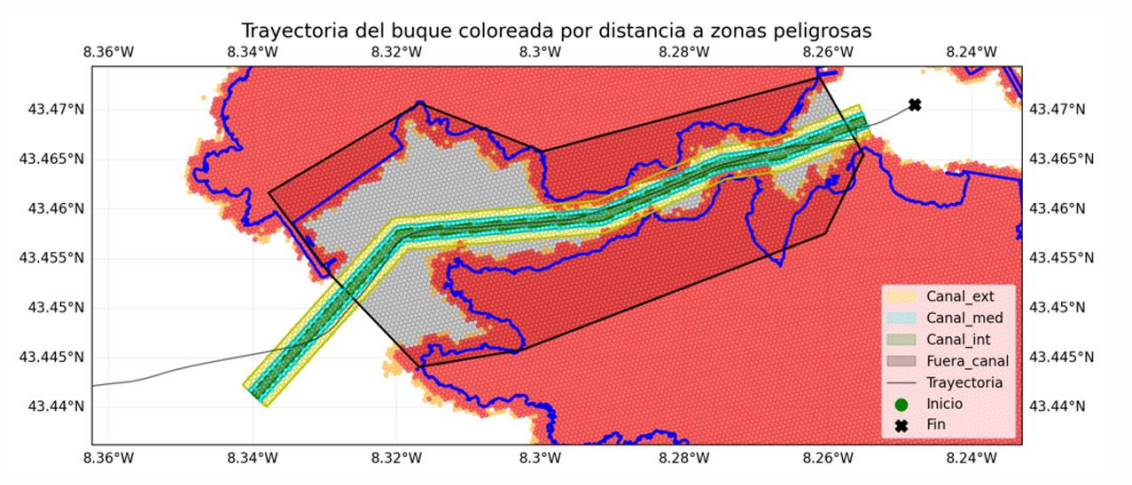


Figura 4-3: Representación espacial de la trayectoria del buque en el ejercicio analizado con las delimitaciones del corredor y áreas críticas

4.1.1.4 Calificación deficiente

En el ejercicio clasificado como deficiente, la degradación es aún más evidente. La trayectoria activó 187 celdas, de las cuales únicamente 71 corresponden a la banda interior (37,97 %), mientras que una parte considerable de la derrota discurre por bandas exteriores: 48 celdas en banda media (25,67 %) y 62 en banda exterior (33,16 %). Además, se registran 5 celdas fuera del corredor evaluado (2,67 %) y 1 celdas en zonas de riesgo alto. Esta distribución espacial se traduce en una desviación global del 35,83 %, acompañada de una exposición global a zonas sensibles del 0,53 %, lo que evidencia una pérdida de precisión en el seguimiento de la derrota y un aumento del riesgo potencial asociado a la navegación. Como consecuencia, la puntuación final desciende hasta 51,1/100.

La Figura 4-4 muestra el comentario interpretativo generado automáticamente por el evaluador tras el análisis de las métricas espaciales de la derrota. Este bloque forma parte del informe automático y tiene como objetivo traducir los indicadores cuantitativos calculados por el sistema en una explicación comprensible del comportamiento de la navegación durante el ejercicio. (Fuente propia)

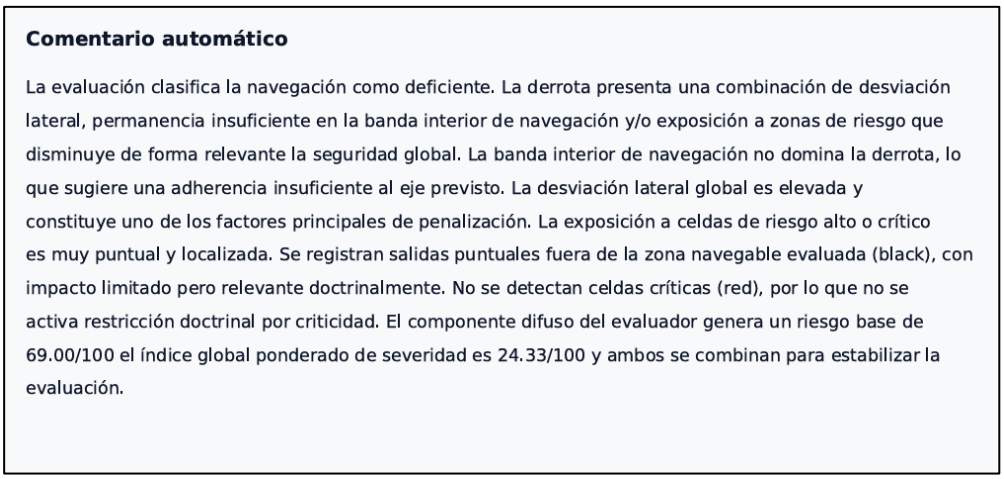


Figura 4-4: Comentario automático generado por el sistema evaluador tras el análisis del ejercicio, donde se sintetiza la interpretación de las métricas de navegación

4.1.1.5 Calificación crítica

Finalmente, el caso clasificado como crítico representa el escenario más desfavorable. En este ejercicio se activaron 157 celdas, de las cuales solo 68 corresponden a la banda interior (43,31 %), mientras que una proporción muy elevada se distribuye en bandas adyacentes: 60 celdas en banda media (38,22 %) y 24 en banda exterior (15,29 %). Además, se registran 2 celdas en zonas de riesgo alto y otras dos celdas de riesgo crítico. Esto implica incursiones directas en áreas de gran severidad. Debido a la presencia de estas celdas críticas, el evaluador aplica un techo doctrinal que limita la puntuación máxima a 20/100, lo que explica que la calificación final se sitúe exactamente en ese valor. Este comportamiento refleja una pérdida significativa del control de la derrota y una exposición directa a zonas potencialmente peligrosas para la navegación.

La Figura 4-5 muestra el comentario interpretativo generado automáticamente por el evaluador tras el análisis de las métricas espaciales de la derrota. Este bloque forma parte del informe automático y tiene como objetivo traducir los indicadores cuantitativos calculados por el sistema en una explicación comprensible del comportamiento de la navegación durante el ejercicio. (Fuente propia)

Recomendación principal

Prioridad de mejora: eliminar las incursiones en celdas críticas. Se recomienda revisar los tramos concretos donde aparece severidad red, aumentando el margen de seguridad y ajustando el control de la derrota en esas zonas.

Figura 4-5: Recomendación principal generada automáticamente por el sistema evaluador a partir del análisis de las métricas de navegación del ejercicio.

4.1.2 Resultados en el entorno de Rota

4.1.2.1 Calificación excelente

En el ejercicio clasificado como excelente, el sistema asigna una puntuación de 100/100, reflejando un seguimiento perfecto del corredor de navegación. Durante el ejercicio se activaron 256 celdas, todas ellas dentro de la banda central del corredor, lo que supone una permanencia del 100 % en la zona óptima de navegación. No se registran desviaciones laterales ni salidas fuera del corredor evaluado, y tampoco aparecen activaciones en zonas de riesgo alto o crítico. Como consecuencia, tanto el índice global de severidad como el riesgo difuso presentan valores nulos, lo que indica una navegación completamente alineada con la derrota prevista. La desviación global respecto al eje es del 0 %, lo que evidencia un control lateral excelente y una trayectoria estable durante todo el ejercicio. Este comportamiento explica la puntuación máxima obtenida y confirma la coherencia del evaluador al identificar un patrón de navegación ideal.

La Figura 4-6 muestra la configuración espacial del entorno de evaluación utilizado en el escenario de navegación de Rota. El área analizada queda delimitada por un polígono negro que define el dominio espacial dentro del cual se realiza el cálculo de métricas y la evaluación de la trayectoria del buque. Dentro de este dominio se establecen diferentes zonas clasificadas según su nivel de severidad y su relación con el corredor de navegación previsto. (Fuente propia)

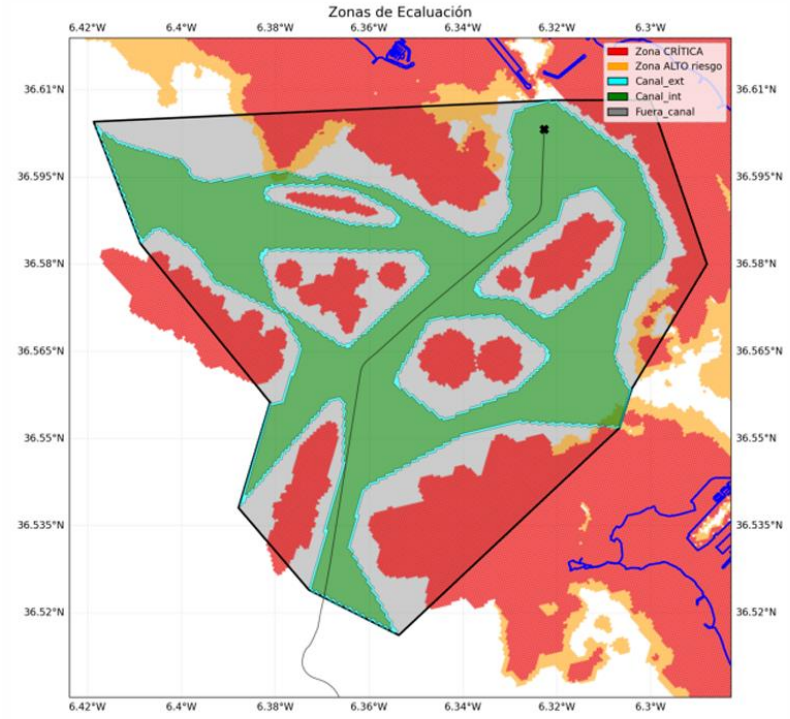


Figura 4-6: Zonas de evaluación definidas para el escenario de Rota, mostrando la delimitación del área analizada y la derrota seguida por el buque

4.1.2.2 Calificación adecuada

En el ejercicio clasificado como adecuado, el evaluador asigna una puntuación de 71,24/100. En este caso se registran 315 celdas activadas, de las cuales 261 corresponden a la banda central del corredor, lo que representa una permanencia del 82,86 % en la zona óptima de navegación. A pesar de este alto nivel de adherencia al eje de derrota, se detectan 38 celdas fuera del corredor evaluado (12,06 %), lo que genera una desviación global del 17,14 %. Estas salidas fuera del corredor constituyen el principal factor de penalización del ejercicio, ya que reflejan pérdidas puntuales de control lateral durante la navegación. Sin embargo, no se registran incursiones en zonas de riesgo alto o crítico, lo que mantiene el nivel de seguridad dentro de valores aceptables. El modelo calcula un índice global de severidad de 11,17/100 y un riesgo difuso de 32,25/100, valores que se combinan para estabilizar la evaluación final dentro de la categoría adecuada.

La Figura 4-7 muestra el bloque de recomendaciones automáticas generado por el sistema evaluador a partir del análisis de las métricas de la derrota. Este apartado del informe tiene como objetivo proporcionar una orientación clara sobre los aspectos del comportamiento de la navegación que deben corregirse para mejorar el nivel de seguridad del ejercicio. (Fuente propia)

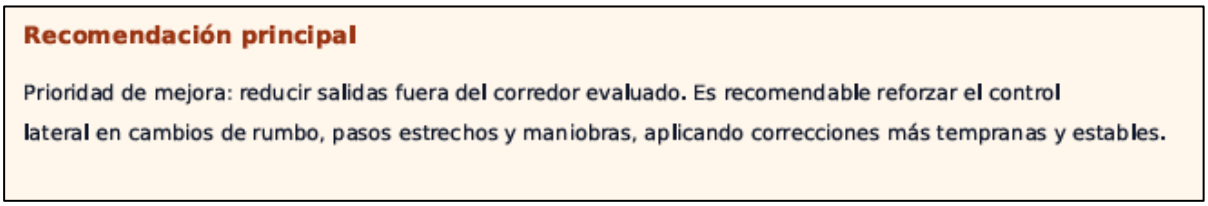


Figura 4-7: Recomendación principal generada automáticamente por el evaluador tras el análisis de la navegación en el escenario de Rota

4.1.2.3 Calificación mejorable

En el ejercicio clasificado como mejorable, la puntuación final desciende hasta 62,16/100, reflejando un aumento progresivo de las desviaciones laterales. En este caso se registran 242 celdas activadas, de las cuales 192 pertenecen a la banda central del corredor, lo que supone una permanencia del 79,34 % en la zona óptima de navegación. Aunque este valor sigue siendo relativamente elevado, se detectan 46 celdas fuera del corredor evaluado (19,01 %), lo que incrementa la desviación global hasta el 20,66 %. Este aumento de la navegación fuera del corredor reduce el margen de seguridad del ejercicio y constituye el principal factor de penalización. A pesar de ello, no se observan activaciones en zonas de riesgo alto o crítico, lo que indica que las desviaciones se producen dentro de áreas navegables, aunque alejadas del eje previsto. El evaluador estima un índice global de severidad de 15,7/100 y un riesgo difuso de 34,14/100, valores que reflejan un comportamiento aceptable pero que denota una falta de precisión valorable.

La Figura 4-8 presenta el comentario interpretativo generado automáticamente por el sistema evaluador a partir de las métricas calculadas durante el análisis de la derrota. Este bloque del informe transforma los indicadores cuantitativos obtenidos del análisis espacial en una explicación comprensible del comportamiento de la navegación durante el ejercicio. (Fuente propia)

Comentario automático

La evaluación clasifica la navegación como mejorable. Hay tramos correctos, pero la distribución espacial muestra desviaciones y/o exposición a zonas de mayor severidad que reducen el margen de seguridad. La permanencia en el centro de la derrota es muy alta, lo que indica un seguimiento muy preciso del corredor previsto. La desviación global respecto al centro de la derrota es elevada y constituye uno de los principales factores de penalización. No se registran zonas de riesgo alto o crítico, lo que refuerza la seguridad del trazado realizado. Se observan salidas significativas fuera del corredor evaluado, con influencia clara en la puntuación final. No se detectan incursiones en zonas de riesgo crítico, por lo que no se aplica ninguna limitación adicional por este motivo. El componente difuso estima un riesgo base de 34.14/100 y el índice global ponderado alcanza 15.70/100 combinándose ambos para estabilizar la evaluación y evitar sobrepenalizaciones por activaciones aisladas.

Figura 4-8: Comentario automático generado por el evaluador tras el análisis de la trayectoria en el ejercicio, donde se interpreta el comportamiento de la navegación

4.1.2.4 Calificación deficiente

En el ejercicio clasificado como deficiente, la puntuación final se reduce a 48,55/100, evidenciando una pérdida significativa de adherencia al corredor de navegación. En total se activan 188 celdas, de las cuales 100 corresponden a la banda central del corredor, lo que representa únicamente un 53,19 % de permanencia en la zona óptima de navegación. Además, se detectan 70 celdas fuera del corredor evaluado (37,23 %), lo que genera una desviación global del 46,81 % respecto al eje de la derrota. Este elevado porcentaje de navegación fuera del corredor constituye el principal factor de penalización del ejercicio. Aunque no se registran incursiones en zonas de riesgo alto o crítico, la frecuencia de salidas fuera del corredor indica un control lateral insuficiente de la trayectoria. El sistema calcula un índice global de severidad de 32,66/100 y un riesgo difuso de 45/100, lo que explica la degradación de la puntuación final dentro de la categoría deficiente.

La Figura 4-9 muestra la trayectoria seguida por el buque durante el ejercicio sobre el mapa de zonas de evaluación definidas para el escenario de Rota. El área analizada queda delimitada por el polígono negro, que establece el dominio espacial dentro del cual el sistema realiza el cálculo de métricas y la evaluación de la navegación. (Fuente propia)

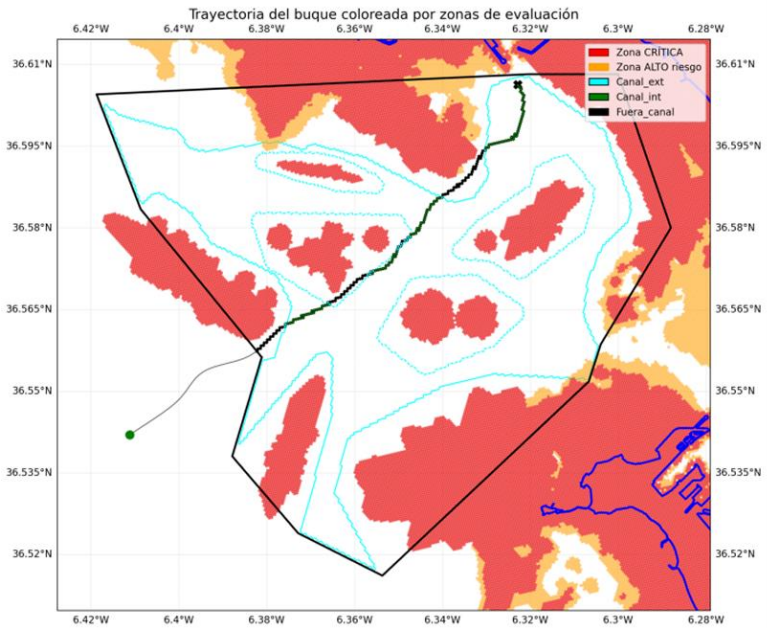


Figura 4-9: Trayectoria del buque durante el ejercicio en el escenario de Rota, representada sobre las zonas de evaluación utilizadas por el sistema

4.1.2.5 Calificación crítica

El ejercicio clasificado como Crítico representa el escenario de mayor degradación del comportamiento de la derrota. En este caso se registran 256 celdas activadas, con 129 en la banda central (50,39 %) y 104 celdas fuera del corredor evaluado (40,62 %), lo que genera una desviación global del 48,83 % respecto al eje de navegación. Además, el análisis detecta incursiones en zonas de riesgo crítico, aunque de extensión limitada, que tienen un impacto determinante en la evaluación. Debido a la presencia de estas celdas críticas, el evaluador aplica un límite máximo doctrinal que restringe la puntuación final a 20/100, independientemente del resto de indicadores. El sistema calcula un índice global de severidad de 35,74/100 y un riesgo difuso de 45/100, valores que reflejan una pérdida clara del control de la derrota y una exposición potencial a zonas de mayor severidad. La combinación de desviación lateral elevada y presencia de celdas críticas explica la clasificación final dentro de la categoría crítica.

La Figura 4-10 recoge el conjunto de indicadores espaciales calculados por el evaluador a partir del análisis de la trayectoria del buque durante el ejercicio. (Fuente propia)

Tabla resumen de métricas

Indicador	Valor	Interpretación
Total de celdas activadas	256	Base del análisis espacial de la derrota
Celdas interior (green)	129	Tránsito por la banda central del corredor previsto
Celdas medio (cyan)	21	Desviación lateral leve respecto al centro de la derrota
Celdas fuera (black)	104	Salida del corredor de navegación evaluado
Celdas riesgo alto (orange)	0	Presencia en zonas de riesgo elevado
Celdas riesgo crítico (red)	2	Presencia en zonas de máxima severidad
% interior (green)	50.39	Permanencia en la banda central del corredor
% medio (cyan)	8.2	Desviación lateral moderada
% fuera (black)	40.62	Pérdida del corredor previsto
% alto (orange)	0.0	Exposición a zonas de riesgo alto
% crítico (red)	0.78	Exposición a zonas de riesgo crítico
% desvío global	48.83	Porcentaje de navegación fuera del centro de la derrota
% riesgo (orange+red)	0.78	Porcentaje en zonas de riesgo alto o crítico
% fuera de la banda central	48.83	Porcentaje total fuera del centro de la derrota
Índice global (0-100)	35.74	Severidad agregada ponderada según el tipo de zona recorrida
Riesgo difuso (0-100)	45.0	Estimación difusa del riesgo antes de aplicar penalizaciones finales
Severidad máxima (0-100)	100.0	Peor nivel de severidad observado durante la navegación
Límite máximo por zonas críticas (0-100)	20.0	Puntuación máxima permitida por presencia de zonas críticas
Puntuación final de seguridad (0-100)	20.0	Puntuación final de la navegación (100 = mejor seguridad)
Categoría final	Crítica	Clasificación final de seguridad en la navegación

Figura 4-10: Tabla resumen de métricas generadas por el evaluador para el ejercicio analizado en el escenario de Rota

4.1.3 Síntesis del bloque de seguridad en la navegación

En conjunto, los resultados del bloque de seguridad en la navegación muestran una relación clara entre la puntuación final y tres factores principales: la permanencia en la zona central o interior del corredor, la magnitud de la desviación lateral acumulada y la presencia de celdas críticas. Los ejercicios mejor valorados presentan alta adherencia al eje y exposición mínima a zonas sensibles, mientras que los ejercicios peor valorados muestran una pérdida de control lateral sostenida o, en los casos más severos, incursiones en zonas críticas. Esta coherencia interna indica que el sistema responde de forma estable a diferencias reales de calidad en la ejecución de la derrota.

4.2 Resultados del evaluador automático de análisis de encuentros

El segundo bloque del sistema, centrado en los encuentros con contactos, también generó resultados diferenciados y consistentes entre escenarios. En este caso, la salida principal no es una puntuación sobre 100 de la derrota completa, sino una valoración de cada evento crítico y una media global final por ejercicio. Los informes generados incluyen, además, el número de eventos evaluados y la identificación de los mejores y peores casos, lo que facilita una lectura global del comportamiento del alumno frente al tráfico circundante.

Se analizarán cinco eventos característicos distintos procedentes del repositorio del trabajo para analizar los distintos criterios e información mostrada por el evaluador para establecer la evaluación final.

4.2.1 Análisis eventos característicos

4.2.1.1 Evento 1

El evento analizado corresponde a una interacción entre el buque propio y el contacto identificado con el MMSI 123450189 en el ejercicio dos de Ferrol, clasificado por el evaluador como una situación asociada a un buque fondeado. La representación de la trayectoria muestra cómo el buque propio se aproxima progresivamente al contacto durante su navegación a lo largo del canal, reduciendo de forma significativa la distancia entre ambos buques.

El análisis cinemático indica que durante el encuentro no se produce una maniobra de cambio de rumbo, ya que la variación neta de rumbo es nula. La única acción detectada por el sistema corresponde a una ligera reducción de velocidad, con una variación neta prácticamente despreciable (-0.02 nudos). Esta falta de maniobra lateral implica que el buque propio mantiene prácticamente la misma derrota durante toda la aproximación al contacto.

Como consecuencia de esta ausencia de maniobra efectiva, la distancia mínima alcanzada durante el encuentro desciende hasta aproximadamente 204 yardas, con una DCPA mínima de 191 yardas, valores claramente inferiores al rango de separación considerado seguro por el evaluador. Este comportamiento se refleja claramente en la evolución temporal de las distancias, donde se observa una reducción progresiva de la separación hasta situarse dentro de la zona crítica.

El análisis en coordenadas relativas confirma esta situación. En la representación radar, la trayectoria relativa del contacto atraviesa el interior del círculo de seguridad definido por el umbral RIPA, lo que indica que la aproximación entre buques alcanza niveles potencialmente peligrosos. Esta circunstancia se ve reforzada por el histograma radial de distancias, donde una parte significativa del tiempo del encuentro se desarrolla dentro de zonas inferiores al umbral de seguridad. La Figura 4-11 muestra el histograma radial de la representación del evento crítico detectado entre el buque propio y el contacto MMSI 123450189. (Fuente propia)

En particular, el evaluador detecta que la zona más cercana corresponde al intervalo del 40–50 % del umbral de seguridad, con una probabilidad aproximada del 22,3 %, lo que indica que durante una parte relevante del evento la separación entre buques fue inferior a la mitad de la distancia recomendada. Además, el sistema calcula que el 47,9 % del tiempo del encuentro se produce por debajo del umbral de seguridad, lo que evidencia una permanencia prolongada en condiciones de riesgo.

Debido a esta combinación de factores el sistema asigna al evento una calificación final de 0.0/10, clasificándolo como situación peligrosa. Esta evaluación refleja que el encuentro no se resolvió mediante una maniobra suficientemente temprana o efectiva para mantener una separación adecuada respecto al contacto.

Desde el punto de vista operativo, este caso representa un ejemplo claro de gestión inadecuada de un encuentro con un buque fondeado, donde la ausencia de una alteración significativa del rumbo impide incrementar la distancia lateral respecto al obstáculo. En este tipo de situaciones, las recomendaciones de buena práctica indican la necesidad de realizar una maniobra anticipada de desviación lateral, preferiblemente mediante un cambio de rumbo perceptible, que permita aumentar la separación entre buques y evitar la entrada en la zona crítica de aproximación.

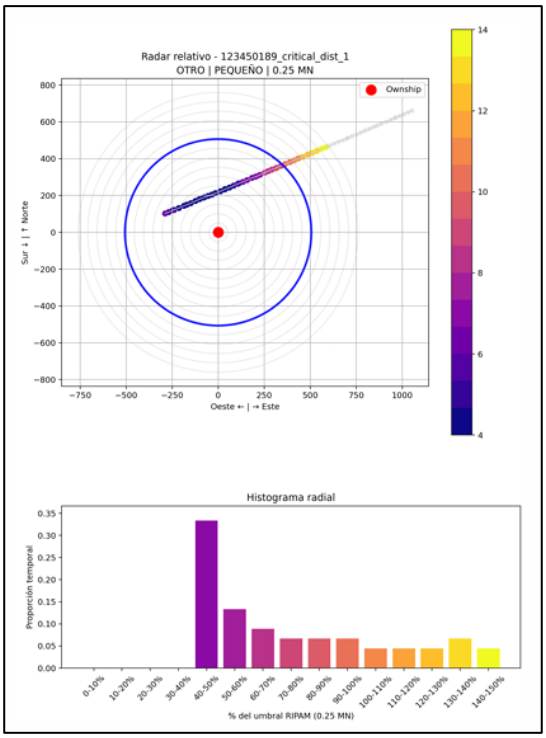


Figura 4-11: Representación radar relativa del evento crítico entre el buque propio y el contacto

4.2.1.2 Evento 2

El evento analizado corresponde a la interacción entre el buque propio y el contacto identificado con el MMSI 123450006 en el ejercicio uno de Ferrol, clasificado por el evaluador como una situación asociada a un buque fondeado. La representación de la trayectoria muestra cómo el buque propio modifica progresivamente su derrota durante la navegación con el objetivo de mantener una separación adecuada respecto al contacto.

El análisis cinemático indica que durante el encuentro se produce una maniobra significativa tanto de rumbo como de velocidad. En particular, el sistema detecta una alteración neta de rumbo de aproximadamente 20.6° a babor, lo que supone una desviación lateral clara respecto a la derrota inicial. Esta maniobra se acompaña además de un incremento notable de la velocidad, con una variación neta superior a 11 nudos, reflejando una acción activa por parte del buque propio para resolver la situación de encuentro.

Como resultado de esta maniobra, la distancia mínima entre ambos buques se mantiene en valores elevados, alcanzando aproximadamente 844 yardas, mientras que la distancia de aproximación mínima prevista (DCPA) se sitúa en torno a 345 yardas. El valor de la distancia mínima se encuentra dentro del rango considerado seguro por el evaluador para este tipo de interacción.

La representación radar relativa confirma este comportamiento. La trayectoria relativa del contacto se mantiene completamente fuera del círculo de seguridad definido por el umbral RIPA, lo que indica que en ningún momento del encuentro se alcanza una separación crítica entre buques. De forma coherente con esta observación, el histograma radial muestra que el 100 % del tiempo del evento se desarrolla por encima del umbral de seguridad. Además, el sistema no detecta penalizaciones adicionales, ya que no se observa una tendencia de DCPA decreciente.

En consecuencia, el evaluador asigna al evento una calificación final de 9.3 sobre 10, clasificándolo como situación segura. Este resultado refleja que el encuentro se ha gestionado de forma correcta, mediante una maniobra clara que permite mantener distancias holgadas respecto al contacto fondeado y evitar la entrada en la zona crítica de aproximación.

La Figura 4-12 muestra la tabla resumen de parámetros del evento crítico asociado al contacto MMSI 123450006, donde se recogen los principales indicadores utilizados por el evaluador para caracterizar el encuentro entre el buque propio y el contacto. (Fuente propia)

MMSI	**123450006**
RIPAM	FONDEADO
Dist mín (yd)	844.0
DCPA mín (yd)	344.7
Corte de proa al contacto	NQR
Maniobra total	Sí
Maniobra rumbo	Sí
Maniobra velocidad	Sí
Δ rumbo neto (°)	**-20.6 BABOR**
Δ rumbo BABOR (°)	40.0
Δ rumbo ESTRIBOR (°)	19.3
Δ velocidad neta (kn)	**11.24**
Δ aumento vel (kn)	12.25
Δ reducción vel (kn)	0.95
Tendencia velocidad	ACELERACION

Figura 4-12: Tabla resumen de parámetros cinemáticos del evento crítico

4.2.1.3 Evento 3

El evento analizado corresponde a la interacción entre el buque propio y el contacto identificado con el MMSI 123450093 en el ejercicio uno de Rota, clasificado por el evaluador como una situación de alcance. Este tipo de encuentro se produce cuando un buque se aproxima a otro desde una posición posterior, quedando obligado a maniobrar.

Desde el punto de vista cinemático, el sistema detecta una variación neta de rumbo de aproximadamente 15° hacia estribor, acompañada de pequeñas variaciones en la velocidad del buque propio. Aunque el sistema identifica incrementos y reducciones puntuales de velocidad durante el evento, la variación neta de velocidad es reducida (0.88 nudos), lo que indica que la resolución del encuentro se produce principalmente mediante una modificación de la derrota.

La distancia mínima alcanzada durante el encuentro se sitúa en torno a 762 yardas, que coincide con la distancia prevista DCPA. Ambos valores son claramente superiores al umbral de seguridad definido para este tipo de interacción. Esta separación indica que el encuentro se desarrolla en condiciones de seguridad entre ambos buques.

La representación radar relativa confirma esta interpretación. La trayectoria relativa del contacto se mantiene completamente fuera del círculo de seguridad asociado al umbral RIPA, lo que indica que en ningún momento del encuentro se alcanza una separación crítica entre buques.

La Figura 4-13 muestra la representación espacial y cinemática del evento crítico asociado al contacto MMSI 123450093 durante el desarrollo del encuentro. (Fuente propia)

Este comportamiento se refleja también en el histograma radial de distancias, donde el sistema indica que el 100 % del tiempo del evento se mantiene por encima del umbral de seguridad. En consecuencia, no se detecta permanencia en zonas críticas de proximidad.

Además, el evaluador no identifica penalizaciones relevantes, ya que no se produce un corte de proa durante el encuentro. Aunque se detecta una tendencia de DCPA decreciente, esta circunstancia no genera una penalización significativa debido a que las distancias se mantienen siempre dentro de los rangos considerados seguros.

Como resultado de este conjunto de indicadores, el sistema asigna al evento una calificación final de 9.0 sobre 10, clasificándolo como situación segura. Esta evaluación refleja que el encuentro se resolvió mediante una maniobra adecuada y manteniendo en todo momento una separación suficiente respecto al contacto.

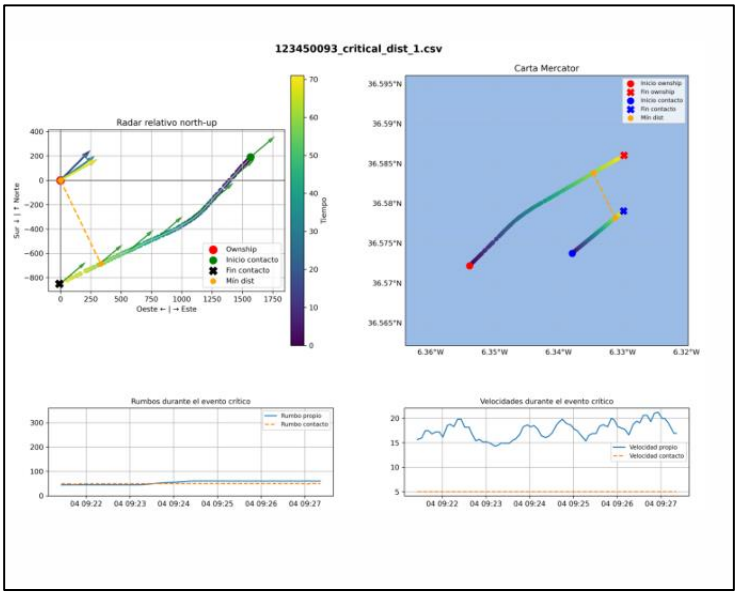


Figura 4-13: Representación espacial y cinemática del evento crítico

4.2.1.4 Evento 4

El evento analizado corresponde a la interacción entre el buque propio y el contacto identificado con el MMSI 123450098 en el ejercicio dos de Rota, clasificado por el evaluador como una situación de cruce babor con babor. Este tipo de encuentro se caracteriza por la convergencia de dos trayectorias con riesgo potencial de aproximación, por lo que el sistema evalúa la necesidad de realizar maniobras para mantener una separación segura.

El análisis de la trayectoria muestra que el buque propio realiza una modificación progresiva de su derrota hacia estribor, permitiendo aumentar la separación lateral respecto al contacto durante el desarrollo del encuentro. Esta maniobra se observa claramente en la evolución temporal del rumbo, donde el buque propio modifica su dirección mientras el contacto mantiene una trayectoria relativamente estable.

Desde el punto de vista cinemático, el evaluador detecta una variación neta de rumbo de aproximadamente 12.3° hacia estribor, acompañada de una variación de velocidad moderada. El sistema registra una variación neta de velocidad de aproximadamente 5.09 nudos, asociada a un incremento de velocidad durante el evento. La distancia mínima alcanzada durante el encuentro se sitúa en 724 yardas, mientras que la distancia de aproximación mínima prevista (DCPA) alcanza 203 yardas.

La representación radar relativa confirma este comportamiento. La trayectoria relativa del contacto se mantiene completamente fuera del círculo de seguridad definido por el umbral RIPA, lo que indica que en ningún momento del evento se alcanza una separación crítica entre buques.

El histograma radial de distancias muestra que el 100 % del tiempo del evento se desarrolla por encima del umbral de seguridad, lo que confirma que la separación entre ambos buques se mantiene holgada durante todo el encuentro.

Además, el evaluador no detecta penalizaciones adicionales, ya que no se produce corte de proa ni una tendencia de DCPA decreciente. En consecuencia, el sistema asigna al evento una calificación final de 10.0 sobre 10, clasificándolo como situación segura.

La Figura 4-14 presenta la trayectoria del buque propio y del contacto MMSI 123450098 durante el desarrollo del encuentro, junto con el análisis cinemático asociado al evento crítico detectado por el evaluador. En la parte inferior se muestran las comparativas de datos cinemáticos. (Fuente propia)

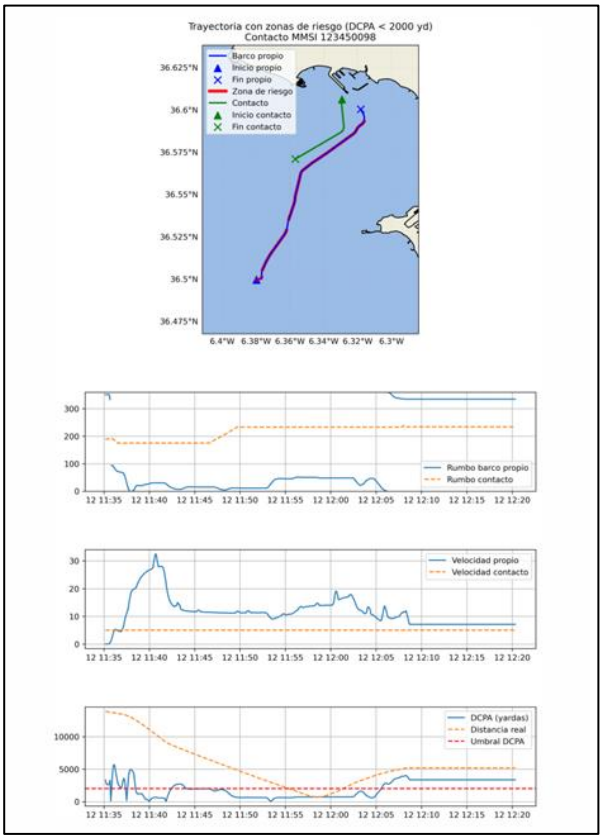


Figura 4-14: Trayectoria del buque propio durante el encuentro, junto con la evolución temporal de ambos buques

4.2.1.5 Evento 5

El evento analizado corresponde a la interacción entre el buque propio y el contacto identificado con el MMSI 123450164 en el ejercicio dos de Ferrol, clasificado por el evaluador como una situación de cruce estribor. Este tipo de encuentro implica la convergencia de trayectorias con posible riesgo de aproximación, por lo que resulta necesario evaluar la maniobra realizada por el buque propio para garantizar una separación segura.

El análisis de la trayectoria muestra que el buque propio realiza una modificación de rumbo hacia babor durante el encuentro, lo que se valora negativamente debido a la obligación de caída a estribor en esta situación.

Desde el punto de vista cinemático, el sistema detecta una variación neta de rumbo de aproximadamente 17.2° hacia babor, resultado de cambios parciales hacia ambas bandas. Esta maniobra se acompaña de una ligera reducción de velocidad, con una variación neta de 1.07 nudos, lo que indica una tendencia general de desaceleración durante el encuentro.

En términos de distancia, el sistema calcula una distancia mínima de aproximadamente 3772 yardas, mientras que la distancia de aproximación mínima prevista (DCPA) alcanza aproximadamente 25.4 yardas. Este valor reducido de DCPA refleja que, desde el punto de vista geométrico, las trayectorias presentan un alto grado de convergencia antes de que la maniobra modifique la situación relativa.

Aunque la separación final se mantiene fuera del círculo de seguridad definido por el umbral RIPA, el sistema detecta condiciones que incrementan el nivel de riesgo del evento.

En particular, el evaluador identifica dos penalizaciones relevantes: la presencia de DCPA decreciente y la detección de un corte de proa al contacto, indicadores que reflejan una geometría inicial desfavorable del encuentro. Estas circunstancias reducen la puntuación final del evento, que se clasifica como situación aceptable con una calificación de 7.7 sobre 10.

La Figura 4-15 muestra la representación espacial y cinemática del evento crítico asociado al contacto MMSI 123450164. Las cuatro gráficas muestran la información cinemática del encuentro entre ambos buques. (Fuente propia)

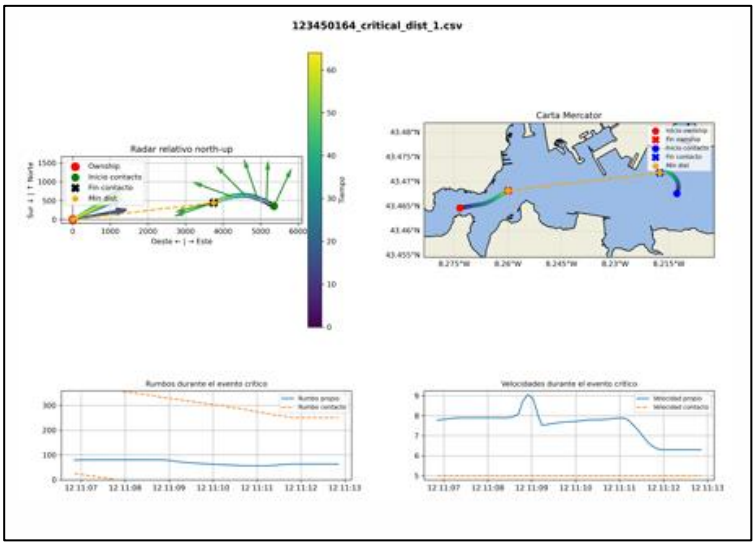


Figura 4-15: Representación espacial y cinemática del evento crítico

4.2.2 Resultados en Ferrol

Los dos informes de encuentros AIS correspondientes a Ferrol muestran resultados claramente diferenciados. En el primer ejercicio de Ferrol, el sistema evaluó 13 eventos, con una media global de 4,98/10 y una valoración final crítica. En este informe aparecen varios eventos con puntuaciones extremadamente bajas, incluyendo tres casos valorados con 0,00/10, mientras que los mejores eventos quedaron en el entorno de 8,93/10. El propio resumen final identifica esta dispersión como uno de los rasgos característicos del ejercicio, ya que conviven contactos razonablemente resueltos con otros claramente comprometidos.

En el segundo ejercicio de Ferrol, en cambio, el evaluador analizó 14 eventos y obtuvo una media global de 7,35/10, con una valoración final adecuada. Aunque siguen apareciendo algunos encuentros mal resueltos, con eventos de 0,00/10 y 0,74/10, el conjunto mejora de forma apreciable respecto al caso anterior y los mejores episodios alcanzan 10,00/10 y 9,30/10. Estos resultados indican que el sistema no solo detecta la gravedad de los peores encuentros, sino que también refleja cuándo la navegación mantiene un comportamiento global aceptable pese a la existencia de algunos eventos problemáticos.

4.2.3 Resultados en Rota

En Rota, los resultados del bloque AIS fueron notablemente más altos. El informe del primer ejercicio de Rota evaluó 6 eventos, con una media global de 9,09/10 y una valoración final excelente. El peor evento del conjunto quedó en 8,37/10 y varios contactos alcanzaron 9,30/10, lo que refleja una resolución muy homogénea y segura de los encuentros detectados.

De forma similar, el segundo ejercicio de Rota obtuvo una media global de 8,88/10, también con valoración final excelente, sobre un total de 5 eventos evaluados. En este caso, los peores eventos quedaron en 8,37/10 y el mejor alcanzó 10,00/10, manteniéndose una dispersión muy reducida y, por tanto, una consistencia elevada en la gestión de los contactos.

4.3 Resultado conjunto de ambos bloques de evaluación

Una de las aportaciones más relevantes del sistema aparece al analizar conjuntamente los resultados del bloque de derrota y del bloque de situaciones RIPA en los ejercicios completos disponibles. En el primer ejercicio de Ferrol, la evaluación de la derrota fue excelente, con 92,97/100, mientras que el análisis de encuentros obtuvo solo 4,98/10, con valoración crítica. En el segundo ejercicio de Ferrol, la seguridad de la navegación alcanzó 79,1/100 y el bloque de situaciones con contactos un 7,35/10, ambos ya en niveles aceptables. En el primer ejercicio de Rota, ambos módulos ofrecieron resultados altos y consistentes, con 85,62/100 en seguridad de derrota y 9,09/10 en encuentros. Sin embargo, en el segundo ejercicio de Rota se produjo una situación particularmente interesante: la derrota fue valorada como deficiente, con 48,4/100, mientras que el análisis de contactos alcanzó 8,88/10, es decir, una valoración excelente.

Este comportamiento conjunto muestra que ambos módulos del evaluador aportan información complementaria y no redundante. Un ejercicio puede seguir correctamente la derrota prevista y, aun así, presentar deficiencias relevantes en la gestión de encuentros, o, por el contrario, resolver adecuadamente las interacciones con otros buques mientras mantiene una adherencia deficiente al corredor de navegación. Desde el punto de vista de los resultados obtenidos, esta complementariedad constituye uno de los hallazgos más significativos del sistema desarrollado, ya que confirma que la seguridad de la navegación no puede reducirse a un único indicador global, sino que requiere una valoración diferenciada de la derrota seguida y de la interacción con el tráfico marítimo.

4.3.1 Evaluación conjunta

El análisis de los resultados obtenidos en los ejercicios completos permite observar que los dos módulos principales del evaluador aportan información claramente complementaria sobre el comportamiento del buque durante la navegación.

Como se ha mostrado en los ejercicios evaluados, pueden aparecer situaciones en las que uno de los módulos obtiene una valoración elevada mientras que el otro refleja deficiencias significativas. Por ejemplo, en el primer ejercicio de Ferrol la derrota seguida por el buque presenta una adherencia muy alta al corredor de navegación previsto, alcanzando una puntuación de 92,97/100, mientras que el análisis de encuentros con otros buques obtiene una valoración crítica de 4,98/10, debido a la presencia de aproximaciones potencialmente peligrosas. En contraste, en el segundo ejercicio de Rota se observa la situación opuesta: el comportamiento frente a otros buques alcanza una valoración muy elevada (8,88/10), mientras que la adherencia a la derrota resulta deficiente (48,4/100).

Estos resultados ponen de manifiesto que la seguridad de la navegación no puede evaluarse mediante un único indicador agregado, ya que el seguimiento correcto de la derrota no garantiza necesariamente una gestión adecuada del tráfico marítimo, del mismo modo que una resolución correcta de los encuentros no implica necesariamente que la navegación se mantenga dentro de los corredores seguros definidos para el ejercicio.

A partir de esta observación, se propone un criterio de evaluación conjunta basado en el principio de seguridad mínima. Bajo este enfoque, un ejercicio no puede considerarse globalmente seguro si cualquiera de los dos módulos presenta un comportamiento claramente deficiente. Se establece que:

- La evaluación de la derrota debe superar un umbral mínimo de 50/100.
- La evaluación de encuentros RIPA debe superar un umbral mínimo de 5/10.

Si alguno de estos dos indicadores se sitúa por debajo del umbral establecido, el ejercicio se considera no apto desde el punto de vista de la seguridad global, independientemente del resultado obtenido en el otro módulo. Este criterio refleja el hecho de que ambos aspectos representan condiciones necesarias para una navegación segura, por lo que el fallo en cualquiera de ellos invalida la evaluación global. La valoración asignada global será la mínima obtenida de los dos módulos.

Cuando ambos módulos superan los umbrales mínimos establecidos, la evaluación global se obtiene combinando ambas puntuaciones mediante una media ponderada, previa normalización de las escalas de puntuación. En este trabajo se propone una ponderación equilibrada entre ambos componentes:

$$S_{\text{global}} = 0.5 \cdot S_{\text{derrota}}^{(10)} + 0.5 \cdot S_{\text{RIPA}} \qquad \textbf{Ecuación 4-1}$$

Este enfoque permite reflejar adecuadamente la naturaleza multidimensional de la seguridad en la navegación simulada, integrando tanto el control geométrico de la derrota como la gestión dinámica de los encuentros con otros buques. De esta forma, la evaluación global resultante no depende exclusivamente de un único aspecto del comportamiento del navegante, sino que representa una síntesis equilibrada de ambos componentes fundamentales de la seguridad marítima.

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

5.1 Conclusiones del trabajo

A la vista del desarrollo realizado y de los resultados obtenidos, puede afirmarse que el trabajo ha cumplido de forma satisfactoria el propósito con el que fue planteado. El proyecto partía de una necesidad concreta: superar las limitaciones del evaluador existente en el SIMNAV y avanzar hacia una valoración más objetiva, consistente y útil desde el punto de vista formativo. La versión final desarrollada responde a esa necesidad mediante un sistema estructurado en dos bloques complementarios, apoyado en métricas cuantificables, criterios expertos y generación automática de informes interpretables.

5.1.1 Cumplimiento del objetivo general

El objetivo general del trabajo consistía en desarrollar para el Simulador de Navegación de la Escuela Naval Militar un sistema evaluador inteligente capaz de analizar de forma automática y objetiva la seguridad de las maniobras realizadas por los alumnos. Este objetivo se debía alcanzar aplicando criterios homogéneos basados en la experiencia de expertos, alineados con el RIPA y susceptibles de parametrización. Este objetivo puede considerarse alcanzado. La versión final del sistema no solo automatiza el análisis de la navegación, sino que además integra una lógica de evaluación coherente con la seguridad en la navegación, diferenciando entre la seguridad global de la derrota y la gestión de los encuentros con otros buques. De este modo, el trabajo culmina en una herramienta que aporta objetividad, trazabilidad y capacidad de adaptación, tres rasgos que constituían el núcleo del objetivo inicial.

5.1.2 Cumplimiento de los objetivos específicos

5.1.2.1 Procesamiento y estructuración de los datos de navegación.

El primer objetivo específico se orientaba a transformar los registros generados por el buque propio y por los contactos detectados mediante radar y AIS en una base de datos apta para el análisis automático. Este objetivo se ha cumplido, puesto que el trabajo desarrolla una cadena de procesamiento capaz de limpiar, normalizar, sincronizar y reorganizar la información de entrada para convertirla en una fuente válida de evaluación. La implementación se ha materializado a través del análisis en diferido sobre ejercicios ya ejecutados, pero la estructura conseguida constituye una base sólida para posibles desarrollos futuros próximos al tiempo real.

5.1.2.2 Identificación y caracterización de situaciones de encuentro

El sistema desarrollado permite detectar contactos relevantes, recortar temporalmente los episodios críticos y clasificarlos según su geometría relativa conforme al RIPA. Por tanto, el objetivo de identificar

y caracterizar situaciones de encuentro puede darse por alcanzado, ya que la versión final no se limita a localizar proximidades, sino que organiza cada episodio como una situación analizable desde el punto de vista normativo.

5.1.2.3 Implementación de métricas cuantitativas de seguridad

Se considera satisfactoriamente alcanzado el objetivo de incorporar métricas cuantitativas orientadas a objetivar la seguridad. En el bloque de encuentros se han empleado variables como la distancia relativa, la demora, la marcación, el DCPA, el TCPA, la permanencia en zonas radiales y la evolución temporal del riesgo. En el bloque de derrota se han utilizado indicadores espaciales asociados a la desviación lateral, la permanencia en el corredor y la exposición a zonas de distinta severidad. En conjunto, estas variables permiten pasar de una valoración intuitiva a una evaluación sustentada en magnitudes medibles.

5.1.2.4 Evaluación de la respuesta del alumno ante situaciones de riesgo

Otro objetivo consistía en valorar si la respuesta del alumno era oportuna y coherente en función del tipo de encuentro y del nivel de amenaza. La versión final alcanza este objetivo al no limitarse a medir la cercanía entre buques, sino al incorporar la lógica del encuentro, la necesidad de maniobra y la calidad de la respuesta ejecutada. De manera equivalente, en la evaluación de la derrota no se valora solo la trayectoria final, sino el modo en que el buque mantiene o pierde márgenes de seguridad durante la navegación.

5.1.2.5 Incorporación de criterios expertos y parametrizables

Este objetivo se ha conseguido de forma especialmente relevante. El trabajo no fija los parámetros del sistema de manera arbitraria, sino que los apoya en doctrina, normativa y en una encuesta orientada a recoger criterio experto. Además, los umbrales, pesos y reglas se plantean como elementos modificables. Ello convierte al evaluador en una herramienta adaptable a distintos escenarios, niveles de instrucción y enfoques docentes, sin necesidad de rediseñar por completo el modelo.

5.1.2.6 Diseño de un modelo de evaluación homogéneo y reproducible

La estructura final del sistema satisface también el objetivo de asegurar la equivalencia de criterios entre alumnos. La existencia de reglas explícitas, métricas definidas y procedimientos repetibles reduce de forma clara la dependencia del juicio puntual del instructor. La evaluación conjunta de ambos bloques evita que un buen resultado en una dimensión oculte una deficiencia grave en la otra, lo que refuerza la coherencia global del sistema y su valor como herramienta de calificación justa.

5.1.2.7 Generación de indicadores y resultados interpretables

Finalmente, se ha cumplido el objetivo de generar salidas útiles tanto para el instructor como para el alumno. La herramienta no produce únicamente una nota final, sino informes automáticos con figuras, tablas, comentarios interpretativos y recomendaciones de mejora. Esta capacidad convierte el evaluador en un sistema de apoyo al aprendizaje, ya que permite entender qué factores explican la valoración y qué aspectos deben corregirse en ejercicios posteriores.

5.1.3 Logros alcanzados de forma secundaria

Junto con el cumplimiento directo de los objetivos planteados al inicio, el trabajo ha generado una serie de logros adicionales que incrementan su valor académico y práctico. En primer lugar, se ha conseguido formalizar y trasladar al código un criterio experto que, en origen, estaba disperso entre doctrina, experiencia profesional y práctica docente. Esta traducción de experiencia a reglas explícitas constituye una aportación relevante por sí misma.

En segundo lugar, el trabajo ha separado en dos bloques la evaluación. Esta decisión no solo mejora la organización del desarrollo, sino que facilita la ampliación futura del sistema, su mantenimiento y la

interpretación de los resultados. La separación entre seguridad global de la derrota y análisis individual de encuentros aporta además una visión más rica del desempeño del alumno.

Otro logro secundario importante es la capacidad documental alcanzada. El sistema genera informes automáticos completos y, además, el proyecto ha quedado acompañado de un repositorio y de anexos que recogen ejemplos de resultados en los entornos de Ferrol y Rota. Esto aumenta la transparencia del trabajo, facilita su revisión y aporta una base ordenada para futuras validaciones o mejoras.

Asimismo, la aplicación del evaluador en dos escenarios distintos demuestra que el enfoque no está restringido a un único entorno de navegación. Aunque cada escenario exige ajustes y particularidades, el modelo desarrollado ha mostrado una capacidad real de adaptación a contextos diferentes, lo que refuerza la solidez de la propuesta.

Por último, el trabajo aporta un beneficio pedagógico. La evaluación deja de ser solo un mecanismo de calificación para convertirse en una herramienta de enseñanza y mejora continua. En ese sentido, uno de los logros más valiosos del proyecto es haber unido el plano técnico del procesamiento de datos con una finalidad claramente formativa.

5.1.4 Limitaciones del trabajo desarrollado

A pesar de los resultados obtenidos y del grado de desarrollo alcanzado, el sistema presentado debe entenderse como una primera implementación funcional de un evaluador inteligente aplicado al SIMNAV. Su principal fortaleza reside en haber transformado una evaluación tradicionalmente dependiente de criterios parciales y muy simplificados en un modelo estructurado, trazable y justificable.

Una limitación deriva de la dependencia del criterio experto utilizado para parametrizar el evaluador. Uno de los avances más relevantes del trabajo ha sido sustituir reglas excesivamente simples por criterios apoyados en la experiencia profesional y en variables más representativas del riesgo real. No obstante, esa ventaja implica también que una parte del comportamiento del sistema depende de los umbrales, ponderaciones y reglas establecidos a partir del cuestionario y del diseño metodológico adoptado. Esta limitación no reduce el valor del trabajo, pero sí obliga a entender que los resultados obtenidos están ligados a la configuración actual del sistema y que podrían requerir reajustes si se quisiera aplicar el evaluador a otros perfiles de alumnado, otros tipos de buque o criterios docentes diferentes.

También debe señalarse que el desarrollo realizado se encuentra estrechamente vinculado a dos escenarios concretos de trabajo, Ferrol y Rota, sobre los que se ha construido tanto la evaluación de la derrota como parte del modelado espacial del riesgo. En el bloque de seguridad en la navegación, el análisis depende de corredores definidos específicamente para cada entorno. Esto permite alcanzar una evaluación mucho más rica y contextualizada, pero al mismo tiempo reduce la portabilidad inmediata del sistema a nuevos entornos sin una fase previa de preparación cartográfica, definición de corredores y recalibración de criterios. Por tanto, el evaluador desarrollado es plenamente operativo en los escenarios estudiados, pero su extensión a otros puertos o zonas de navegación requeriría un trabajo adicional de modelado previo.

De forma complementaria, los bloques dependen directamente de la calidad de los datos obtenidos por el evaluador. La carencia de datos da lugar a una valoración desfavorable.

Por último, también puede considerarse una limitación el hecho de que la versión desarrollada está orientada al análisis del ejercicio y a la generación de retroalimentación estructurada una vez finalizada la navegación. En su estado actual, el evaluador aporta gran valor como sistema de análisis posterior y de apoyo al aprendizaje.

En conjunto, estas limitaciones no desvirtúan los resultados alcanzados, sino que sitúan correctamente el trabajo dentro de su alcance real. Debido a esto, el trabajo no solo ofrece una solución funcional, sino que deja preparado un marco claro sobre el que pueden desarrollarse mejoras futuras.

5.1.5 Valoración final de las conclusiones

En síntesis, el trabajo ha logrado desarrollar una versión final funcional y coherente del evaluador inteligente propuesto para el SIMNAV. El sistema cumple con los objetivos fundamentales de objetivar la evaluación, apoyarse en criterios homogéneos, integrar conocimiento experto, analizar la navegación desde dos perspectivas complementarias y producir resultados interpretables. Además, el proyecto ha generado logros adicionales de carácter metodológico, documental y pedagógico que refuerzan su utilidad. Por ello, puede concluirse que el evaluador no solo resuelve de forma satisfactoria el problema planteado al inicio, sino que establece una base sólida y bien estructurada para la evolución futura del evaluador dentro del ámbito docente de la Escuela Naval Militar.

5.2 Líneas futuras

5.2.1 Ampliación de la validación experimental del sistema

Una de las líneas futuras más directas del trabajo consiste en ampliar la validación experimental del evaluador mediante un conjunto de ejercicios notablemente mayor. En la versión desarrollada, el sistema ya ha demostrado su capacidad para analizar de forma automática la navegación realizada por el alumno y generar resultados coherentes con los objetivos planteados al inicio del proyecto. No obstante, una base de pruebas más amplia permitiría reforzar la robustez del modelo, comprobar su comportamiento ante situaciones más diversas y establecer umbrales, pesos y criterios más precisos. Esta ampliación permitiría además comparar de forma sistemática la salida del evaluador con la valoración emitida por distintos instructores, lo que contribuiría a medir con mayor rigor el grado de concordancia alcanzado entre el sistema automático y el juicio experto.

5.2.2 Extensión del evaluador a nuevos escenarios de navegación

Otra línea futura evidente consiste en extender el sistema a nuevos escenarios distintos de los ya desarrollados. El trabajo actual ha demostrado la viabilidad del enfoque en entornos concretos, incorporando para ello el tratamiento de datos de navegación, la definición de criterios de seguridad y la construcción de reglas adaptadas al contexto del ejercicio. Sin embargo, para que el evaluador pueda alcanzar una utilidad más amplia dentro del SIMNAV, sería conveniente desarrollar una metodología de despliegue que facilite su adaptación a nuevos puertos, nuevas derrotas y diferentes configuraciones de navegación. Especialmente otras bases navales de la Armada, como es el caso de Cartagena y Las Palmas. Esta ampliación permitiría que la herramienta no quedase vinculada únicamente a los escenarios inicialmente modelados, sino que pudiera emplearse progresivamente en un abanico más amplio de ejercicios prácticos.

5.2.3 Desarrollo de una parametrización más accesible para el instructor

Dado que uno de los objetivos fundamentales del trabajo ha sido construir un evaluador basado en criterios homogéneos y configurables, una evolución especialmente útil sería desarrollar una capa de parametrización más accesible para el instructor. En la versión actual, el sistema ya ha sido concebido para admitir ajustes en umbrales, ponderaciones y reglas de evaluación, con el fin de adaptarse a distintos niveles de exigencia formativa. Como prolongación natural de esta idea, en el futuro podría diseñarse una interfaz o módulo de configuración que permitiera modificar de forma sencilla dichos parámetros sin necesidad de intervenir directamente sobre el código. Ello facilitaría la adaptación del evaluador a distintos perfiles de alumnado, tipos de buque, niveles de instrucción o criterios docentes, reforzando además el carácter flexible y reutilizable del sistema.

5.2.4 Integración formal de ambos bloques en una evaluación global

El desarrollo realizado ha permitido construir dos bloques de evaluación complementarios. Esta división ha resultado adecuada desde el punto de vista metodológico, ya que permite estudiar por separado dos dimensiones fundamentales de la seguridad en la navegación. Sin embargo, una línea futura especialmente relevante consistiría en avanzar hacia una estrategia formal de evaluación conjunta que

integrase ambos bloques dentro de una valoración global única. De este modo, el sistema podría ofrecer no solo resultados parciales e interpretables, sino también una calificación final del ejercicio basada en una combinación estructurada de ambos componentes. Esta integración reforzaría el equilibrio entre la correcta conducción de la derrota y la adecuada resolución de las situaciones de tráfico.

5.2.5 Evolución hacia la evaluación en tiempo real

Entre los objetivos específicos del trabajo se planteó que los datos de navegación pudieran emplearse en análisis automático en tiempo real o diferido. Aunque el desarrollo actual se ha orientado principalmente hacia la evaluación posterior del ejercicio y la generación automática de informes, una evolución futura natural sería aproximar el sistema a un funcionamiento en tiempo real. Esto permitiría incorporar indicadores instantáneos de degradación de la seguridad, alertas para el instructor o mecanismos de supervisión continua durante la ejecución del ejercicio. Una capacidad de este tipo tendría un valor especialmente alto en escenarios con múltiples cabinas o tráfico intenso, donde la observación permanente del instructor resulta más difícil. De este modo, el evaluador no solo serviría para analizar lo ya ocurrido, sino también para reforzar la supervisión del ejercicio mientras se desarrolla.

5.2.6 Explotación pedagógica avanzada de los resultados generados

Otra línea futura de gran interés consiste en profundizar en la dimensión pedagógica del sistema. Desde su planteamiento inicial, el trabajo no ha buscado únicamente automatizar una calificación, sino también generar resultados interpretables y útiles para el aprendizaje del alumno. En esta línea, una evolución futura podría consistir en desarrollar herramientas adicionales de explotación de resultados, como historiales individuales de rendimiento, comparativas entre ejercicios sucesivos, detección automática de patrones recurrentes de error o paneles de seguimiento del progreso del alumnado. Con ello, el evaluador dejaría de ser únicamente un instrumento de valoración de un ejercicio concreto para convertirse también en una herramienta de apoyo docente a medio plazo, orientada a la mejora continua y al seguimiento del aprendizaje basado en evidencias.

5.2.7 Desarrollo de un asistente inteligente basado en LLM con arquitectura RAG

Una línea futura particularmente interesante sería el desarrollo de un asistente inteligente basado en modelos de lenguaje de gran tamaño (LLM) apoyados en una arquitectura RAG (*Retrieval-Augmented Generation*). Esta evolución encaja de forma natural con el enfoque del trabajo, ya que el sistema desarrollado genera métricas, informes, comentarios interpretativos y evidencias estructuradas que podrían constituir una base documental muy valiosa para un asistente conversacional orientado al apoyo docente. En este planteamiento, el evaluador automático seguiría siendo el núcleo objetivo y determinista encargado de calcular métricas y emitir valoraciones cuantificables, mientras que el LLM actuaría como una capa superior de consulta, explicación e interacción.

La principal ventaja de este enfoque sería su capacidad para ofrecer respuestas contextualizadas a partir de fuentes controladas, tales como la normativa RIPA, los criterios doctrinales establecidos, los informes históricos generados por el sistema, los resultados de ejercicios previos o incluso documentación interna del simulador. De este modo, el instructor podría consultar por qué un ejercicio ha sido valorado de una determinada manera, qué errores se repiten con mayor frecuencia o qué diferencias existen respecto a ejercicios anteriores similares. Del mismo modo, el alumno podría recibir explicaciones más accesibles sobre los motivos de su calificación, recomendaciones de mejora adaptadas a su caso o aclaraciones concretas sobre las maniobras realizadas durante el ejercicio.

La incorporación de una arquitectura RAG resulta especialmente adecuada en este contexto porque reduce la dependencia de conocimiento genérico del modelo y obliga a fundamentar las respuestas en documentos previamente seleccionados. Esto supondría una mejora en la fiabilidad y en la coherencia. En consecuencia, esta línea de desarrollo podría aportar un valor muy alto desde el punto de vista docente.

6 BIBLIOGRAFÍA

[1] «Revista General de Marina, 280/5, Junio 2021». Accedido: 6 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: https://armada.defensa.gob.es/archivo/rgm/2021/06/rgmjun2021cap04.pdf

[2] «International Convention on Standards of Training, Certification and Watchkeeping for Seafarers, 1978». Accedido: 26 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.imo.org/en/ourwork/humanelement/pages/stcw-convention.aspx

[3] J. Ernstsen y S. Nazir, «Performance assessment in full-scale simulators – A case of maritime pilotage operations», *Safety Science*, vol. 129, p. 104775, sep. 2020, doi: 10.1016/j.ssci.2020.104775.

[4] T. Kim *et al.*, «The continuum of simulator-based maritime training and education», *WMU Journal of Maritime Affairs*, vol. 20, n.º 2, pp. 135-150, 2021, doi: 10.1007/s13437-021-00242-2.

[5] «Simuladores». Accedido: 10 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: https://scrin.uca.es/simuladores/

[6] A. Palacios, «El histórico álbum del ingreso de la Princesa Leonor en la Escuela Naval Militar», El Debate. Accedido: 26 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.eldebate.com/espana/defensa/20240829/historico-album-ingreso-princesa-leonor-escuela-naval-militar_223392.html

[7] «Centro de Simulación». Accedido: 26 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.escuelanaval.edu.uy/index.php/institucion2/simulador

[8] MC, «Leonor navega en realidad virtual: nueva herramienta de entrenamiento naval», Monarquía Confidencial. Accedido: 26 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.elconfidencialdigital.com/monarquia/articulo/espana/leonor-navega-realidad-virtual-nueva-herramienta-entrenamiento-naval/20241104124621131406.html

[9] S. R. Pontevedra, «La vida naval de Leonor: en pie a las 6.45, natación, remo y navegar con gafas de realidad virtual antes de embarcarse», El País. Accedido: 26 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: https://elpais.com/espana/2024-08-29/la-vida-naval-de-leonor-en-pie-a-las-645-natacion-remo-y-navegar-con-gafas-de-realidad-virtual-antes-de-embarcarse.html

[10] «Bridge Integration and Targeted HM&E Systems (PMS 443)». Accedido: 26 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.navsea.navy.mil/Home/Team-Ships/NAVSEA-21/Bridge-Integration-and-Targeted-HME-Systems/

[11] «Surface Warfare Officers School Command: Home - NETC». Accedido: 26 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.netc.navy.mil/SWOS/

[12] «Using simulation tools for operational readiness in maritime and littoral operations», Engineer Research and Development Center. Accedido: 26 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.erdc.usace.army.mil/Media/News-Stories/Article/2663349/using-simulation-tools-for-operational-readiness-in-maritime-and-littoral-opera/

[13] le marin, «Focus | Le simulateur, outil indispensable pour la formation dans la Marine nationale», Le marin. Accedido: 26 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: https://lemarin.ouest-france.fr/defense/focus-le-simulateur-outil-indispensable-pour-la-formation-dans-la-marine-nationale-4866f60f-2c96-4091-aaa0-877e7d73e3e2

[14] «International Convention on Standards of Training, Certification and Watchkeeping for Seafarers, 1978». Accedido: 26 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.imo.org/en/ourwork/humanelement/pages/stcw-convention.aspx

[15] E. says, «The Role of Simulation in Modern Maritime Education – Maritime Education». Accedido: 26 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: https://maritimeducation.com/the-role-of-simulation-in-modern-maritime-education-%e2%9a%93/

[16] «Simulation». Accedido: 26 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.kongsberg.com/maritime/products/simulation/

[17] «VSTEP's Nautis Desktop Simulation Trainer», MarineLink. Accedido: 26 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.marinelink.com/news/simulation-desktop350869

[18] J. Gleeson, M. Dunbabin, y J. J. Ford, «COLREG Scenario classification and Compliance Evaluation with temporal and multi-vessel awareness for collision avoidance systems», *Ocean Engineering*, vol. 313, p. 119552, dic. 2024, doi: 10.1016/j.oceaneng.2024.119552.

[19] R. Jassal, «Here is What a brilliant Passage plan on ECDIS Looks Like - MySeaTime». Accedido: 26 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.myseatime.com/blog/detail/ecdis-passage-plan

[20] Q. He, Z. Hou, y X. Zhu, «A Novel Algorithm for Ship Route Planning Considering Motion Characteristics and ENC Vector Maps», *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 11, n.º 6, p. 1102, jun. 2023, doi: 10.3390/jmse11061102.

[21] Q. Wang, M. Zhong, G. Shi, J. Zhao, y B. Chunjiang, «Route Planning and Tracking for Ships Based on the ECDIS Platform», *IEEE Access*, vol. PP, pp. 1-1, may 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3078899.

[22] A. C. Wiig, C. Sellberg, y M. Solberg, «Reviewing simulator-based training and assessment in maritime education: a topic modelling approach for tracing conceptual developments», *WMU J Marit Affairs*, vol. 22, n.º 2, pp. 143-164, jun. 2023, doi: 10.1007/s13437-023-00307-4.

[23] K. Cheng, W. Li, Y. Zhou, G. Shi, y X. Wang, «A novel fuzzy comprehensive evaluation method for ship collision risk», *Ocean Engineering*, vol. 332, p. 121462, jul. 2025, doi: 10.1016/j.oceaneng.2025.121462.

[24] D. T. Nguyen, M. Trodahl, T. A. Pedersen, y A. Bakdi, «Verification of collision avoidance algorithms in open sea and full visibility using fuzzy logic», *Ocean Engineering*, vol. 280, p. 114455, jul. 2023, doi: 10.1016/j.oceaneng.2023.114455.

[25] «Microsoft Word - 7.3 Difusos.doc». Accedido: 7 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: http://www.lcc.uma.es/%7Eeva/aic/apuntes/fuzzy.pdf

[26] C. N. de I. Geográfica, «Centro de Descargas del CNIG (IGN)», Centro de Descargas del CNIG. Accedido: 26 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: http://centrodedescargas.cnig.es

[27] Rodrigo García Gregori, *rodrigogargre-del/TFG--INFORMES*. (10 de marzo de 2026). Accedido: 26 de marzo de 2026. [En línea]. Disponible en: https://github.com/rodrigogargre-del/TFG--INFORMES

ANEXO I: IMPLICACIONES SOCIALES, Y/O ECONÓMICAS, Y/O AMBIENTALES

El presente trabajo centrado en el desarrollo de un evaluador inteligente para el Simulador de Navegación de la Escuela Naval Militar (SIMNAV), presenta implicaciones relevantes en los ámbitos de la seguridad, el impacto social, la eficiencia económica y, de forma indirecta, la protección ambiental. Aunque se trata de un desarrollo tecnológico aplicado a un entorno formativo, sus efectos trascienden el plano académico, ya que contribuye a mejorar la preparación de los futuros oficiales de la Armada, incidiendo sobre la seguridad de las operaciones marítimas.

Desde el punto de vista social y formativo, el sistema propuesto aporta una mejora clara en la calidad del proceso de enseñanza. La automatización parcial de la evaluación reduce la dependencia exclusiva del juicio subjetivo del instructor y favorece una mayor equidad entre alumnos, al aplicar criterios homogéneos, reproducibles y justificables. Asimismo, la generación de informes automáticos, interpretables y orientados a la mejora convierte cada ejercicio en una oportunidad de aprendizaje más completa, ya que el alumno no recibe únicamente una calificación final, sino también una explicación estructurada de los factores que han condicionado su resultado. Esto fortalece la autoevaluación, la reflexión crítica y la mejora continua, aspectos de gran valor social en la formación de profesionales que deberán asumir en el futuro responsabilidades relevantes sobre la seguridad de las dotaciones y de la navegación.

En el plano económico, el trabajo también presenta implicaciones significativas. La simulación permite concentrar entrenamiento complejo en entornos controlados, reduciendo la necesidad de recurrir de forma continua a medios reales, cuyo empleo implica mayores costes materiales, logísticos y de personal. A ello se suma que la existencia de herramientas automáticas de apoyo a la evaluación puede optimizar el tiempo del instructor, facilitar el análisis de un mayor número de ejercicios y mejorar la escalabilidad del sistema docente. Del mismo modo, la propia memoria recoge que la implantación y explotación de simuladores exige considerar costes de inversión, mantenimiento, licencias, soporte técnico e infraestructura, por lo que el desarrollo de soluciones que incrementen el aprovechamiento pedagógico de estos sistemas contribuye a mejorar su rentabilidad y utilidad institucional.

En cuanto a las implicaciones ambientales, aunque no constituyen el eje central del trabajo, sí existe una relación indirecta pero relevante. El empleo del simulador como fase previa al adiestramiento en lanchas de instrucción permite que una parte importante del aprendizaje inicial, de la corrección de errores y de la familiarización con maniobras y situaciones de navegación se realice en el entorno virtual, reduciendo la necesidad de ejecutar repetidamente estas actividades en medios reales. Esto tiene una repercusión positiva desde el punto de vista ambiental, ya que disminuye el consumo de combustible, las emisiones asociadas y la huella contaminante derivada del uso de las lanchas de instrucción. Además, una formación más eficaz en simulación contribuye potencialmente a reducir errores operativos en navegación real que podrían llegar a ocasionar incidentes con impacto sobre el medio marino. Por tanto, aun no siendo un trabajo específicamente orientado a la sostenibilidad, sí puede afirmarse que favorece indirectamente una formación más eficiente y con menor impacto ambiental.

ANEXO II: REFLEXIONES ÉTICAS Y SOCIALES

El desarrollo de un evaluador inteligente aplicado al Simulador de Navegación de la Escuela Naval Militar plantea una reflexión ética y social relevante, especialmente en relación con la objetividad de la evaluación, la responsabilidad en la toma de decisiones formativas y el impacto que este tipo de herramientas puede tener sobre la preparación de los futuros oficiales de la Armada. Aunque el trabajo se sitúa en un marco técnico y docente, sus implicaciones exceden el plano puramente instrumental, ya que inciden directamente en la manera en que se valora el desempeño humano en contextos vinculados con la seguridad.

Desde un punto de vista ético, una de las principales aportaciones del sistema es su capacidad para reducir parte de la subjetividad inherente a la evaluación basada exclusivamente en la observación del instructor. La aplicación de métricas cuantitativas, criterios homogéneos y reglas explícitas favorece una evaluación más trazable, justificable y equitativa entre alumnos. Esto supone una mejora ética importante, ya que contribuye a disminuir sesgos, inconsistencias y diferencias de criterio entre evaluaciones de ejercicios similares. En términos sociales y académicos, ello refuerza la percepción de justicia del proceso evaluador y mejora la confianza del alumno en la validez de la calificación obtenida.

No obstante, esta misma automatización exige cautela. Desde una perspectiva ética, no sería adecuado considerar que un sistema automático puede sustituir plenamente el juicio profesional del instructor. La navegación es una actividad compleja en la que intervienen factores contextuales, cualitativos y humanos que no siempre pueden ser recogidos de forma completa mediante indicadores numéricos. Aspectos como la gestión del estrés, la comunicación en el puente, la capacidad de liderazgo o la interpretación prudente de una situación concreta siguen requiriendo supervisión humana. Por ello, la utilización del evaluador debe entenderse como una herramienta de apoyo a la docencia y no como un mecanismo autónomo e incuestionable de decisión.

Otra cuestión ética relevante es la transparencia del sistema. Para que una evaluación automatizada resulte legítima en el ámbito formativo, el alumno debe poder comprender qué se le evalúa, con qué criterios y por qué ha obtenido un determinado resultado. En este sentido, la generación de informes interpretables y orientados a la retroalimentación constituye un elemento especialmente positivo del trabajo desarrollado. Éticamente, no basta con calificar; es necesario que la herramienta contribuya al aprendizaje, a la corrección de errores y a la mejora progresiva del alumno.

En el plano social, el trabajo presenta una aportación positiva al contribuir a una formación más sólida, homogénea y segura de los futuros oficiales. Un sistema que mejora la calidad del aprendizaje refuerza la reflexión crítica y ayuda a consolidar decisiones correctas en navegación. Este hecho no solo beneficia al alumno individualmente, sino también a la institución y, en último término, a la seguridad de las operaciones marítimas en las que esos profesionales participarán en el futuro. La dimensión social del proyecto radica, por tanto, en que una mejor evaluación formativa puede traducirse en una mejor preparación profesional y en una mayor responsabilidad operativa.

Por todo ello, la principal reflexión ética y social derivada de este trabajo es que la automatización de la evaluación solo resulta deseable cuando se orienta al servicio de una formación más justa, transparente y útil, sin desplazar el criterio experto del instructor ni reducir la complejidad del comportamiento humano a una simple nota numérica. En consecuencia, el valor del sistema propuesto no debe medirse únicamente por su capacidad para calificar automáticamente, sino por su contribución a una enseñanza más rigurosa, explicable y responsable.

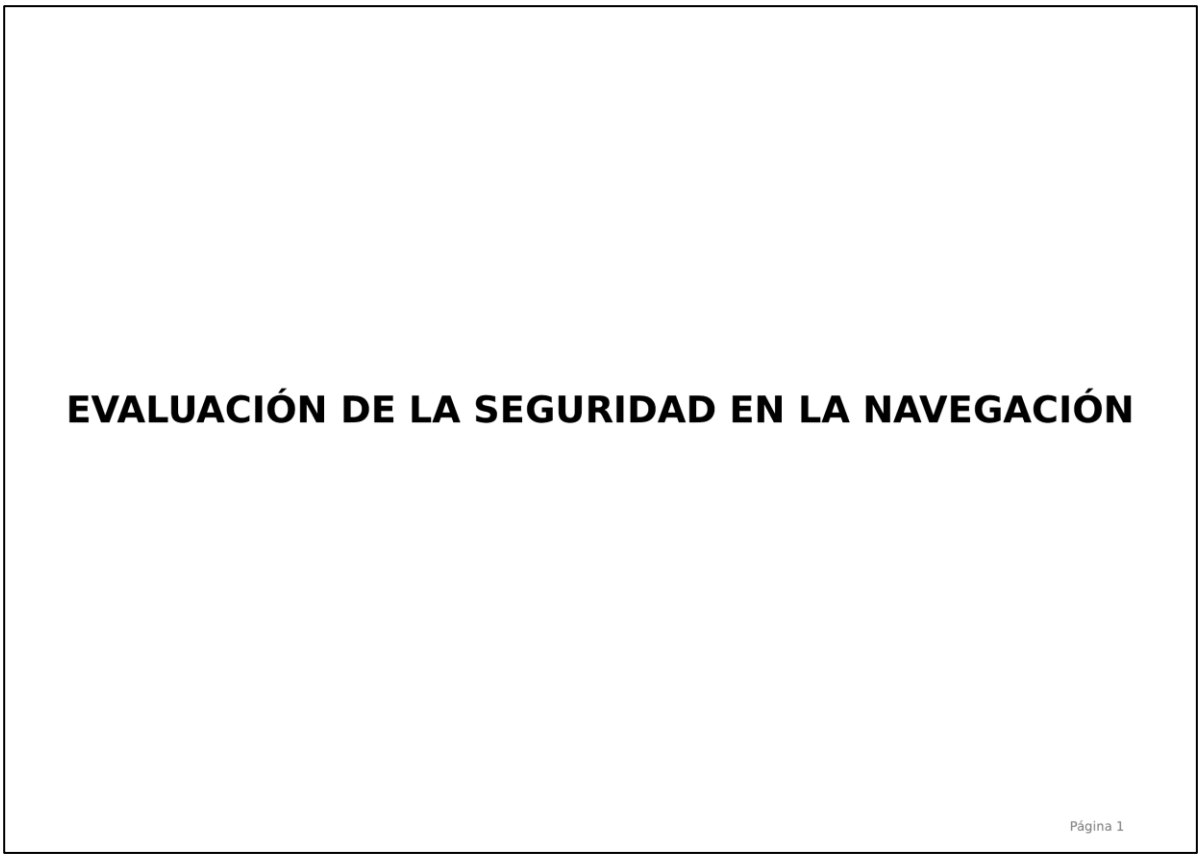
ANEXO III: INFORMES DE EVALUACIÓN

Con el objetivo de complementar el contenido presentado en esta memoria, se ha creado un repositorio que reúne los principales materiales generados durante el desarrollo del proyecto. En él se incluyen los informes de evaluación generados automáticamente por el sistema para los distintos ejercicios realizados en los entornos de Ferrol y Rota, así como los bloques de código desarrollados para la evaluación de la seguridad en la navegación y la evaluación de los eventos generados debido a los contactos.

Asimismo, el repositorio incorpora una selección de ejercicios representativos analizados de forma conjunta con el fin de ilustrar el funcionamiento completo del sistema evaluador. Con el propósito de facilitar la comprensión del formato y contenido de los informes generados, se adjuntan en el presente anexo dos ejemplos completos correspondientes a dos ejercicios realizados en el simulador. Uno de ellos en el entorno de Rota y el otro en el entorno de Ferrol.

Anexo III.A Ejercicio realizado en el entorno de Rota

Seguridad en la navegación



EVALUACIÓN DE LA SEGURIDAD EN LA NAVEGACIÓN

Informe automático de evaluación y feedback del ejercicio

Ejercicio: Ejercicio Rota

Fecha: 2026-03-13 10:35

Score (0-100)

48.4

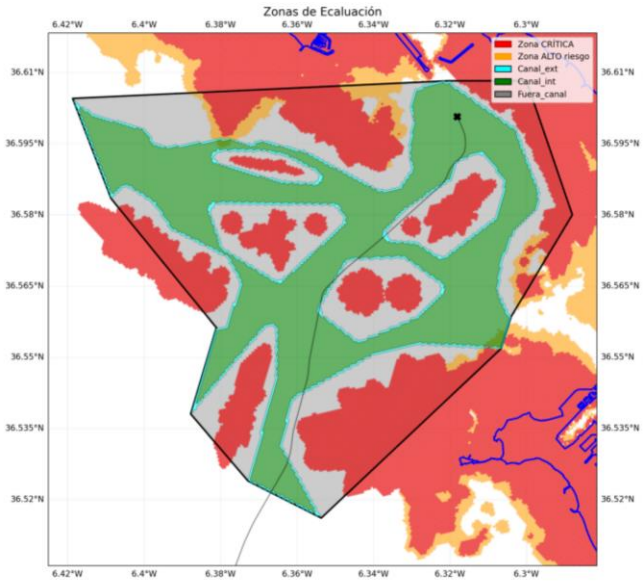
Categoría

Deficiente

Este informe se genera automáticamente al finalizar el ejercicio.

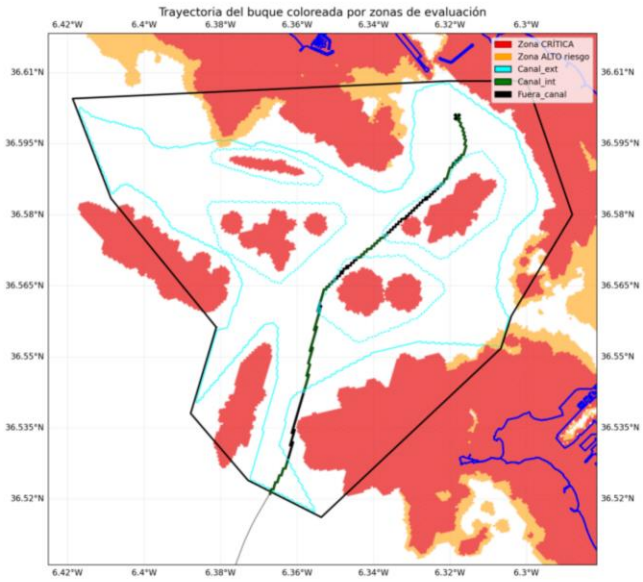
Evidencia 1

Mapa general: trayectoria y zonas de riesgo (Rota).



Evidencia 2

Detalle adicional del ejercicio (Rota).



Ejercicio Rota | 2026-03-13 10:35

Página 4

Interpretación automática (1/2)

Comentario automático

La evaluación clasifica la navegación como deficiente. La derrota presenta desviación lateral y/o exposición a zonas de riesgo con impacto relevante en la seguridad global. La permanencia en el centro de la derrota no domina la navegación, lo que sugiere un seguimiento insuficiente del corredor principal. La desviación global respecto al centro de la derrota es elevada y constituye uno de los principales factores de penalización. No se registran zonas de riesgo alto o crítico, lo que refuerza la seguridad del trazado realizado. Se observan salidas significativas fuera del corredor evaluado, con influencia clara en la puntuación final. No se detectan incursiones en zonas de riesgo crítico, por lo que no se aplica ninguna limitación adicional por este motivo. El componente difuso estima un riesgo base de 45.00/100 y el índice global ponderado alcanza 32.90/100 combinándose ambos para estabilizar la evaluación y evitar sobrepenalizaciones por activaciones aisladas.

Ejercicio Rota | 2026-03-13 10:35

Página 5

Interpretación automática (2/2)

Recomendación principal

Prioridad de mejora: reducir salidas fuera del corredor evaluado. Es recomendable reforzar el control lateral en cambios de rumbo, pasos estrechos y maniobras, aplicando correcciones más tempranas y estables.

Tabla resumen de métricas

Indicador	Valor	Interpretación
Total de celdas activadas	241	Base del análisis espacial de la derrota
Celdas interior (green)	125	Tránsito por la banda central del corredor previsto
Celdas medio (cyan)	27	Desviación lateral leve respecto al centro de la derrota
Celdas fuera (black)	89	Salida del corredor de navegación evaluado
Celdas riesgo alto (orange)	0	Presencia en zonas de riesgo elevado
Celdas riesgo crítico (red)	0	Presencia en zonas de máxima severidad
% interior (green)	51.87	Permanencia en la banda central del corredor
% medio (cyan)	11.2	Desviación lateral moderada
% fuera (black)	36.93	Pérdida del corredor previsto
% alto (orange)	0.0	Exposición a zonas de riesgo alto
% crítico (red)	0.0	Exposición a zonas de riesgo crítico
% desvío global	48.13	Porcentaje de navegación fuera del centro de la derrota
% riesgo (orange+red)	0.0	Porcentaje en zonas de riesgo alto o crítico
% fuera de la banda central	48.13	Porcentaje total fuera del centro de la derrota
Índice global (0-100)	32.9	Severidad agregada ponderada según el tipo de zona recorrida
Riesgo difuso (0-100)	45.0	Estimación difusa del riesgo antes de aplicar penalizaciones finales
Severidad máxima (0-100)	70.0	Peor nivel de severidad observado durante la navegación
Puntuación final de seguridad (0-100)	48.44	Puntuación final de la navegación (100 = mejor seguridad)
Categoría final	Deficiente	Clasificación final de seguridad en la navegación

Situaciones RIPA

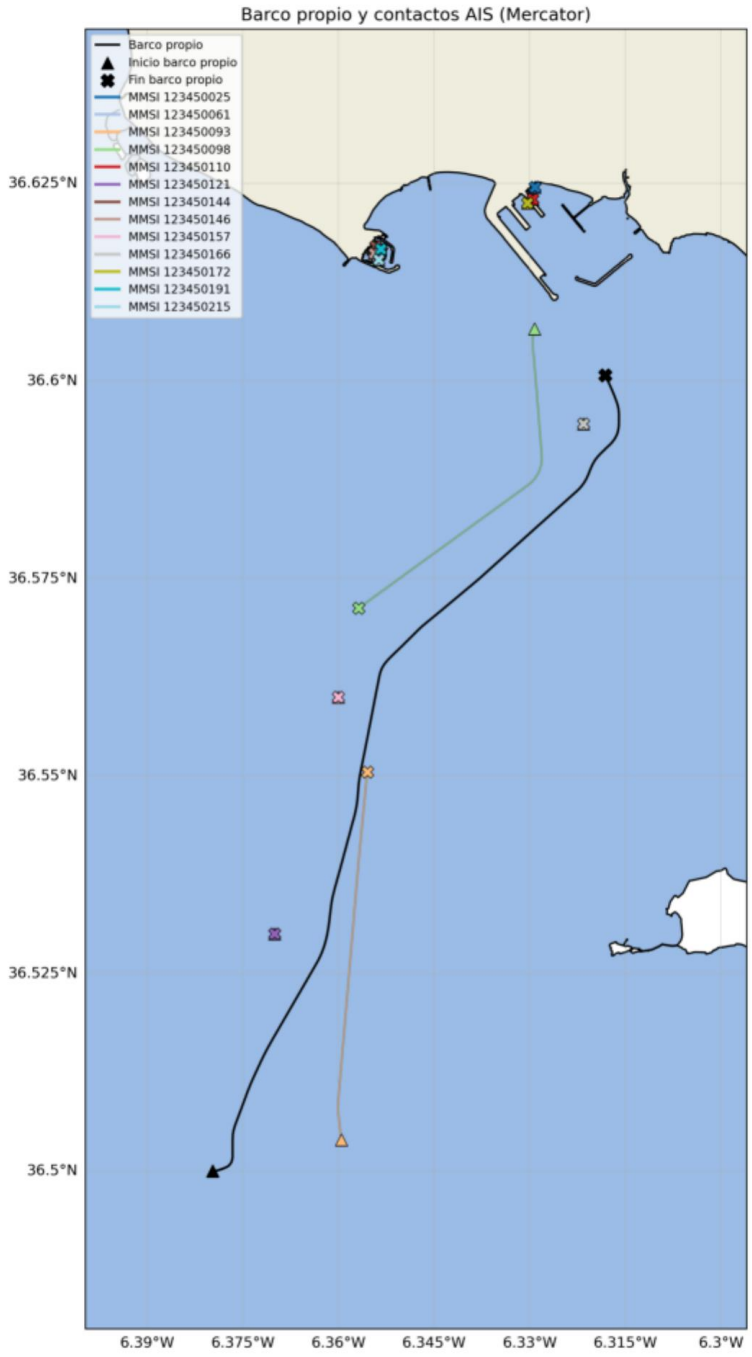
ANÁLISIS DE SEGURIDAD EN LA NAVEGACIÓN

Estudio de contactos AIS y situaciones críticas

Fecha: 15/03/2026

1. MAPA GENERAL

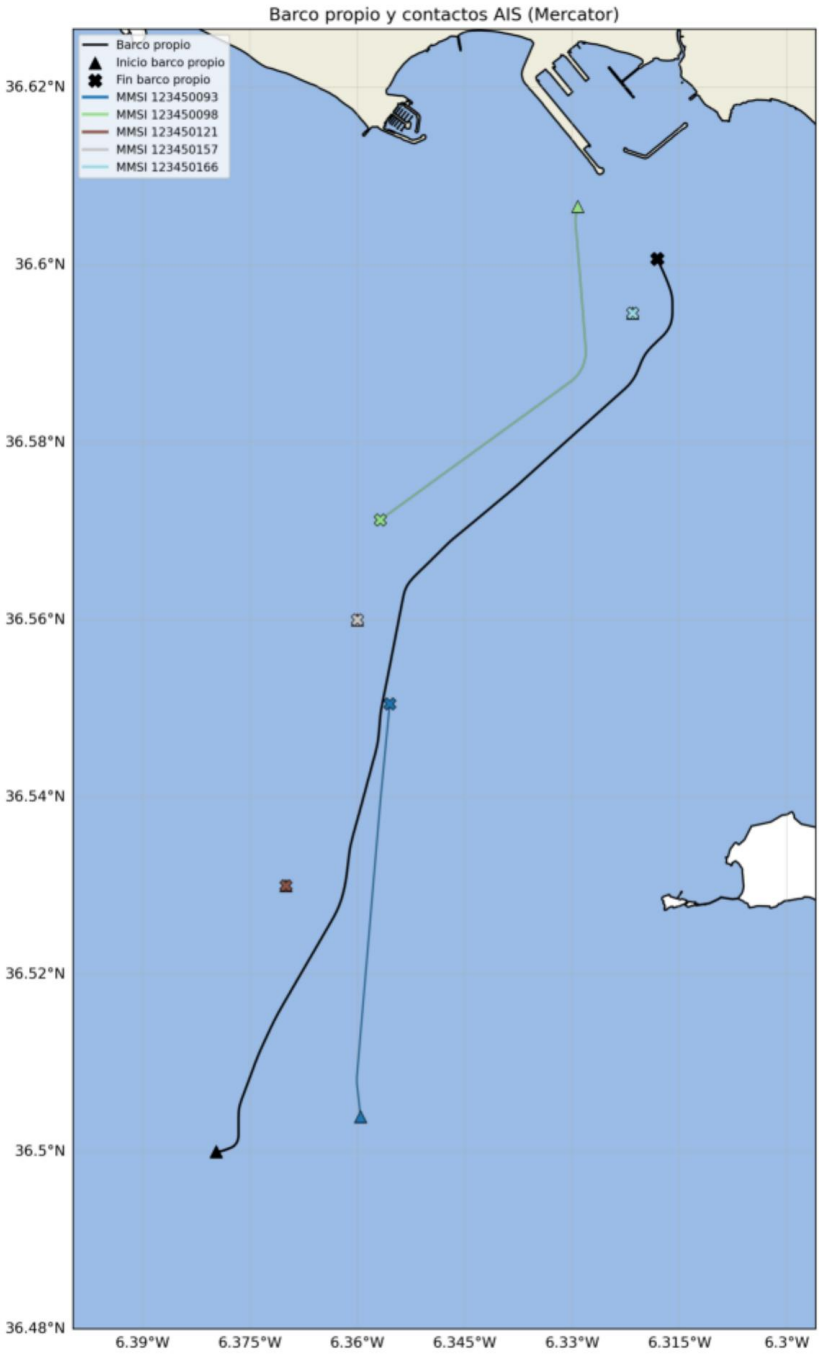
Representación global del tráfico AIS detectado durante el periodo de estudio.



Página 2

2. MAPA TRAS FILTRADO OPERATIVO

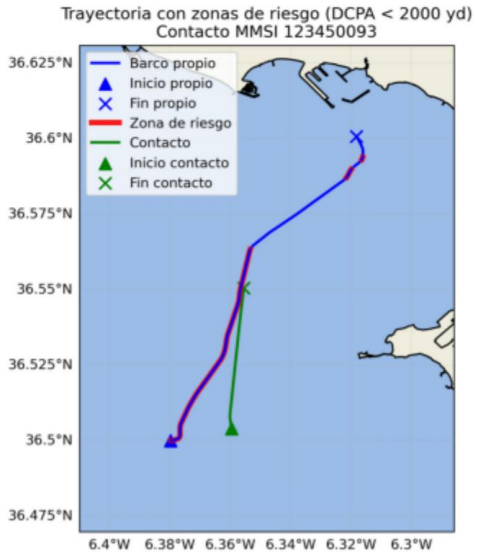
Contactos AIS relevantes tras aplicar filtros operativos.

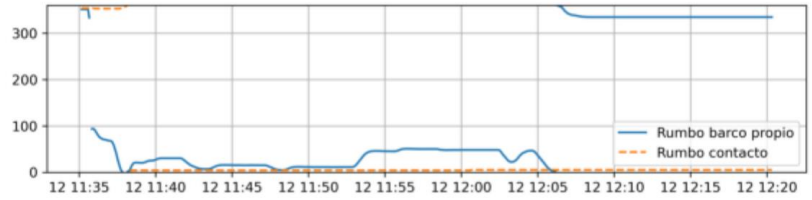


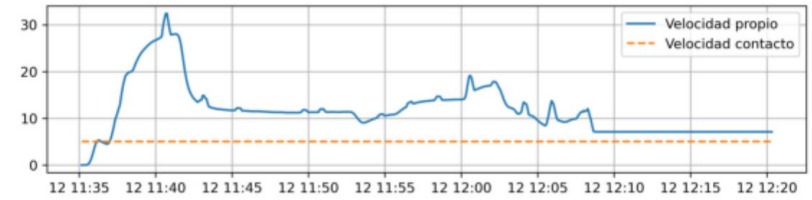
Página 3

3.1 ANÁLISIS CONTACTO MMSI 123450093

Trayectoria completa y análisis cinemático del contacto.



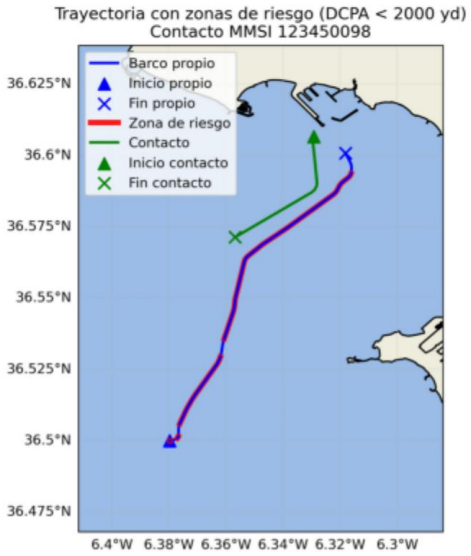


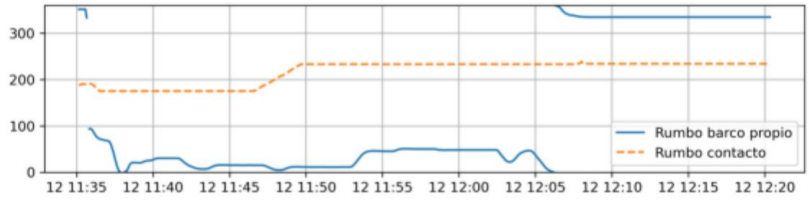


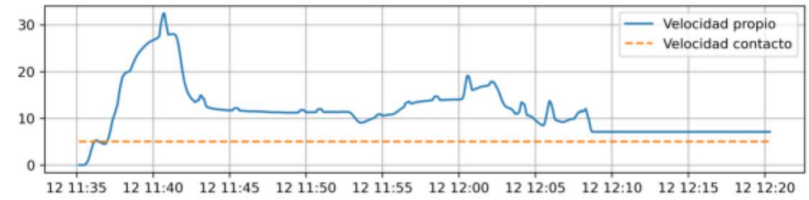


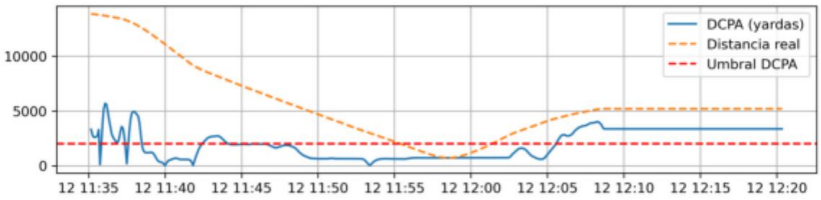
3.2 ANÁLISIS CONTACTO MMSI 123450098

Trayectoria completa y análisis cinemático del contacto.









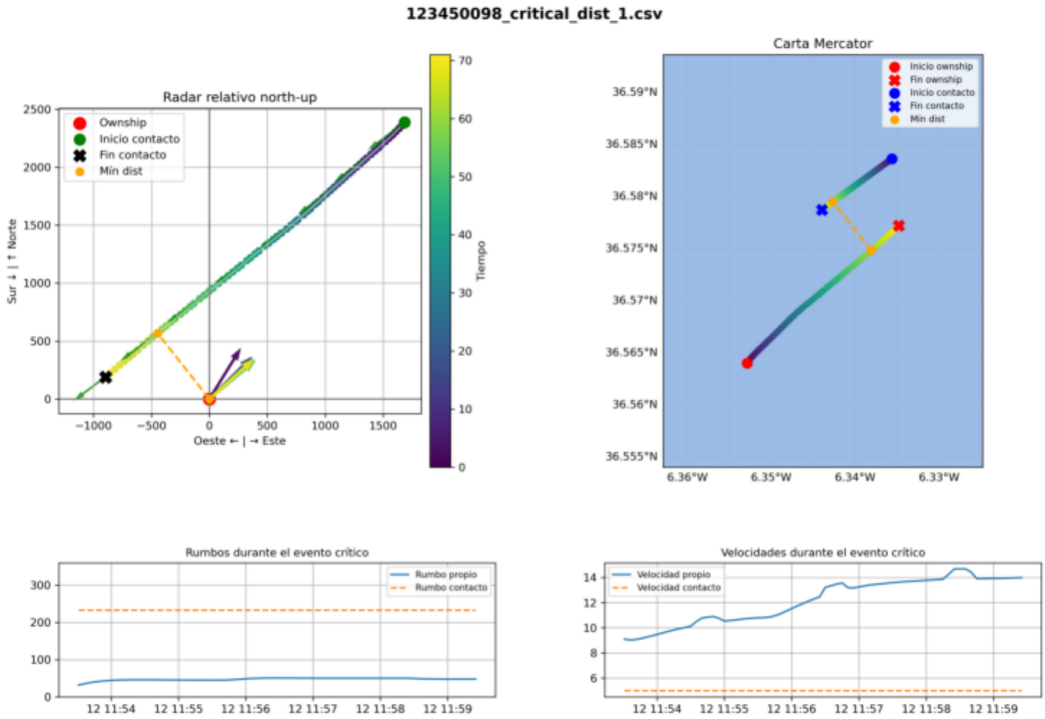
3.2.1 Evento crítico – critical_dist_1

Resumen paramétrico del evento detectado.

MMSI	**123450098**
RIPAM	CRUCE_BR_BR
Dist mín (yd)	723.9
DCPA mín (yd)	203.5
Corte de proa al contacto	No
Maniobra total	Sí
Maniobra rumbo	Sí
Maniobra velocidad	Sí
Δ rumbo neto (°)	**12.3 ESTRIBOR**
Δ rumbo BABOR (°)	1.5
Δ rumbo ESTRIBOR (°)	13.8
Δ velocidad neta (kn)	**5.09**
Δ aumento vel (kn)	5.97
Δ reducción vel (kn)	0.52
Tendencia velocidad	ACELERACION

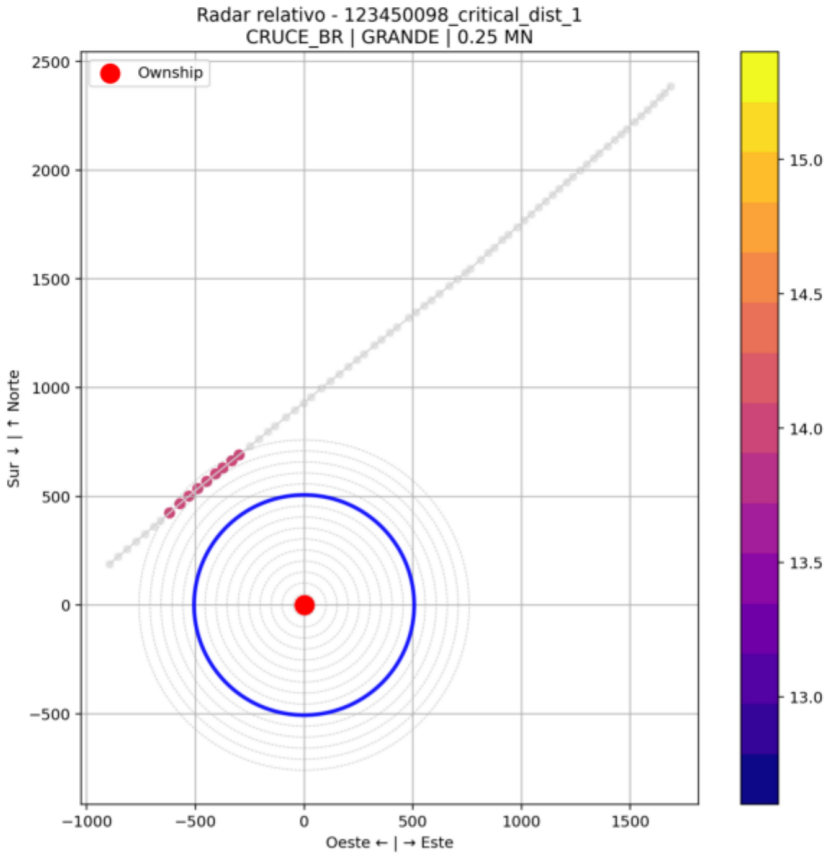
3.2.1 Representación espacial – critical_dist_1

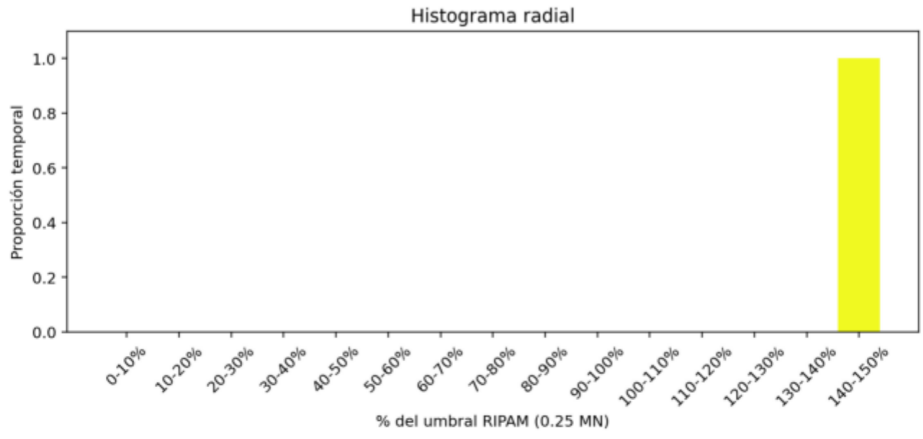
Visualización radar relativa y carta Mercator asociada al evento.



3.2.1 Histograma de distancias – critical_dist_1

Distribución temporal de distancia al contacto respecto al umbral recomendado.





Página 8

3.2.1 Evaluación del evento – critical_dist_1

Criterios, indicadores y penalizaciones (Sí/No).

NOTA FINAL: 10.0/10 → SEGURA

Criterios empleados:

- RIPAM: CRUCE_ER
- Tamaño: PEQUEÑO
- Distancia mínima: 0.36 MN
- Rango permitido: [0.25, 0.50] MN

Maniobra:

- Obligación: YES
- ¿Hay que maniobrar?: Sí
- Maniobra realizada: Sí
- Banda: ESTRIBOR

Indicadores del histograma:

- Zona más cercana: 140_150 (prob=100.0%)
- % tiempo dentro del umbral (<100%): 0.0%
- % tiempo cumpliendo umbral (≥100%): 100.0%

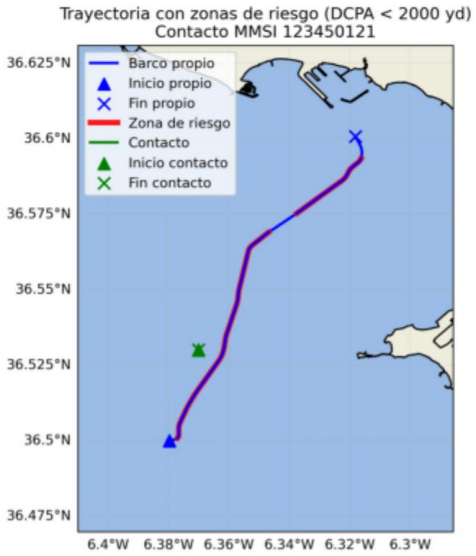
Penalizaciones:

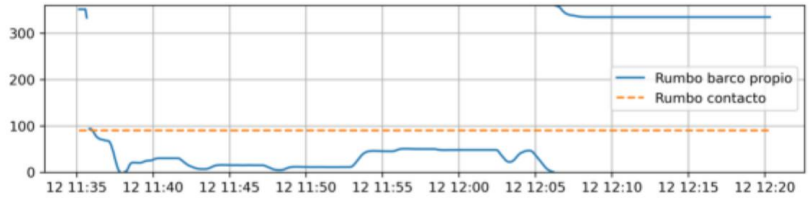
- CPA decreciente: No
- Corte de proa: No

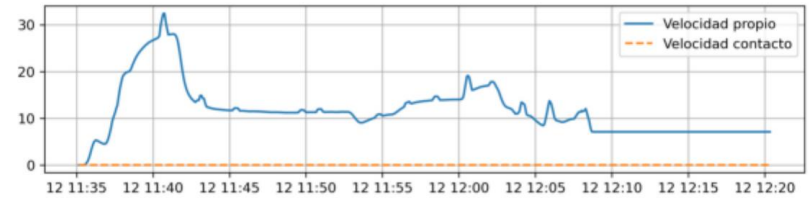
Página 9

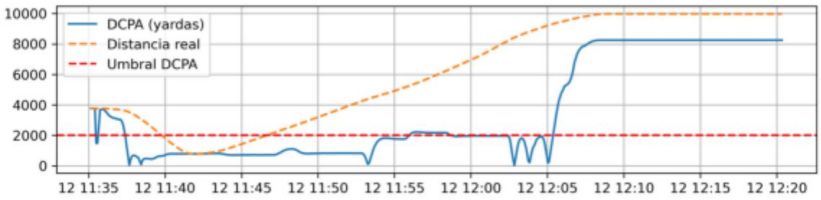
3.3 ANÁLISIS CONTACTO MMSI 123450121

Trayectoria completa y análisis cinemático del contacto.









Página 10

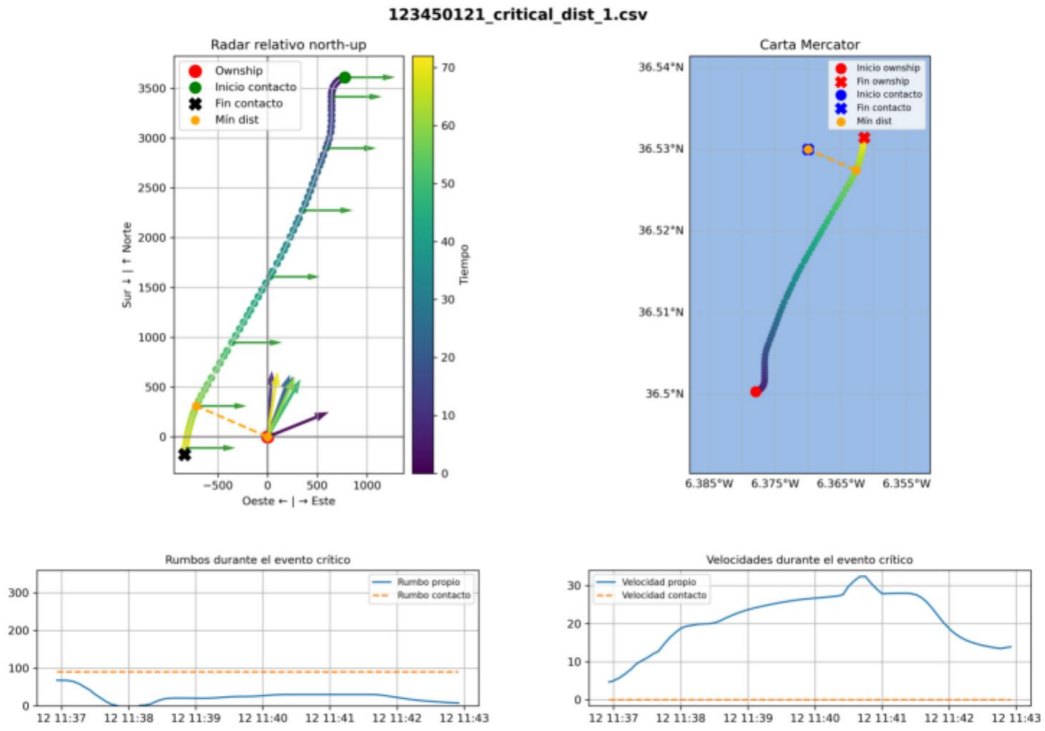
3.3.1 Evento crítico – critical_dist_1

Resumen paramétrico del evento detectado.

MMSI	**123450121**
RIPAM	FONDEADO
Dist mín (yd)	779.3
DCPA mín (yd)	38.0
Corte de proa al contacto	NQR
Maniobra total	Sí
Maniobra rumbo	Sí
Maniobra velocidad	Sí
Δ rumbo neto (°)	**-40.1 BABOR**
Δ rumbo BABOR (°)	70.9
Δ rumbo ESTRIBOR (°)	30.8
Δ velocidad neta (kn)	**16.75**
Δ aumento vel (kn)	26.27
Δ reducción vel (kn)	9.98
Tendencia velocidad	ACELERACION

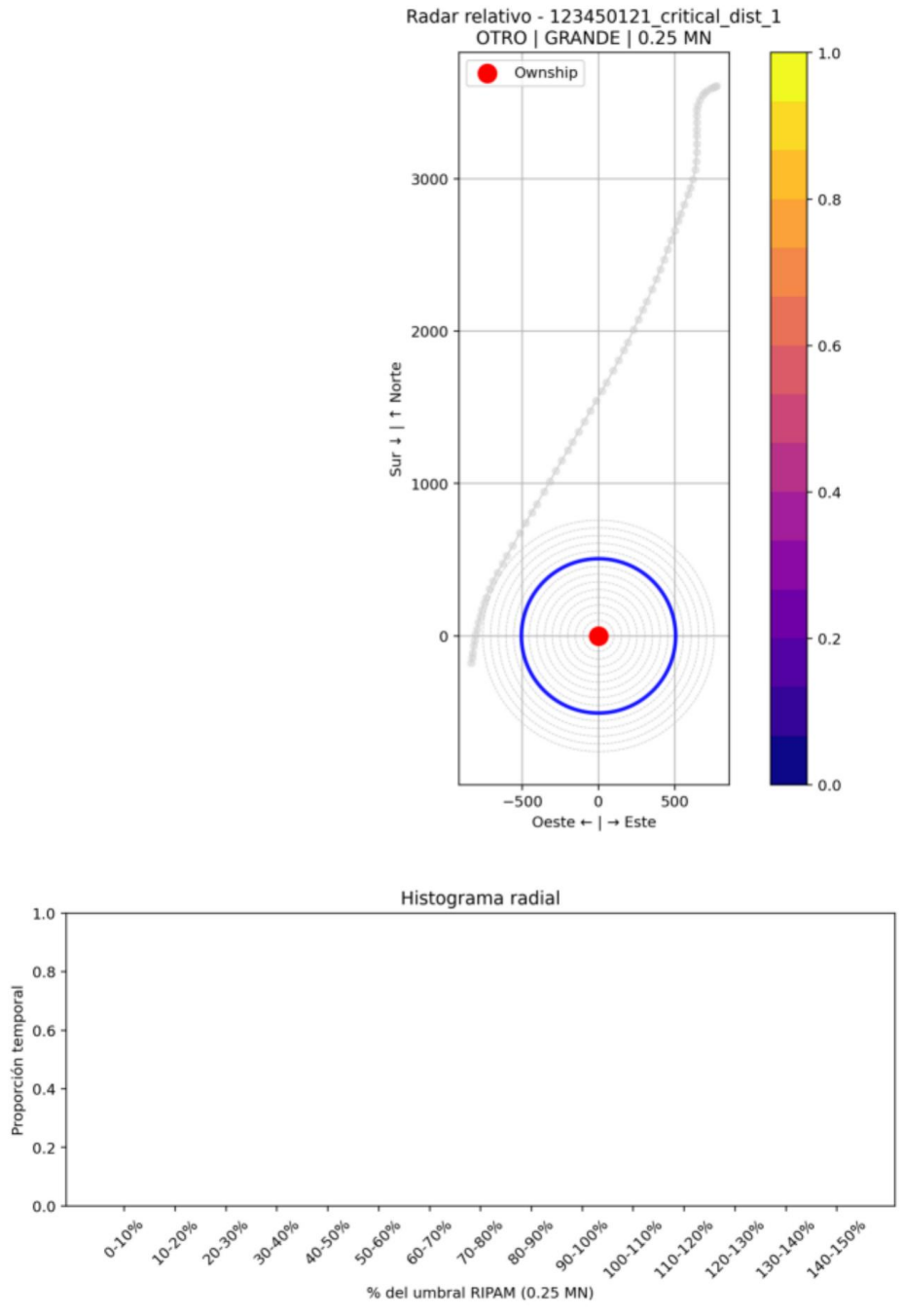
3.3.1 Representación espacial – critical_dist_1

Visualización radar relativa y carta Mercator asociada al evento.



3.3.1 Histograma de distancias – critical_dist_1

Distribución temporal de distancia al contacto respecto al umbral recomendado.



3.3.1 Evaluación del evento – critical_dist_1

Criterios, indicadores y penalizaciones (Sí/No).

NOTA FINAL: 8.4/10 → SEGURA

Criterios empleados:

- RIPAM: FONDEADO
- Tamaño: PEQUEÑO
- Distancia mínima: 0.38 MN
- Rango permitido: [0.25, 0.50] MN

Maniobra:

- Obligación: COND
- ¿Hay que maniobrar?: No
- Maniobra realizada: Sí
- Banda: BABOR

Indicadores del histograma:

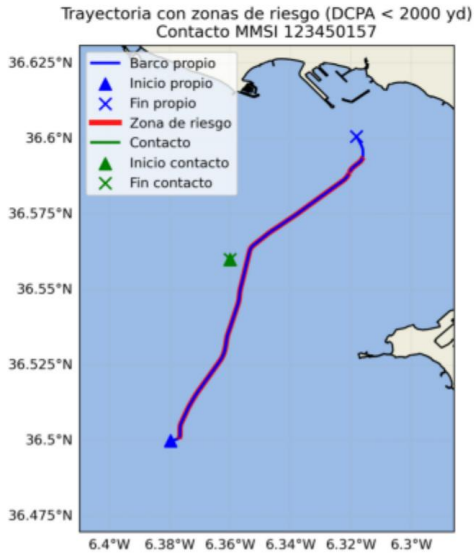
- Zona más cercana: 140_150 (prob=100.0%)
- % tiempo dentro del umbral (<100%): 0.0%
- % tiempo cumpliendo umbral (≥100%): 100.0%

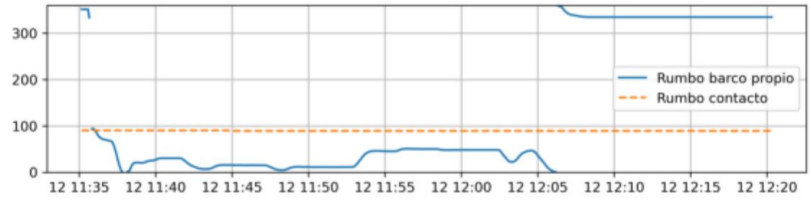
Penalizaciones:

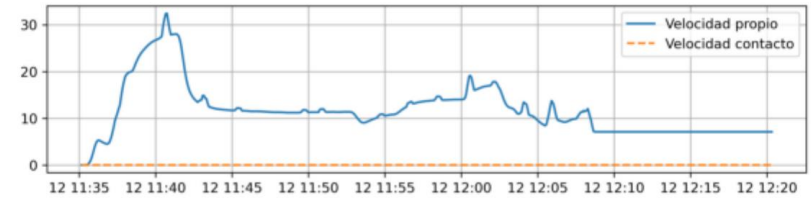
- CPA decreciente: Sí
- Corte de proa: No

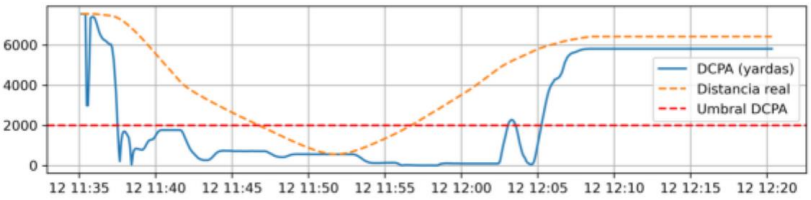
3.4 ANÁLISIS CONTACTO MMSI 123450157

Trayectoria completa y análisis cinemático del contacto.









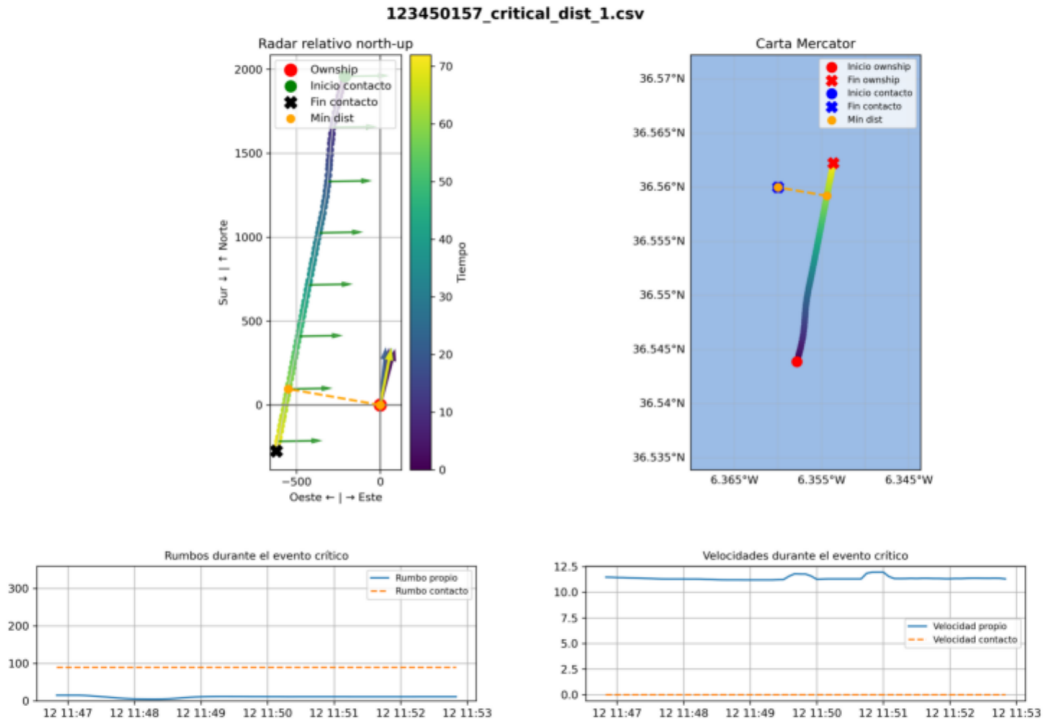
3.4.1 Evento crítico – critical_dist_1

Resumen paramétrico del evento detectado.

MMSI	**123450157**
RIPAM	FONDEADO
Dist mín (yd)	556.8
DCPA mín (yd)	415.2
Corte de proa al contacto	NQR
Maniobra total	Sí
Maniobra rumbo	Sí
Maniobra velocidad	Sí
Δ rumbo neto (°)	**-4.0 BABOR**
Δ rumbo BABOR (°)	11.0
Δ rumbo ESTRIBOR (°)	7.0
Δ velocidad neta (kn)	**-0.08**
Δ aumento vel (kn)	1.28
Δ reducción vel (kn)	1.37
Tendencia velocidad	REDUCCION

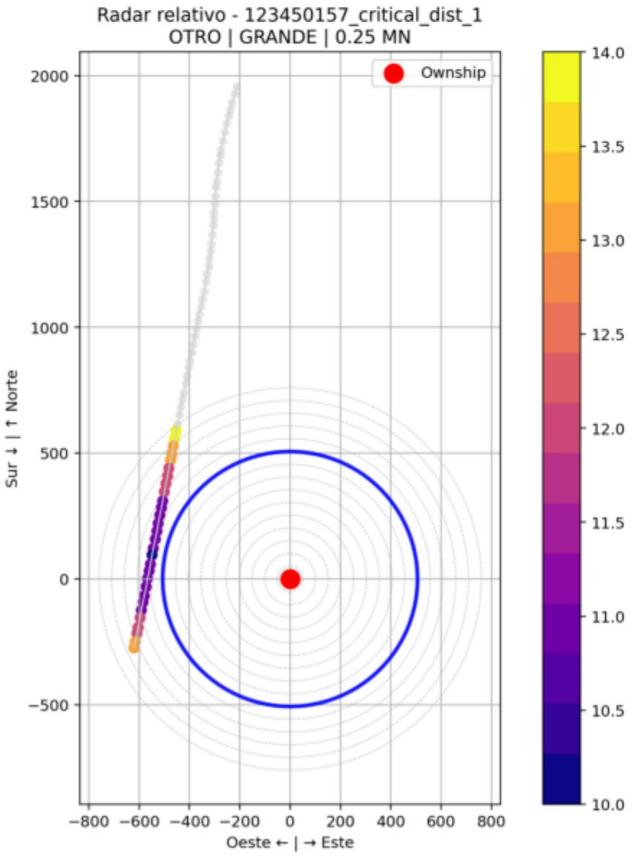
3.4.1 Representación espacial – critical_dist_1

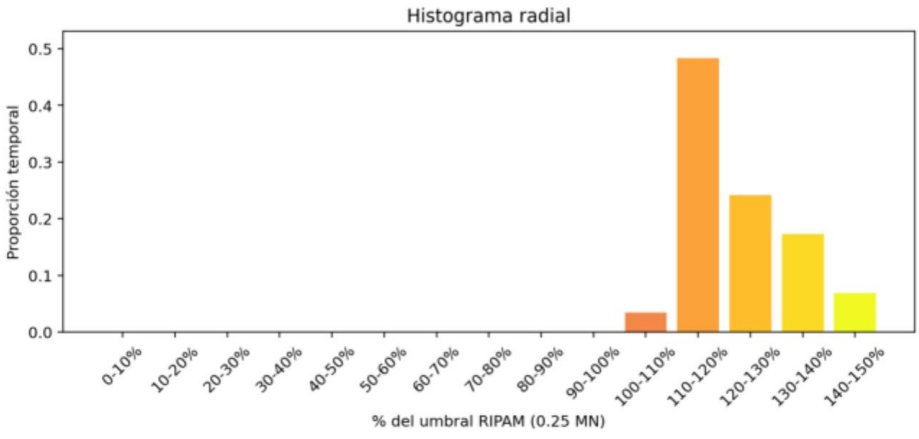
Visualización radar relativa y carta Mercator asociada al evento.



3.4.1 Histograma de distancias – critical_dist_1

Distribución temporal de distancia al contacto respecto al umbral recomendado.





Página 18

3.4.1 Evaluación del evento – critical_dist_1

Criterios, indicadores y penalizaciones (Sí/No).

NOTA FINAL: 8.4/10 → SEGURA

Criterios empleados:

- RIPAM: FONDEADO
- Tamaño: GRANDE
- Distancia mínima: 0.27 MN
- Rango permitido: [0.25, 0.55] MN

Maniobra:

- Obligación: COND
- ¿Hay que maniobrar?: No
- Maniobra realizada: Sí
- Banda: BABOR

Indicadores del histograma:

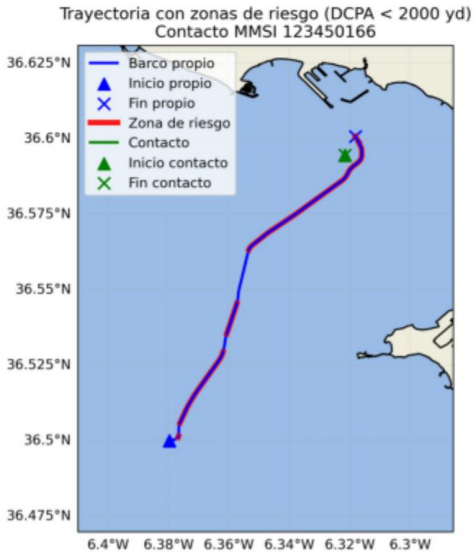
- Zona más cercana: 100_110 (prob=1.6%)
- % tiempo dentro del umbral (<100%): 0.0%
- % tiempo cumpliendo umbral (≥100%): 100.0%

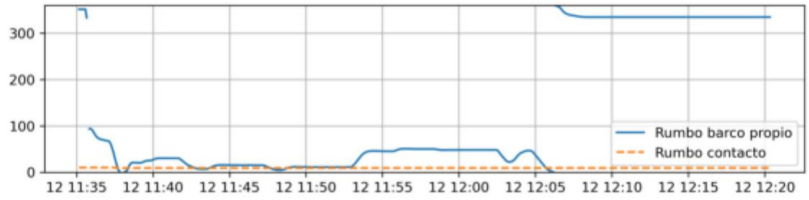
Penalizaciones:

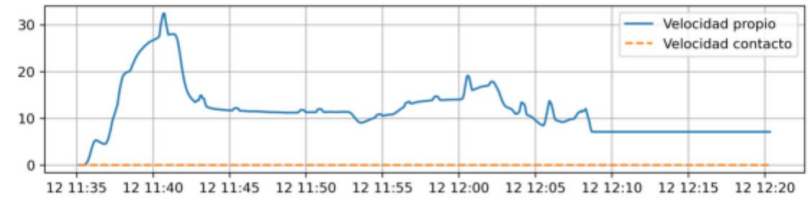
- CPA decreciente: Sí
- Corte de proa: No

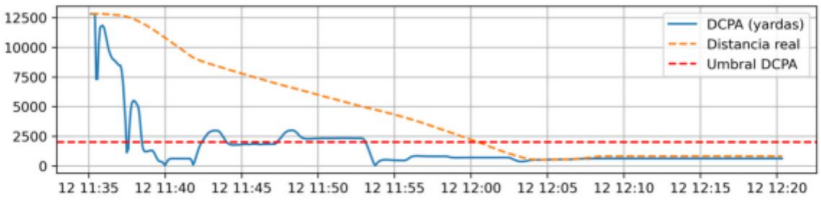
3.5 ANÁLISIS CONTACTO MMSI 123450166

Trayectoria completa y análisis cinemático del contacto.









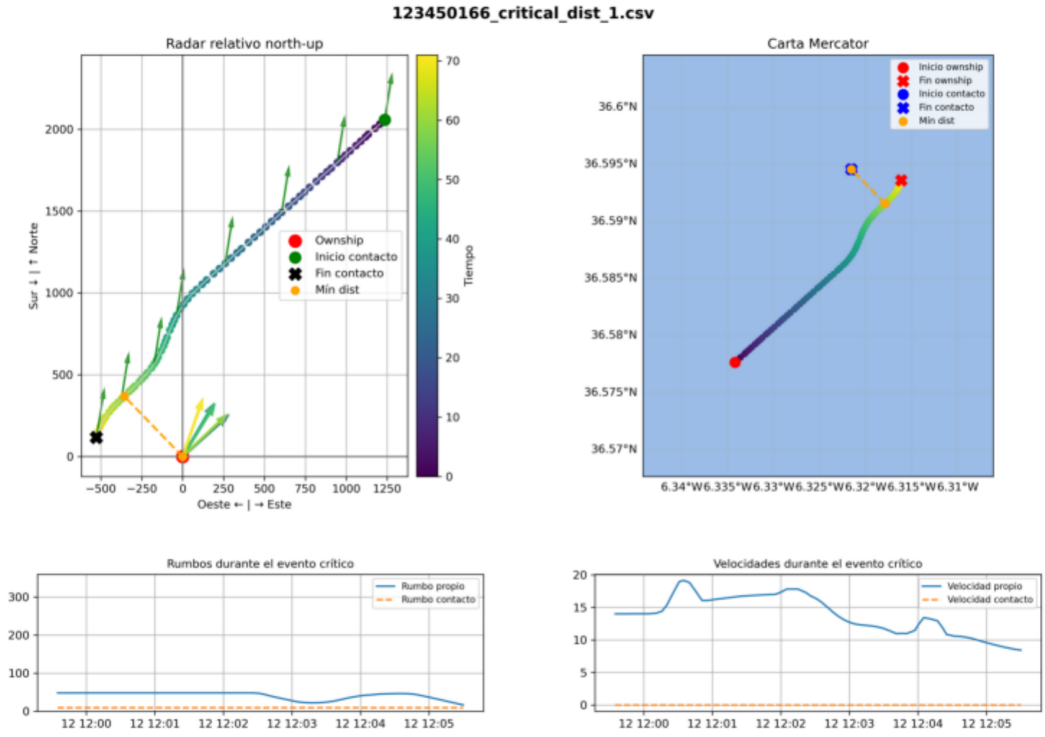
3.5.1 Evento crítico – critical_dist_1

Resumen paramétrico del evento detectado.

MMSI	**123450166**
RIPAM	FONDEADO
Dist mín (yd)	511.5
DCPA mín (yd)	360.0
Corte de proa al contacto	NQR
Maniobra total	Sí
Maniobra rumbo	Sí
Maniobra velocidad	Sí
Δ rumbo neto (°)	**-1.9 BABOR**
Δ rumbo BABOR (°)	25.9
Δ rumbo ESTRIBOR (°)	24.0
Δ velocidad neta (kn)	**-2.09**
Δ aumento vel (kn)	8.90
Δ reducción vel (kn)	11.77
Tendencia velocidad	REDUCCION

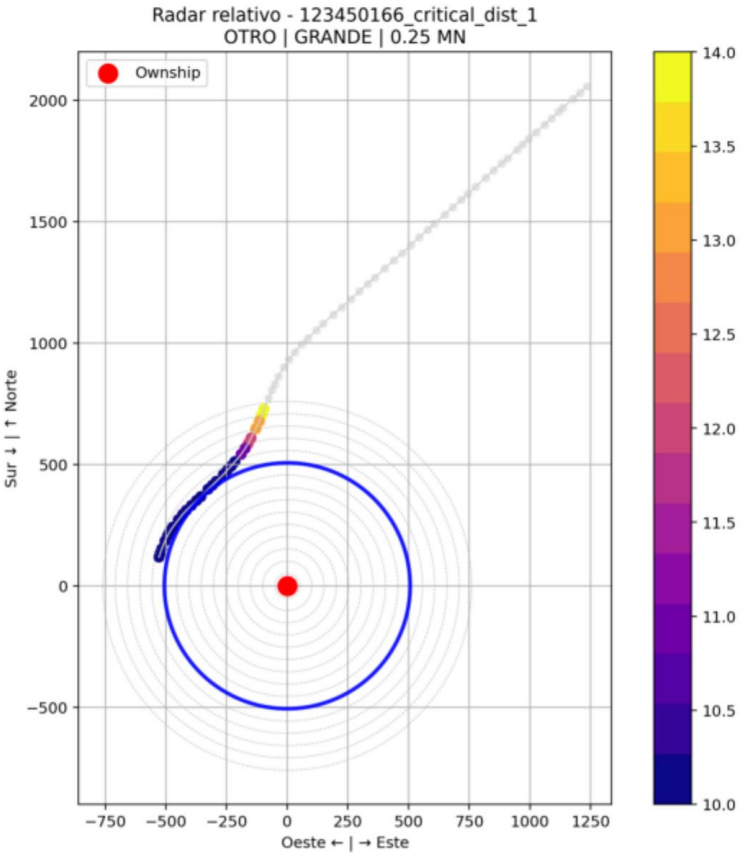
3.5.1 Representación espacial – critical_dist_1

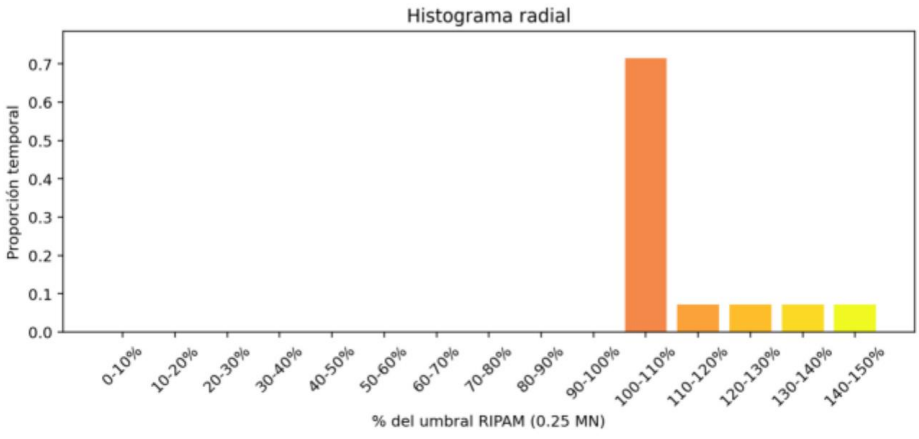
Visualización radar relativa y carta Mercator asociada al evento.



3.5.1 Histograma de distancias – critical_dist_1

Distribución temporal de distancia al contacto respecto al umbral recomendado.





3.5.1 Evaluación del evento – critical_dist_1

Criterios, indicadores y penalizaciones (Sí/No).

NOTA FINAL: 8.4/10 → SEGURA

Criterios empleados:

- RIPAM: FONDEADO
- Tamaño: GRANDE
- Distancia mínima: 0.25 MN
- Rango permitido: [0.25, 0.55] MN

Maniobra:

- Obligación: COND
- ¿Hay que maniobrar?: No
- Maniobra realizada: Sí
- Banda: BABOR

Indicadores del histograma:

- Zona más cercana: 100_110 (prob=27.2%)
- % tiempo dentro del umbral (<100%): 0.0%
- % tiempo cumpliendo umbral (≥100%): 100.0%

Penalizaciones:

- CPA decreciente: Sí
- Corte de proa: No

RESUMEN FINAL

Media global: 8.78 / 10

Valoración final: EXCELENTE

Nº de eventos evaluados: 4

Peores eventos:

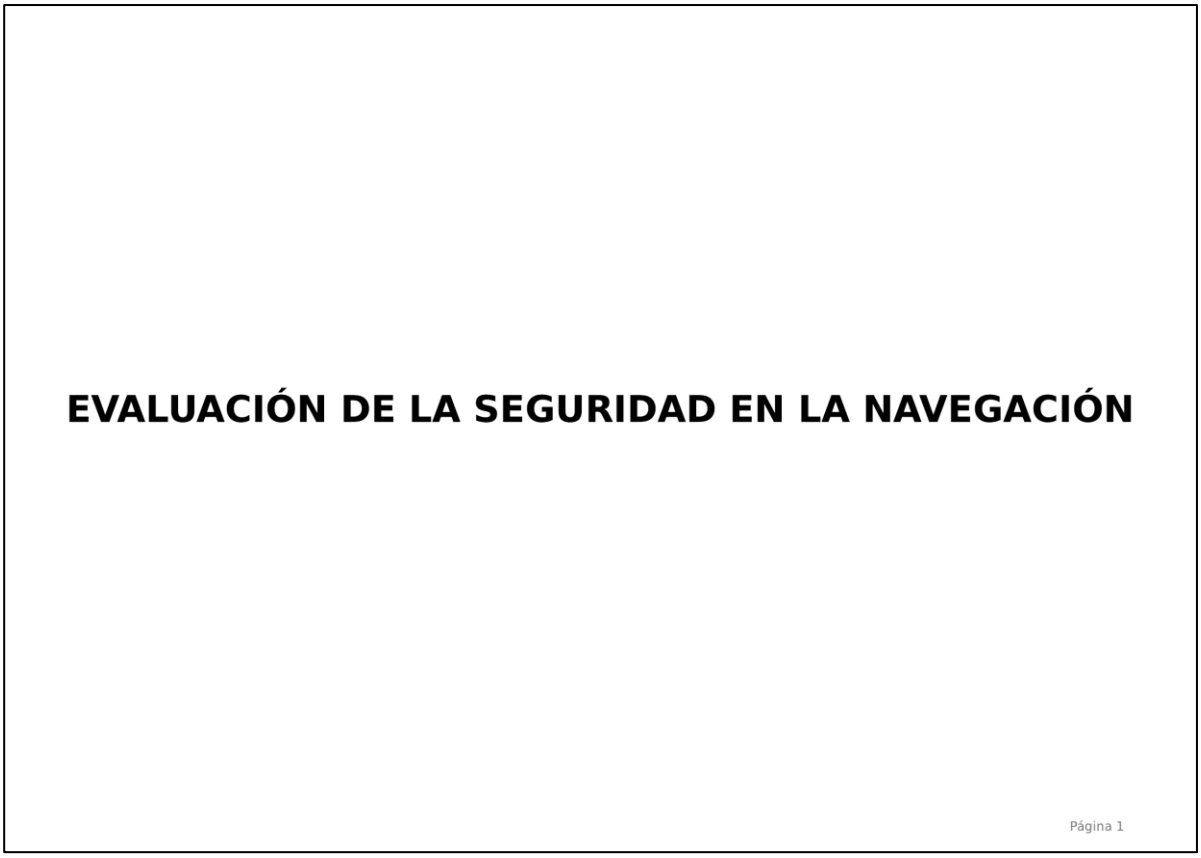
- 123450121_critical_dist_1 → 8.37/10
- 123450157_critical_dist_1 → 8.37/10
- 123450166_critical_dist_1 → 8.37/10
- 123450098_critical_dist_1 → 10.00/10

Mejores eventos:

- 123450098_critical_dist_1 → 10.00/10
- 123450166_critical_dist_1 → 8.37/10
- 123450157_critical_dist_1 → 8.37/10
- 123450121_critical_dist_1 → 8.37/10

Anexo III.B Ejercicio realizado en el entorno de Ferrol

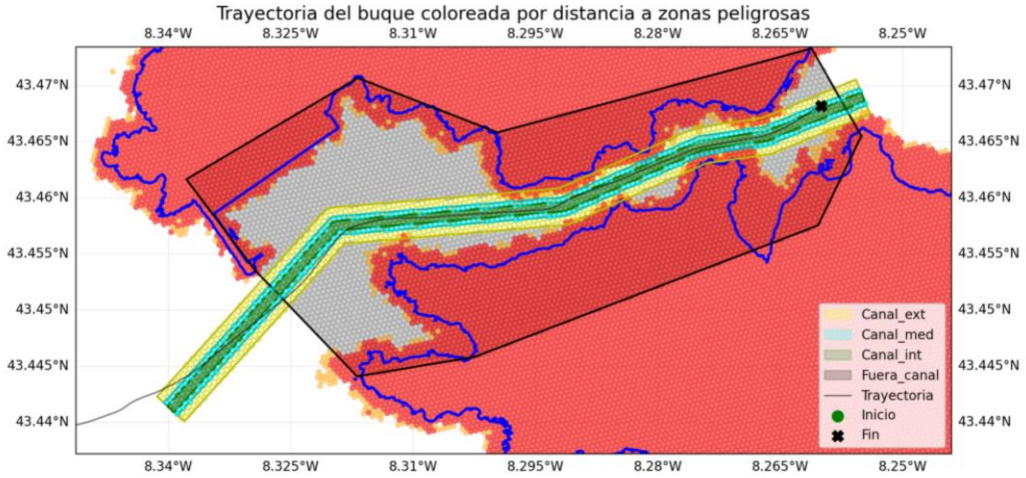
Seguridad en la navegación





Evidencia 1

Mapa general: trayectoria y zonas de riesgo.

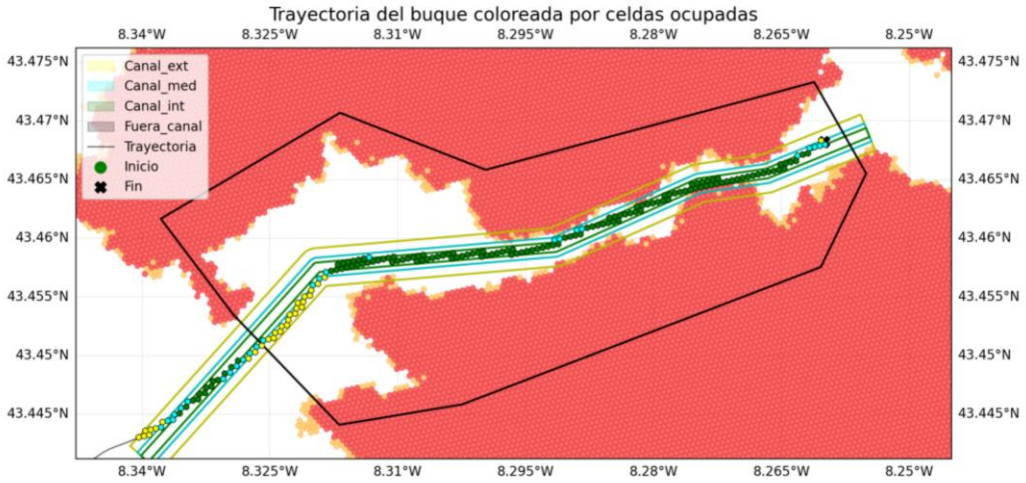


Ejercicio Ferrol | 2026-03-13 00:28

Página 3

Evidencia 2

Detalle adicional del ejercicio.



Ejercicio Ferrol | 2026-03-13 00:28

Página 4

Interpretación automática (1/2)

Comentario automático

La evaluación clasifica la navegación como adecuada. El comportamiento general mantiene un nivel de seguridad aceptable, aunque se detectan elementos mejorables, como separaciones laterales o incursiones puntuales en zonas de mayor severidad, que conviene corregir para consolidar márgenes más robustos. La banda interior de navegación es mayoritaria, aunque una parte relevante de la derrota transcurre por bandas laterales adyacentes. La desviación lateral global es moderada; no compromete por sí sola la evaluación, pero indica margen de mejora en el control lateral. No se registran celdas de riesgo alto o crítico, lo que refuerza la seguridad del trazado. No se detectan salidas fuera de la zona navegable evaluada (black), lo que indica buen control de los márgenes laterales. No se detectan celdas críticas (red), por lo que no se activa restricción doctrinal por criticidad. El componente difuso del evaluador genera un riesgo base de 29.31/100 el índice global ponderado de severidad es 10.53/100 y ambos se combinan para estabilizar la evaluación.

Interpretación automática (2/2)

Recomendación principal

Prioridad de mejora: aumentar la permanencia en la banda interior de navegación. Se recomienda reducir la navegación en bandas exteriores (yellow) mediante un seguimiento más continuo del eje de la derrota y correcciones laterales más tempranas.

Tabla resumen de métricas

Indicador	Valor	Interpretación
Total celdas activadas	187	Base del análisis espacial de la derrota
Celdas interior (green)	132	Tránsito por la banda interior de navegación, próxima al eje de la derrota
Celdas medio (cyan)	26	Separación leve respecto al eje de la derrota
Celdas exterior (yellow)	29	Desviación lateral significativa dentro de la zona navegable evaluada
Celdas fuera (black)	0	Salida de los límites laterales de la zona navegable evaluada
Celdas riesgo alto (orange)	0	Zonas de riesgo alto
Celdas riesgo crítico (red)	0	Zonas de riesgo crítico
% interior (green)	70.59	Permanencia en la banda interior de navegación
% medio (cyan)	13.9	Separación leve respecto al eje
% exterior (yellow)	15.51	Desviación lateral apreciable
% fuera (black)	0.0	Pérdida de la zona navegable evaluada
% alto (orange)	0.0	Exposición a riesgo alto
% crítico (red)	0.0	Exposición a riesgo crítico
% desvío (yellow+black)	15.51	Desviación global respecto al eje de la derrota
% riesgo (orange+red)	0.0	Exposición global a zonas sensibles
% fuera de la banda central	29.41	Porcentaje fuera de la banda interior de navegación
Índice global (0-100)	10.53	Severidad agregada ponderada por tipo de celda
Riesgo fuzzy (0-100)	29.31	Salida difusa antes de penalizaciones y techo doctrinal
Severidad máxima (0-100)	50.0	Peor nivel de severidad observado a lo largo de la derrota
Score seguridad (0-100)	79.14	Puntuación final (100 = mejor seguridad)
Categoría final	Adecuada	Clasificación final de seguridad en la navegación

Ejercicio Ferrol | 2026-03-13 00:28 Página 7

Situaciones RIPA

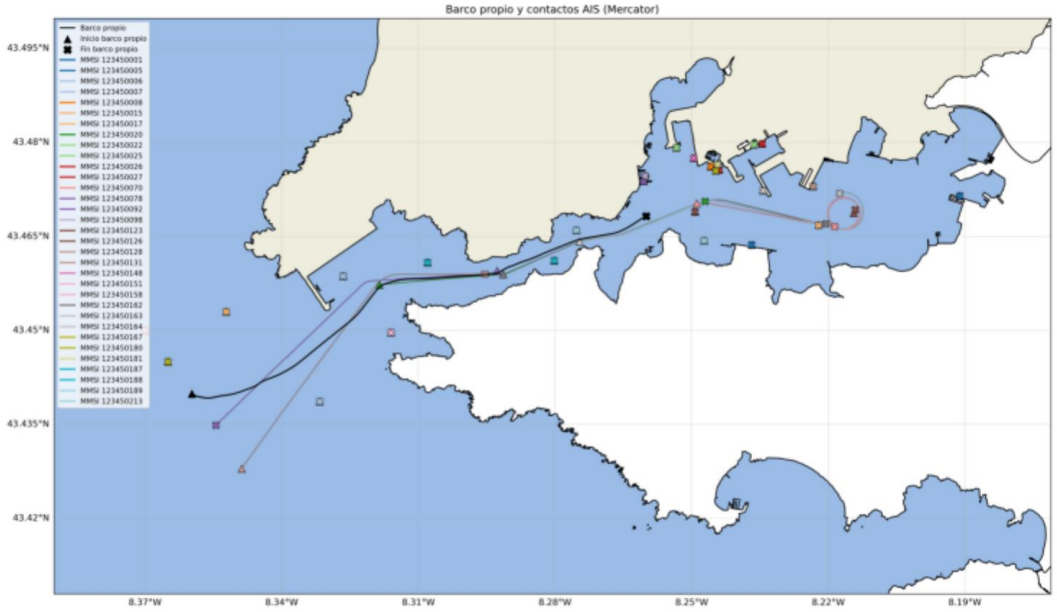
ANÁLISIS DE SEGURIDAD EN LA NAVEGACIÓN

Estudio de contactos AIS y situaciones críticas

Fecha: 15/03/2026

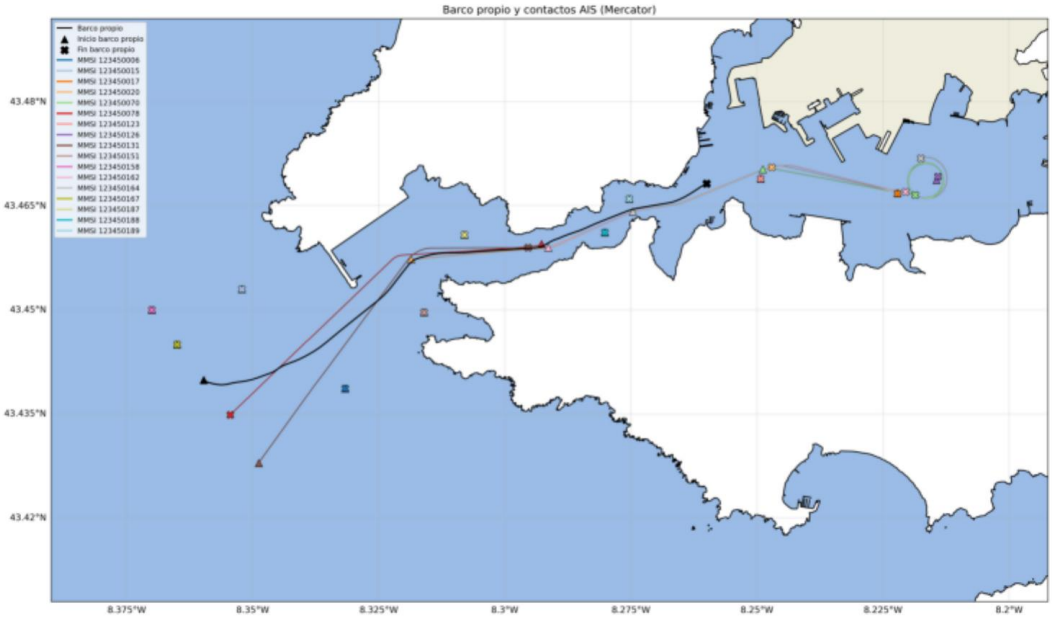
1. MAPA GENERAL

Representación global del tráfico AIS detectado durante el periodo de estudio.



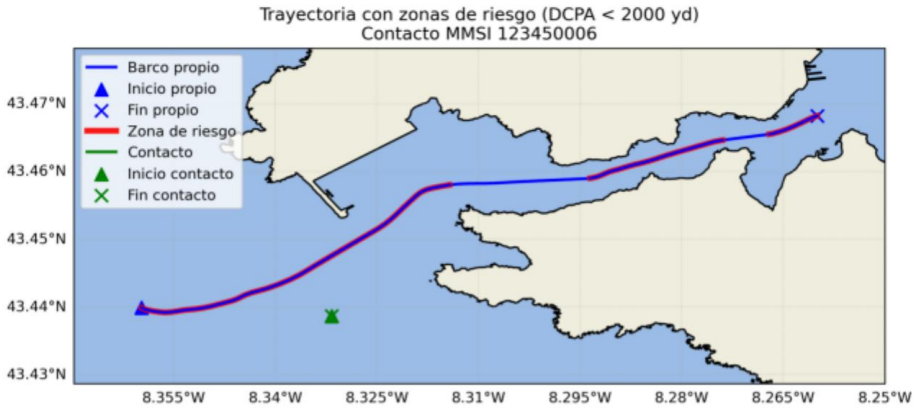
2. MAPA TRAS FILTRADO OPERATIVO

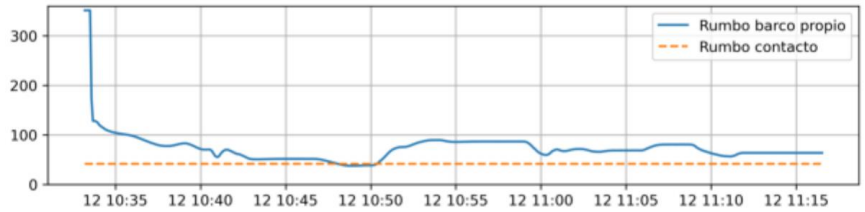
Contactos AIS relevantes tras aplicar filtros operativos.

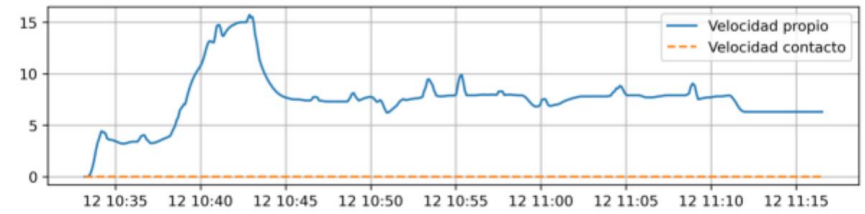


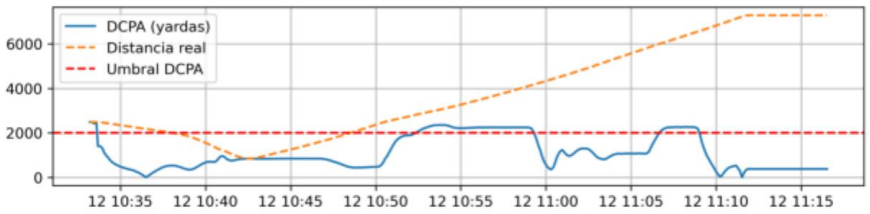
3.1 ANÁLISIS CONTACTO MMSI 123450006

Trayectoria completa y análisis cinemático del contacto.









Página 4

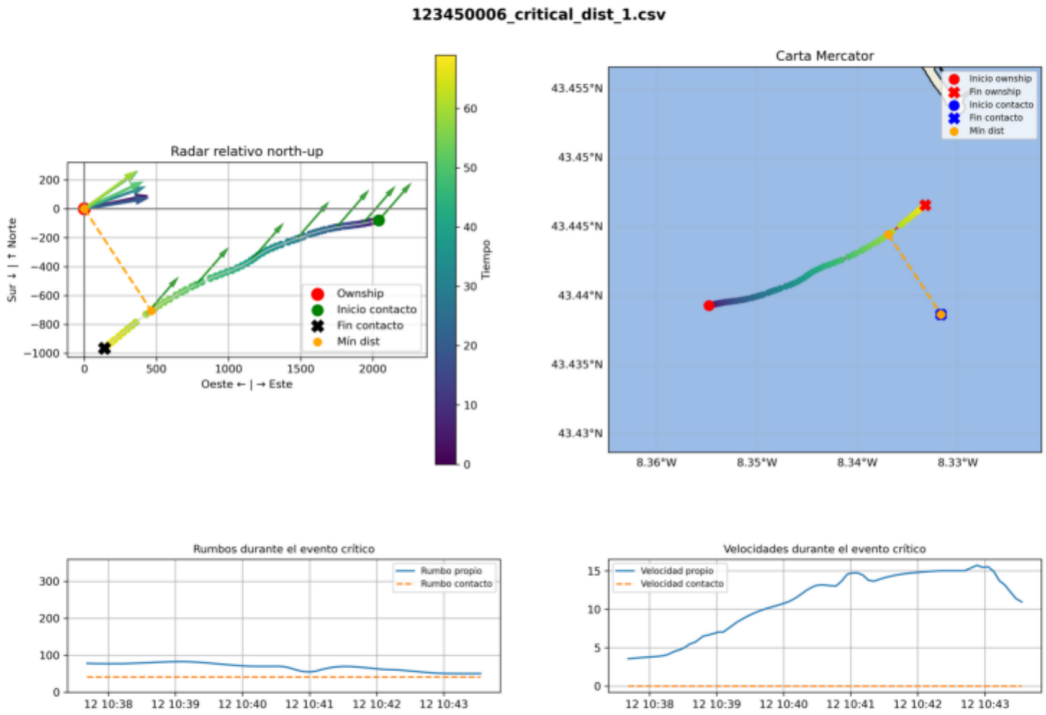
3.1.1 Evento crítico – critical_dist_1

Resumen paramétrico del evento detectado.

MMSI	**123450006**
RIPAM	FONDEADO
Dist mín (yd)	844.0
DCPA mín (yd)	344.7
Corte de proa al contacto	NQR
Maniobra total	Sí
Maniobra rumbo	Sí
Maniobra velocidad	Sí
Δ rumbo neto (°)	**-20.6 BABOR**
Δ rumbo BABOR (°)	40.0
Δ rumbo ESTRIBOR (°)	19.3
Δ velocidad neta (kn)	**11.24**
Δ aumento vel (kn)	12.25
Δ reducción vel (kn)	0.95
Tendencia velocidad	ACELERACION

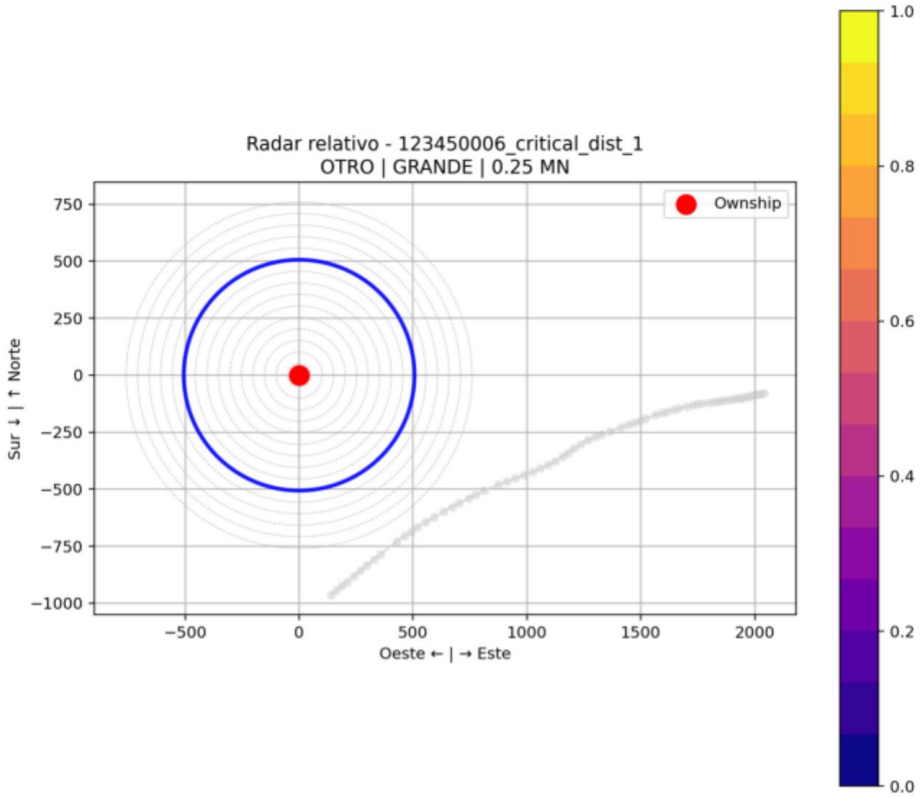
3.1.1 Representación espacial – critical_dist_1

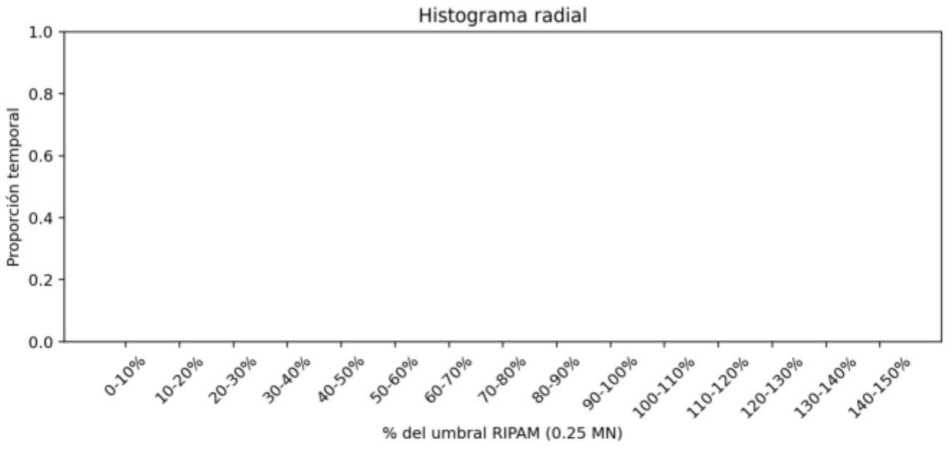
Visualización radar relativa y carta Mercator asociada al evento.



3.1.1 Histograma de distancias – critical_dist_1

Distribución temporal de distancia al contacto respecto al umbral recomendado.





Página 7

3.1.1 Evaluación del evento – critical_dist_1

Criterios, indicadores y penalizaciones (Sí/No).

NOTA FINAL: 9.3/10 → SEGURA

Criterios empleados:

- RIPAM: FONDEADO
- Tamaño: GRANDE
- Distancia mínima: 0.42 MN
- Rango permitido: [0.25, 0.50] MN

Maniobra:

- Obligación: COND
- ¿Hay que maniobrar?: No
- Maniobra realizada: Sí
- Banda: BABOR

Indicadores del histograma:

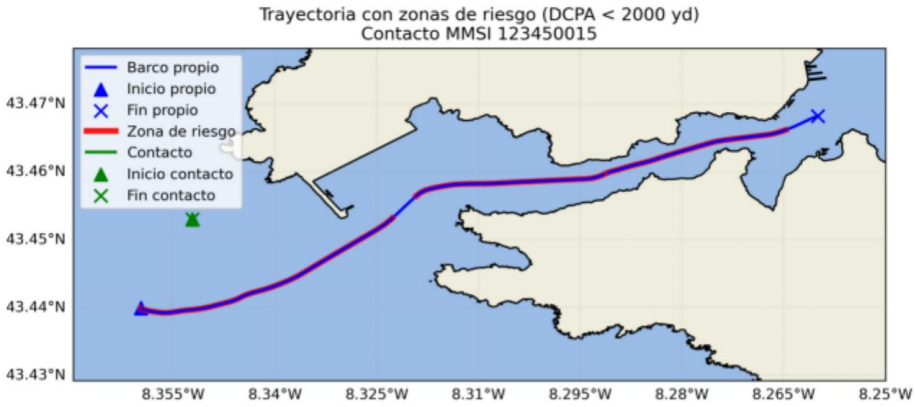
- Zona más cercana: 140_150 (prob=100.0%)
- % tiempo dentro del umbral (<100%): 0.0%
- % tiempo cumpliendo umbral (≥100%): 100.0%

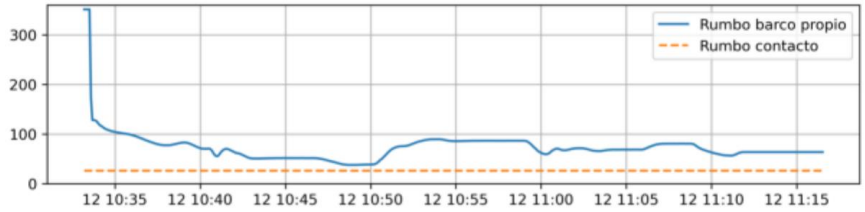
Penalizaciones:

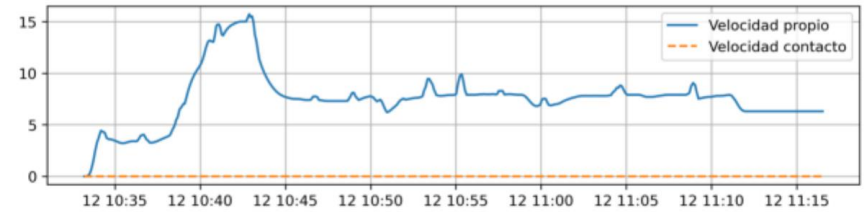
- CPA decreciente: No
- Corte de proa: No

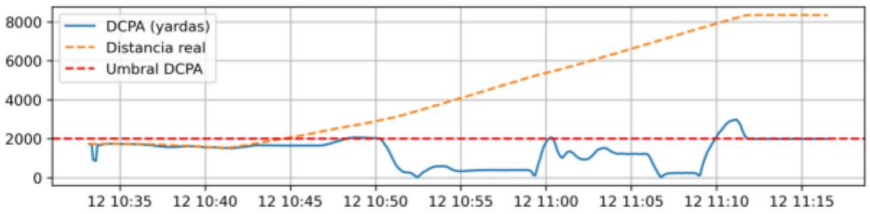
3.2 ANÁLISIS CONTACTO MMSI 123450015

Trayectoria completa y análisis cinemático del contacto.









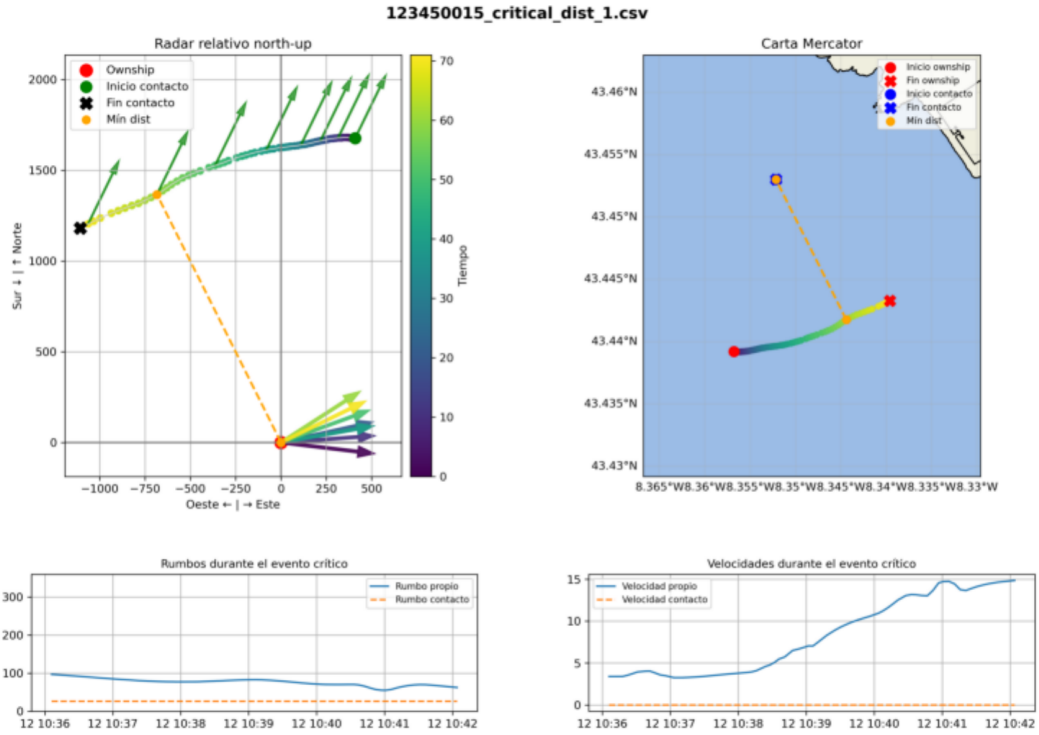
3.2.1 Evento crítico – critical_dist_1

Resumen paramétrico del evento detectado.

MMSI	**123450015**
RIPAM	FONDEADO
Dist mín (yd)	1527.8
DCPA mín (yd)	1507.2
Corte de proa al contacto	NQR
Maniobra total	Sí
Maniobra rumbo	Sí
Maniobra velocidad	Sí
Δ rumbo neto (°)	**-34.4 BABOR**
Δ rumbo BABOR (°)	40.0
Δ rumbo ESTRIBOR (°)	5.6
Δ velocidad neta (kn)	**10.25**
Δ aumento vel (kn)	11.46
Δ reducción vel (kn)	0.79
Tendencia velocidad	ACELERACION

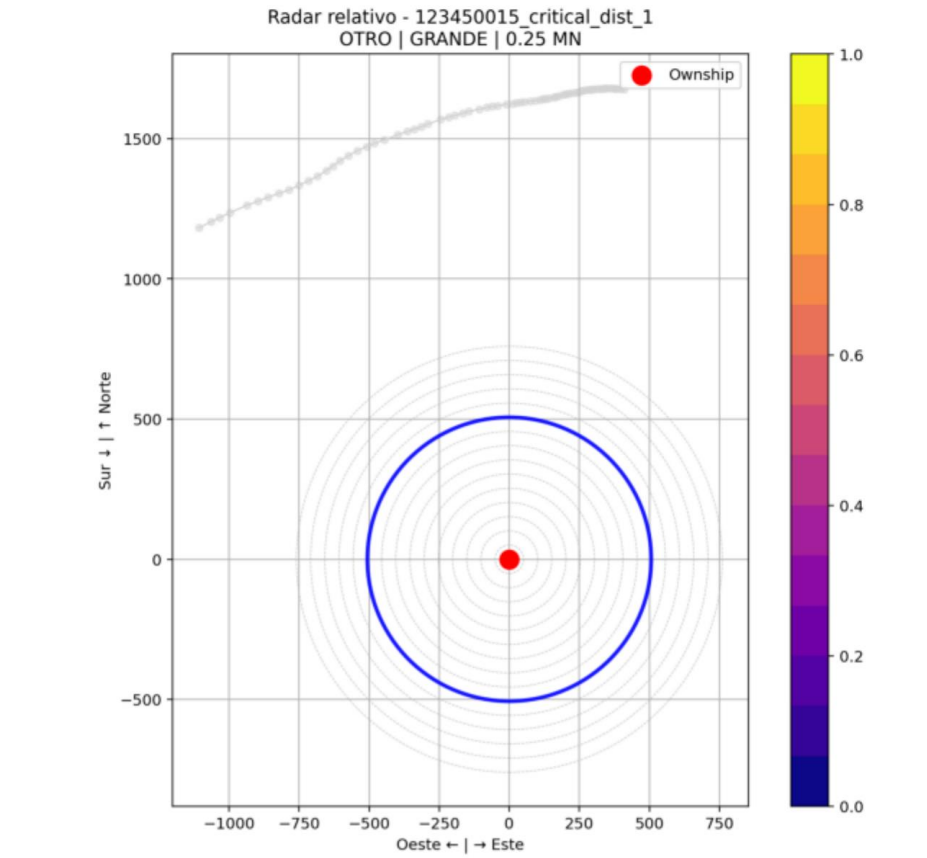
3.2.1 Representación espacial – critical_dist_1

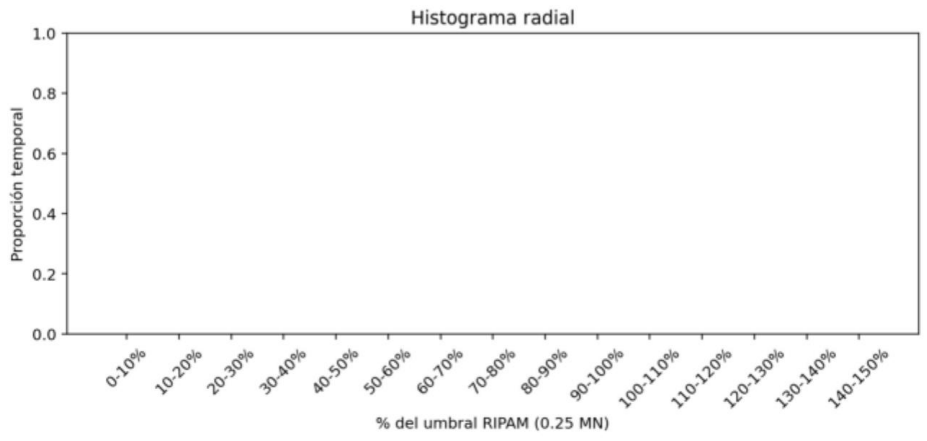
Visualización radar relativa y carta Mercator asociada al evento.



3.2.1 Histograma de distancias – critical_dist_1

Distribución temporal de distancia al contacto respecto al umbral recomendado.





Página 12

3.2.1 Evaluación del evento – critical_dist_1

Criterios, indicadores y penalizaciones (Sí/No).

NOTA FINAL: 9.3/10 → SEGURA

Criterios empleados:

- RIPAM: FONDEADO
- Tamaño: GRANDE
- Distancia mínima: 0.75 MN
- Rango permitido: [0.25, 0.50] MN

Maniobra:

- Obligación: COND
- ¿Hay que maniobrar?: No
- Maniobra realizada: Sí
- Banda: BABOR

Indicadores del histograma:

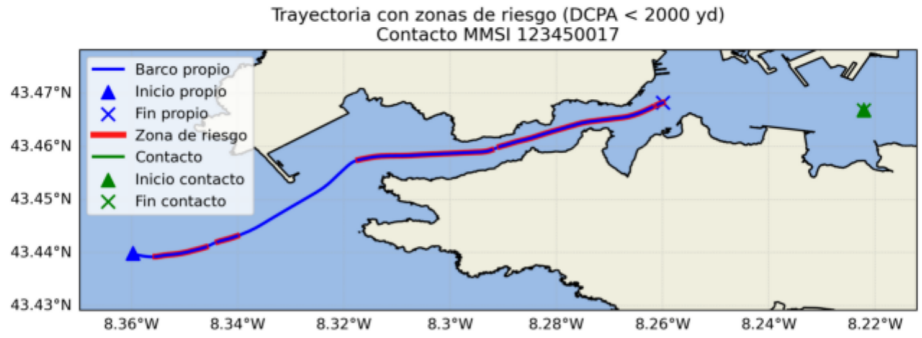
- Zona más cercana: 140_150 (prob=100.0%)
- % tiempo dentro del umbral (<100%): 0.0%
- % tiempo cumpliendo umbral (≥100%): 100.0%

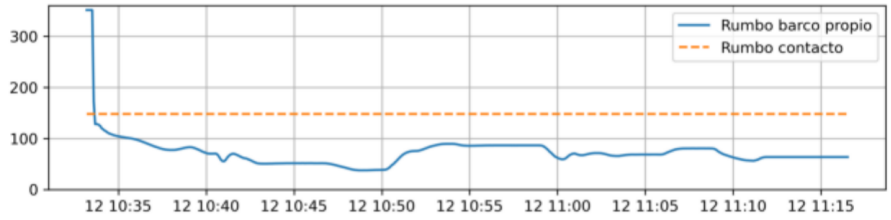
Penalizaciones:

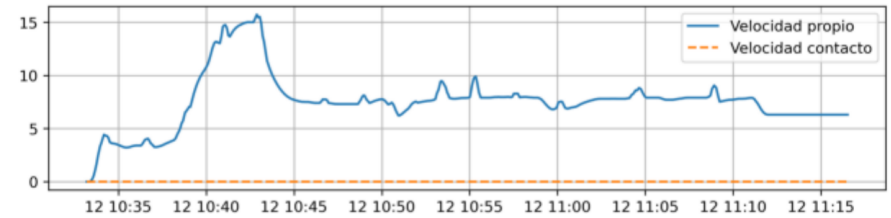
- CPA decreciente: No
- Corte de proa: No

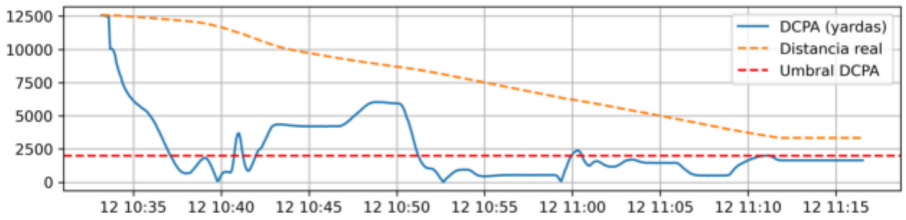
3.3 ANÁLISIS CONTACTO MMSI 123450017

Trayectoria completa y análisis cinemático del contacto.









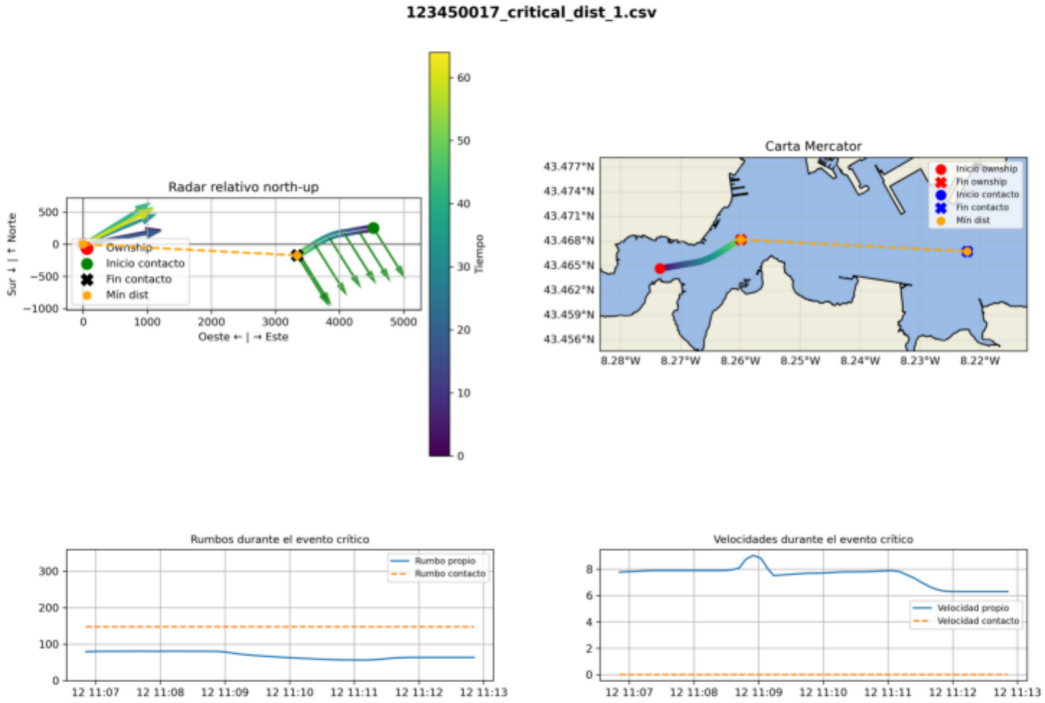
3.3.1 Evento crítico – critical_dist_1

Resumen paramétrico del evento detectado.

MMSI	**123450017**
RIPAM	FONDEADO
Dist mín (yd)	3342.3
DCPA mín (yd)	503.7
Corte de proa al contacto	NQR
Maniobra total	Sí
Maniobra rumbo	Sí
Maniobra velocidad	Sí
Δ rumbo neto (°)	**-17.2 BABOR**
Δ rumbo BABOR (°)	24.2
Δ rumbo ESTRIBOR (°)	7.0
Δ velocidad neta (kn)	**-1.07**
Δ aumento vel (kn)	1.46
Δ reducción vel (kn)	2.77
Tendencia velocidad	REDUCCION

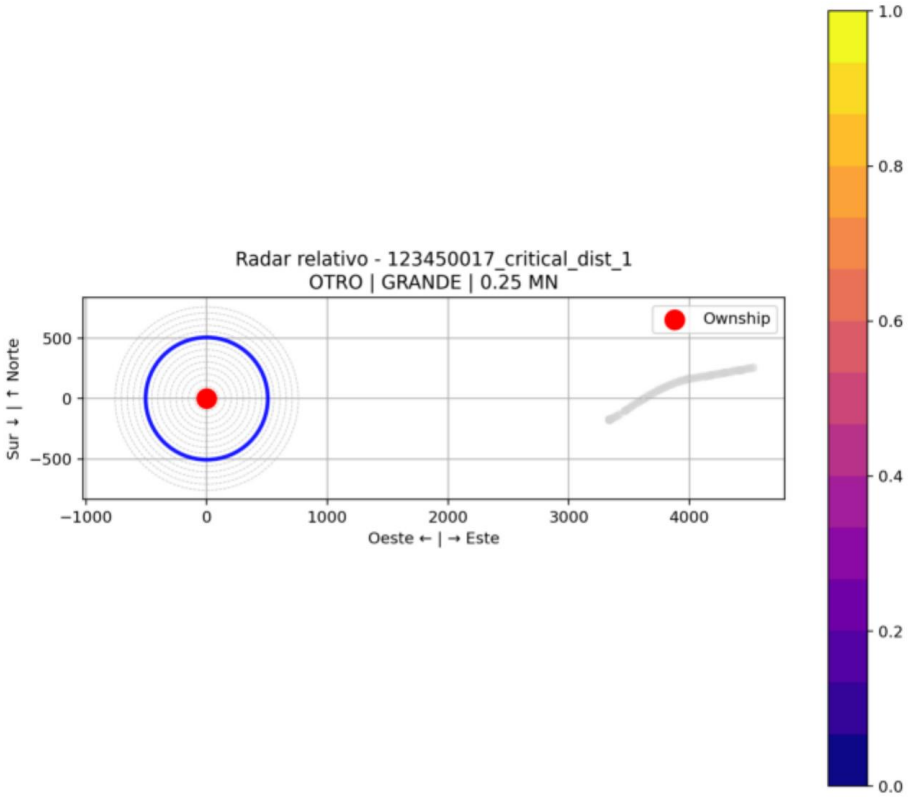
3.3.1 Representación espacial – critical_dist_1

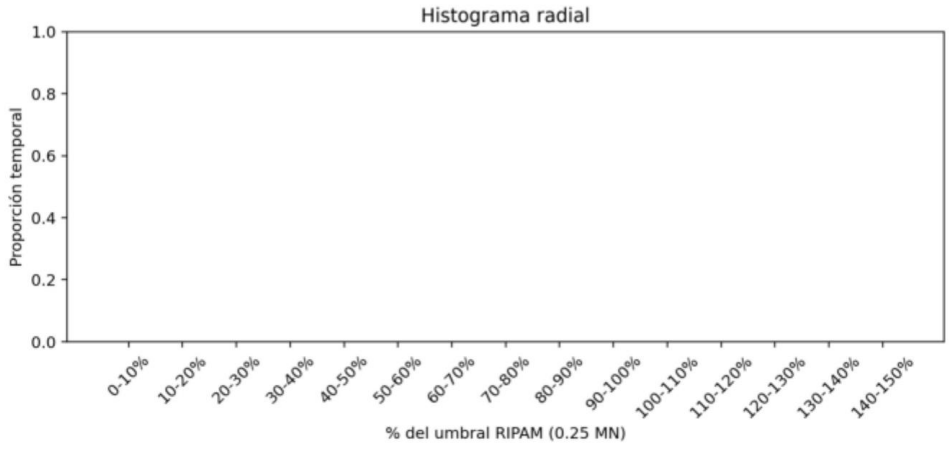
Visualización radar relativa y carta Mercator asociada al evento.



3.3.1 Histograma de distancias – critical_dist_1

Distribución temporal de distancia al contacto respecto al umbral recomendado.





3.3.1 Evaluación del evento – critical_dist_1

Criterios, indicadores y penalizaciones (Sí/No).

NOTA FINAL: 9.3/10 → SEGURA

Criterios empleados:

- RIPAM: FONDEADO
- Tamaño: GRANDE
- Distancia mínima: 1.65 MN
- Rango permitido: [0.25, 0.50] MN

Maniobra:

- Obligación: COND
- ¿Hay que maniobrar?: No
- Maniobra realizada: Sí
- Banda: BABOR

Indicadores del histograma:

- Zona más cercana: 140_150 (prob=100.0%)
- % tiempo dentro del umbral (<100%): 0.0%
- % tiempo cumpliendo umbral (≥100%): 100.0%

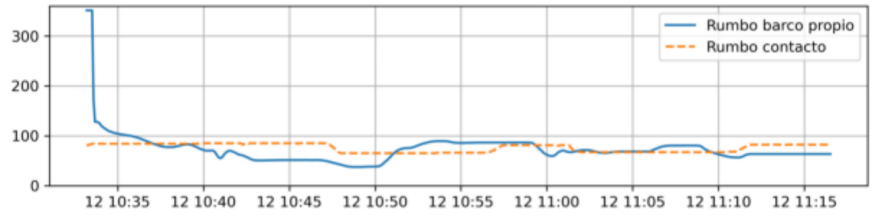
Penalizaciones:

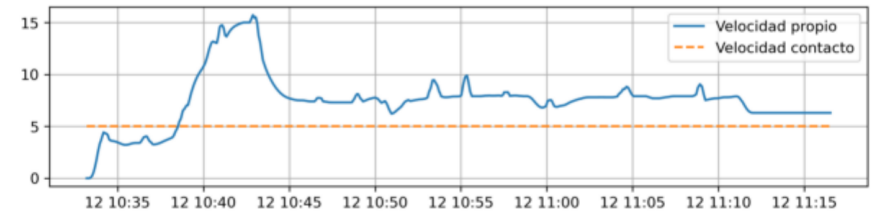
- CPA decreciente: No
- Corte de proa: No

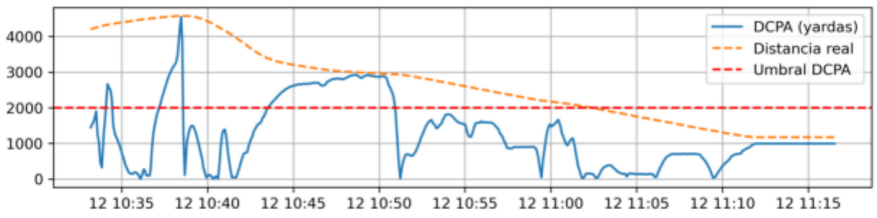
3.4 ANÁLISIS CONTACTO MMSI 123450020

Trayectoria completa y análisis cinemático del contacto.









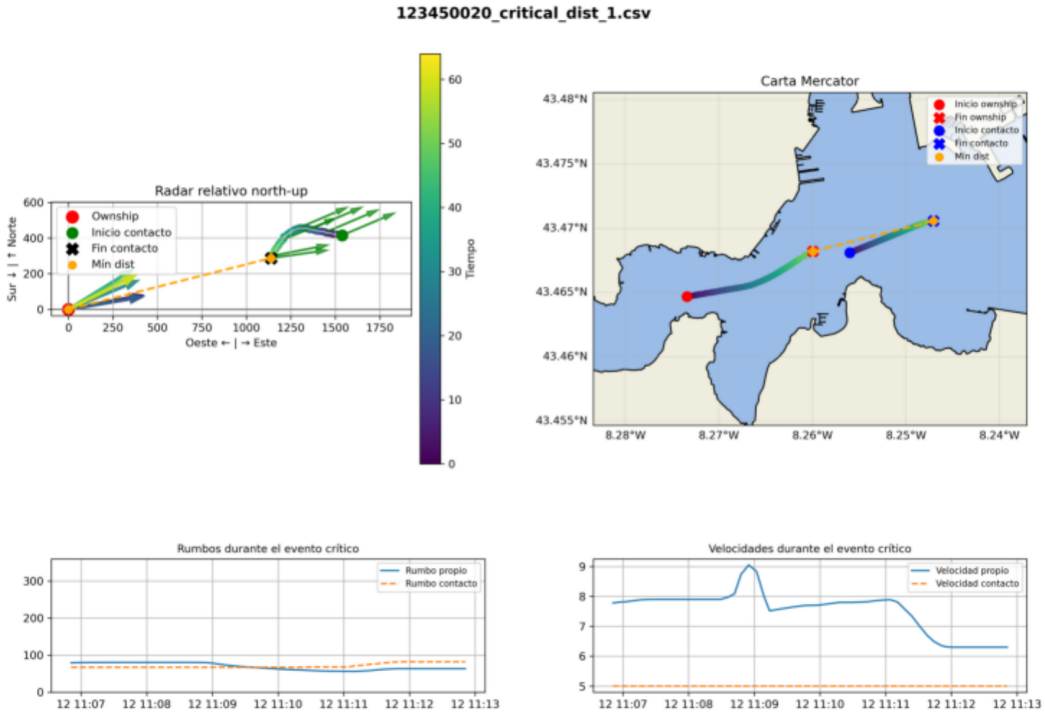
3.4.1 Evento crítico – critical_dist_1

Resumen paramétrico del evento detectado.

MMSI	**123450020**
RIPAM	ALCANZANDO
Dist mín (yd)	1174.4
DCPA mín (yd)	37.4
Corte de proa al contacto	No
Maniobra total	Sí
Maniobra rumbo	Sí
Maniobra velocidad	Sí
Δ rumbo neto (°)	**4.1 ESTRIBOR**
Δ rumbo BABOR (°)	2.4
Δ rumbo ESTRIBOR (°)	6.5
Δ velocidad neta (kn)	**-1.03**
Δ aumento vel (kn)	0.07
Δ reducción vel (kn)	1.36
Tendencia velocidad	REDUCCION

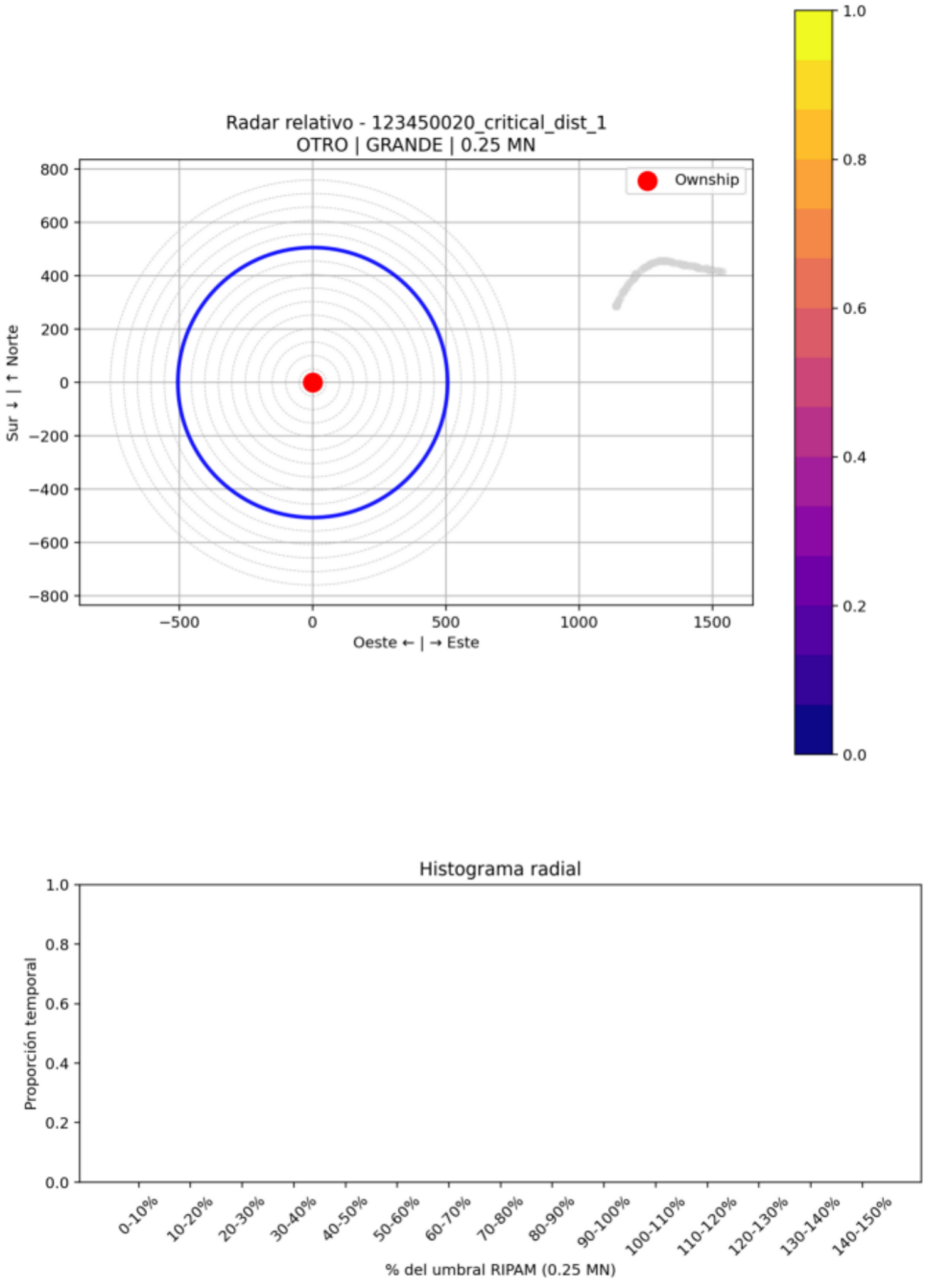
3.4.1 Representación espacial – critical_dist_1

Visualización radar relativa y carta Mercator asociada al evento.



3.4.1 Histograma de distancias – critical_dist_1

Distribución temporal de distancia al contacto respecto al umbral recomendado.



Página 22

3.4.1 Evaluación del evento – critical_dist_1

Criterios, indicadores y penalizaciones (Sí/No).

NOTA FINAL: 10.0/10 → SEGURA

Criterios empleados:

- RIPAM: ALCANZANDO
- Tamaño: GRANDE
- Distancia mínima: 0.58 MN
- Rango permitido: [0.25, 0.50] MN

Maniobra:

- Obligación: YES
- ¿Hay que maniobrar?: Sí
- Maniobra realizada: Sí
- Banda: ESTRIBOR

Indicadores del histograma:

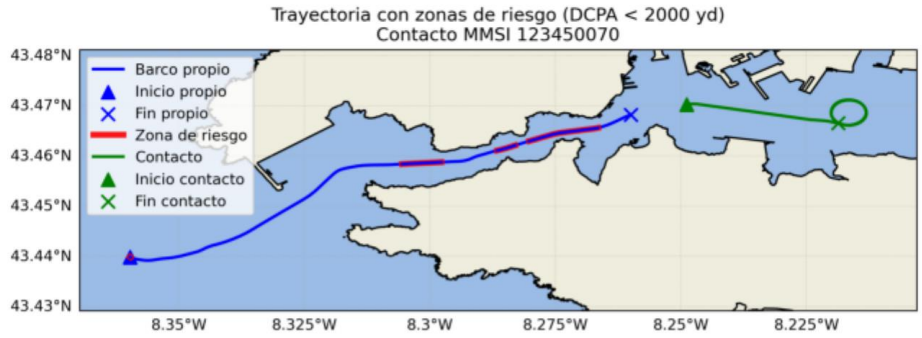
- Zona más cercana: 140_150 (prob=100.0%)
- % tiempo dentro del umbral (<100%): 0.0%
- % tiempo cumpliendo umbral (≥100%): 100.0%

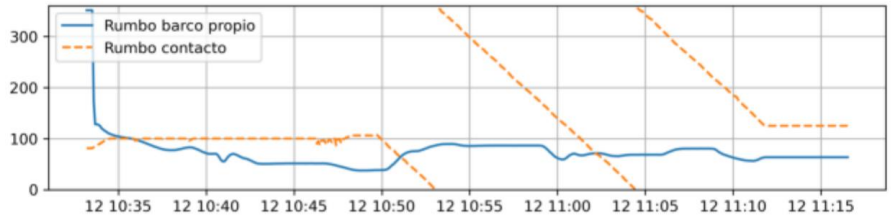
Penalizaciones:

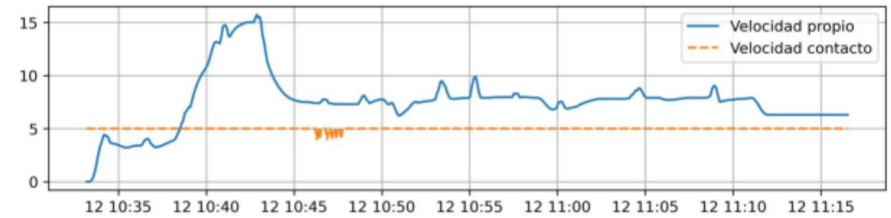
- CPA decreciente: No
- Corte de proa: No

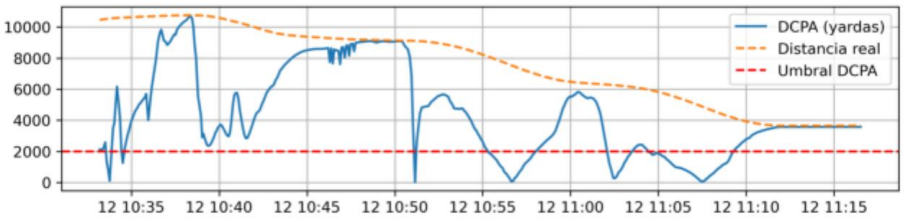
3.5 ANÁLISIS CONTACTO MMSI 123450070

Trayectoria completa y análisis cinemático del contacto.









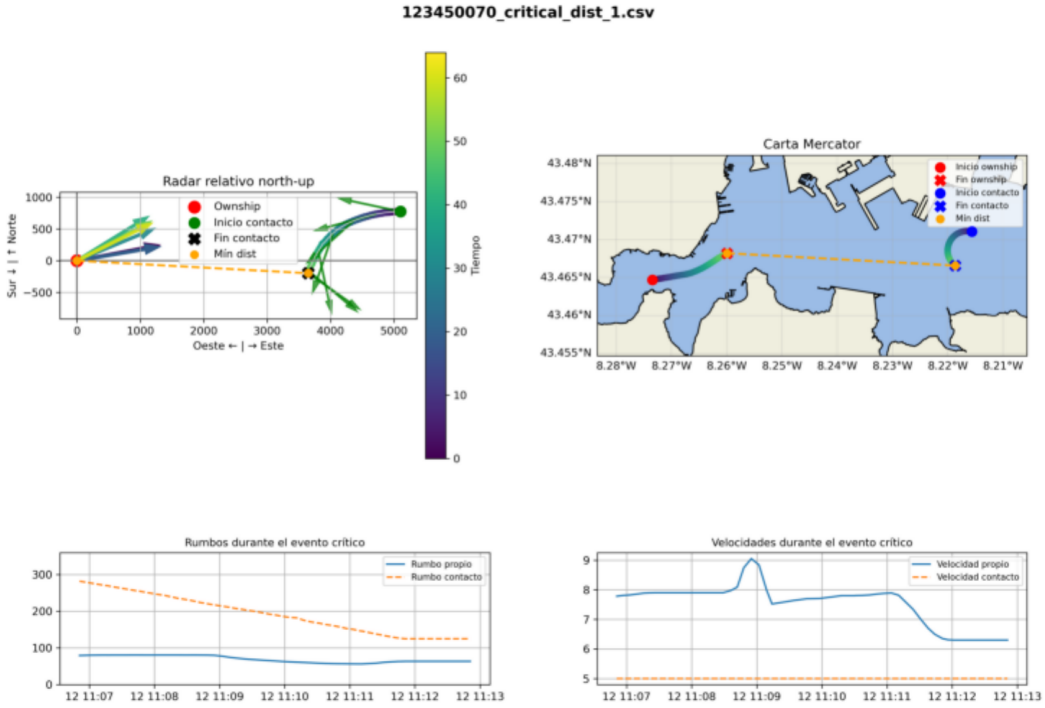
3.5.1 Evento crítico – critical_dist_1

Resumen paramétrico del evento detectado.

MMSI	**123450070**
RIPAM	CRUCE_ER_ER
Dist mín (yd)	3653.0
DCPA mín (yd)	50.0
Corte de proa al contacto	Sí
Maniobra total	Sí
Maniobra rumbo	Sí
Maniobra velocidad	Sí
Δ rumbo neto (°)	**-17.2 BABOR**
Δ rumbo BABOR (°)	24.2
Δ rumbo ESTRIBOR (°)	7.0
Δ velocidad neta (kn)	**-1.07**
Δ aumento vel (kn)	1.46
Δ reducción vel (kn)	2.77
Tendencia velocidad	REDUCCION

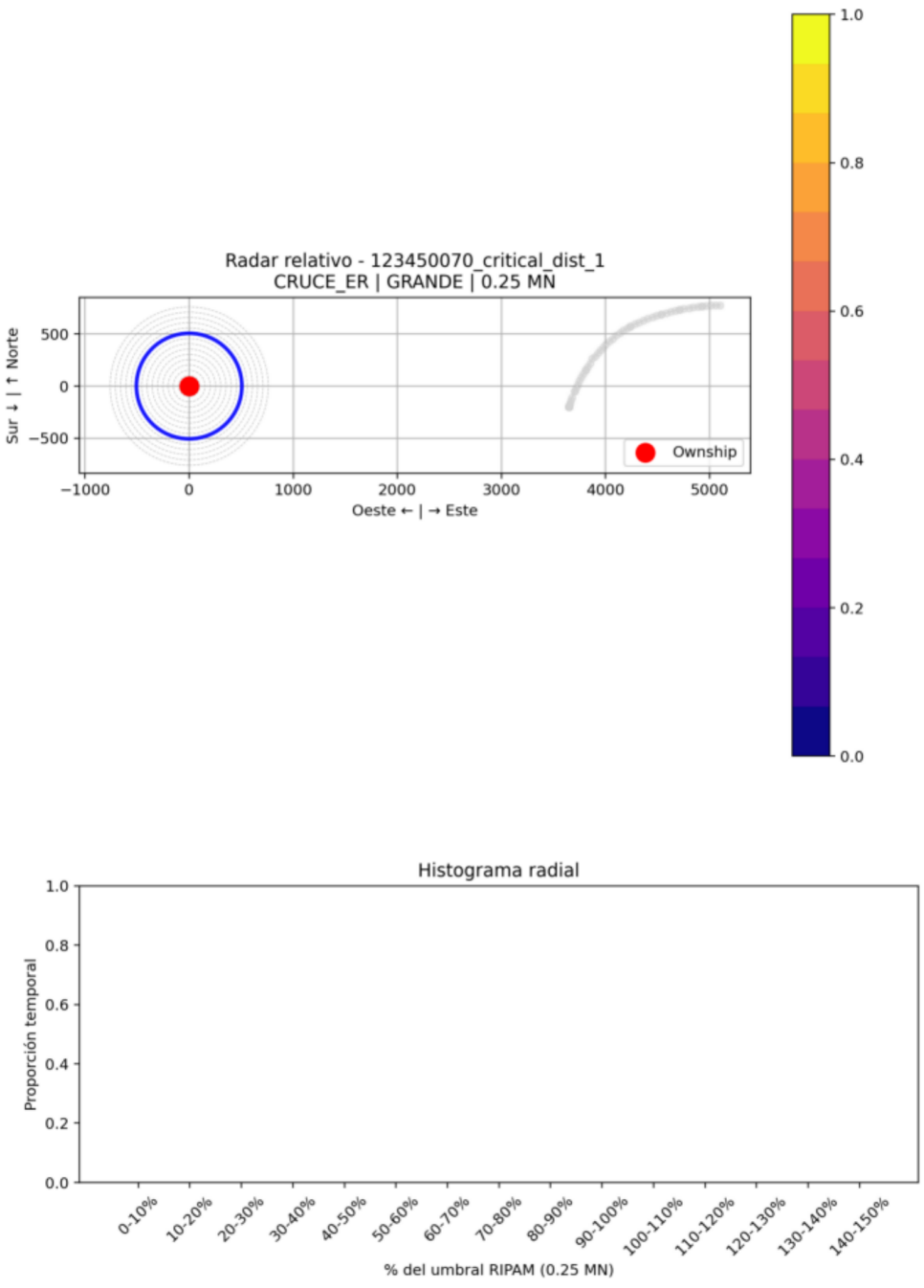
3.5.1 Representación espacial – critical_dist_1

Visualización radar relativa y carta Mercator asociada al evento.



3.5.1 Histograma de distancias – critical_dist_1

Distribución temporal de distancia al contacto respecto al umbral recomendado.



3.5.1 Evaluación del evento – critical_dist_1

Criterios, indicadores y penalizaciones (Sí/No).

NOTA FINAL: 7.2/10 → ACEPTABLE

Criterios empleados:

- RIPAM: CRUCE_ER
- Tamaño: GRANDE
- Distancia mínima: 1.80 MN
- Rango permitido: [0.25, 0.75] MN

Maniobra:

- Obligación: YES
- ¿Hay que maniobrar?: Sí
- Maniobra realizada: Sí
- Banda: BABOR

Indicadores del histograma:

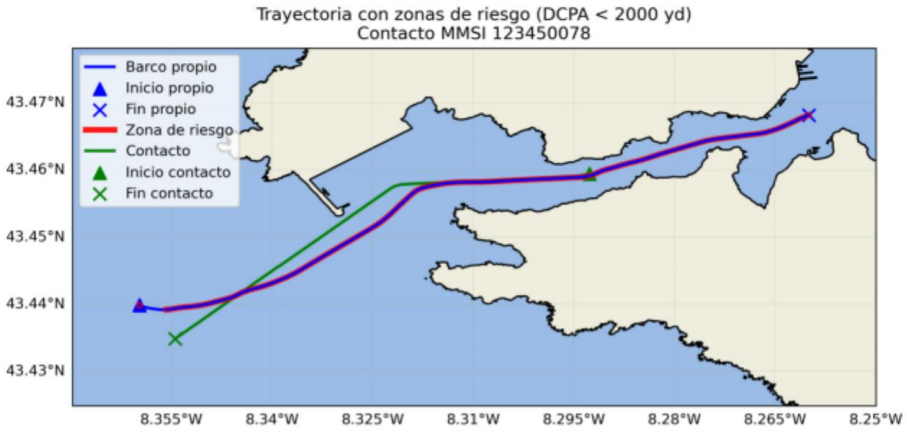
- Zona más cercana: 140_150 (prob=100.0%)
- % tiempo dentro del umbral (<100%): 0.0%
- % tiempo cumpliendo umbral (≥100%): 100.0%

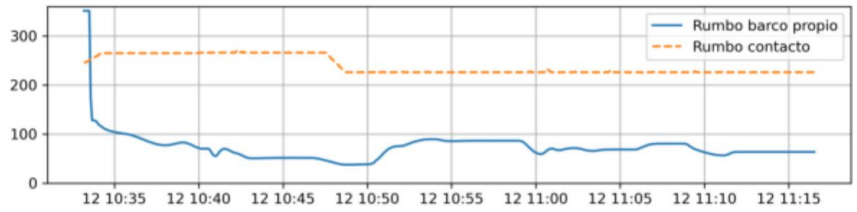
Penalizaciones:

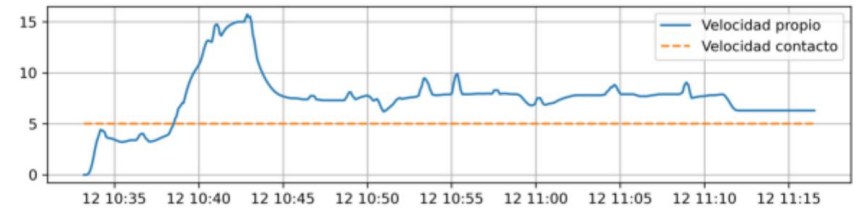
- CPA decreciente: No
- Corte de proa: Sí

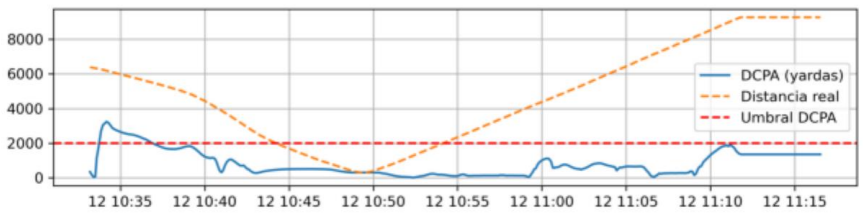
3.6 ANÁLISIS CONTACTO MMSI 123450078

Trayectoria completa y análisis cinemático del contacto.









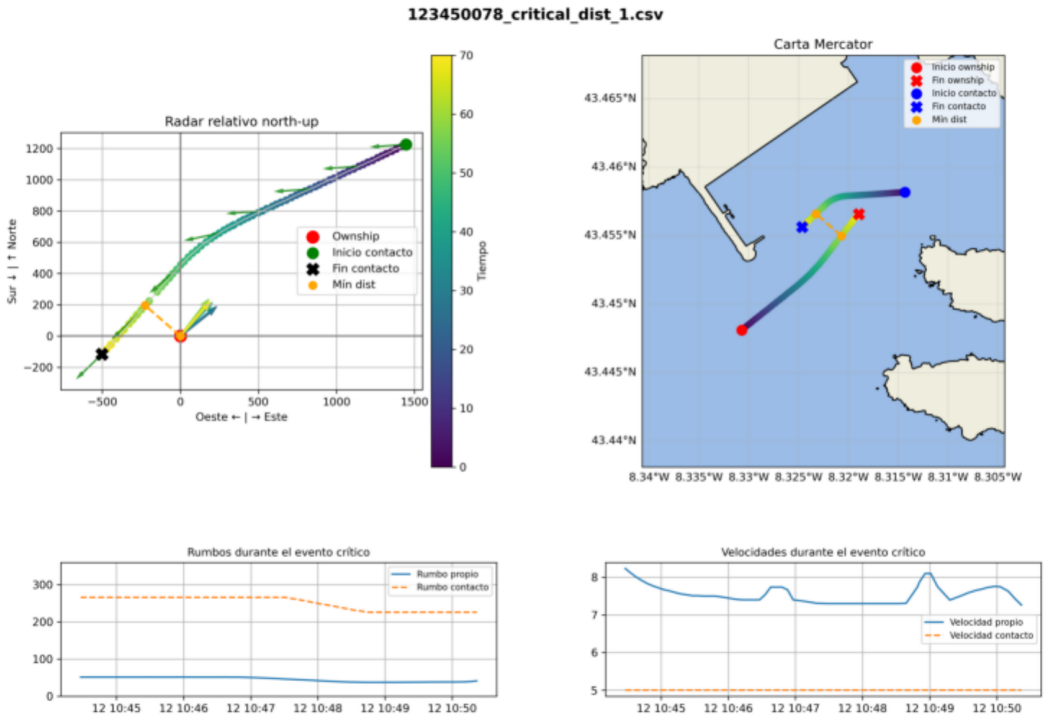
3.6.1 Evento crítico – critical_dist_1

Resumen paramétrico del evento detectado.

MMSI	**123450078**
RIPAM	CRUCE_BR_BR
Dist mín (yd)	298.9
DCPA mín (yd)	286.6
Corte de proa al contacto	No
Maniobra total	Sí
Maniobra rumbo	Sí
Maniobra velocidad	Sí
Δ rumbo neto (°)	**-13.7 BABOR**
Δ rumbo BABOR (°)	14.1
Δ rumbo ESTRIBOR (°)	0.4
Δ velocidad neta (kn)	**-0.17**
Δ aumento vel (kn)	1.07
Δ reducción vel (kn)	1.54
Tendencia velocidad	REDUCCION

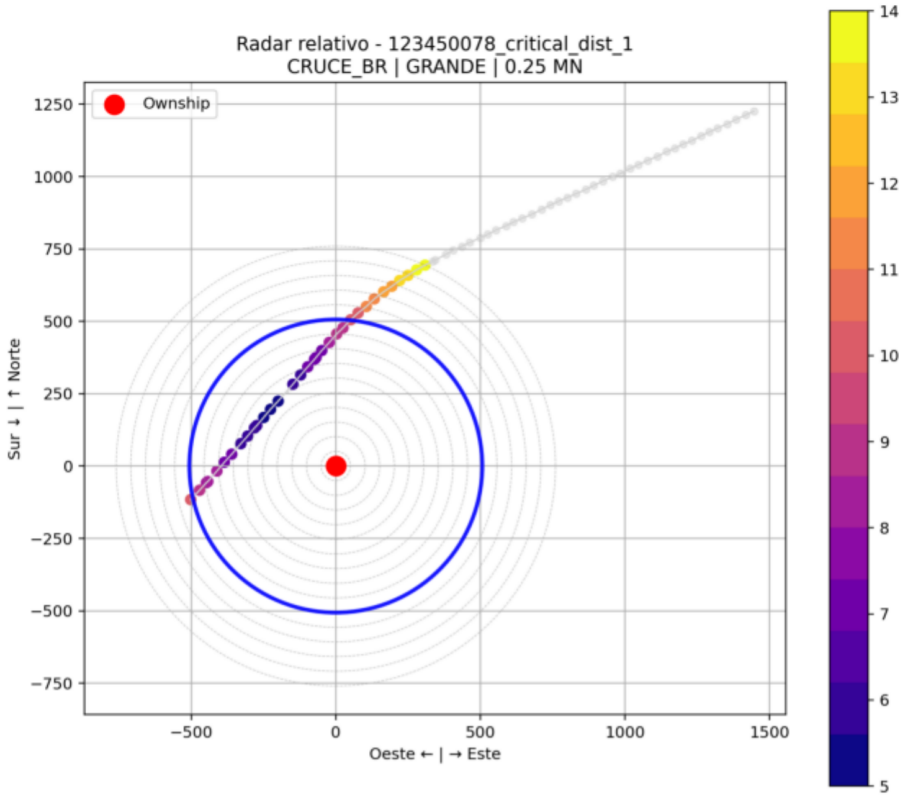
3.6.1 Representación espacial – critical_dist_1

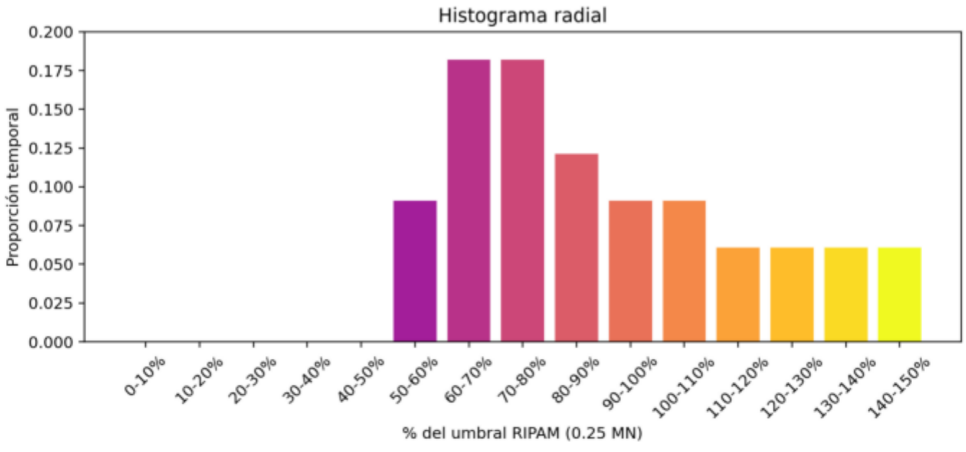
Visualización radar relativa y carta Mercator asociada al evento.



3.6.1 Histograma de distancias – critical_dist_1

Distribución temporal de distancia al contacto respecto al umbral recomendado.





3.6.1 Evaluación del evento – critical_dist_1

Criterios, indicadores y penalizaciones (Sí/No).

NOTA FINAL: 0.7/10 → PELIGROSA

Criterios empleados:

- RIPAM: CRUCE_BR_BR
- Tamaño: GRANDE
- Distancia mínima: 0.15 MN
- Rango permitido: [0.25, 0.50] MN

Maniobra:

- Obligación: NO
- ¿Hay que maniobrar?: No
- Maniobra realizada: Sí
- Banda: BABOR

Indicadores del histograma:

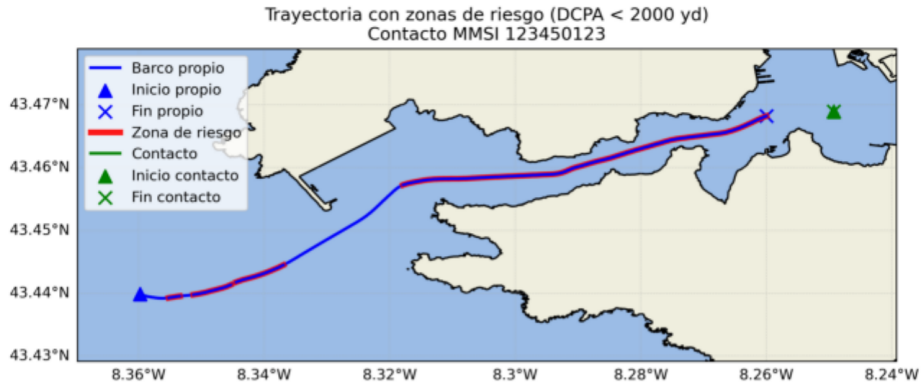
- Zona más cercana: 50_60 (prob=4.5%)
- % tiempo dentro del umbral (<100%): 31.8%
- % tiempo cumpliendo umbral (≥100%): 68.2%

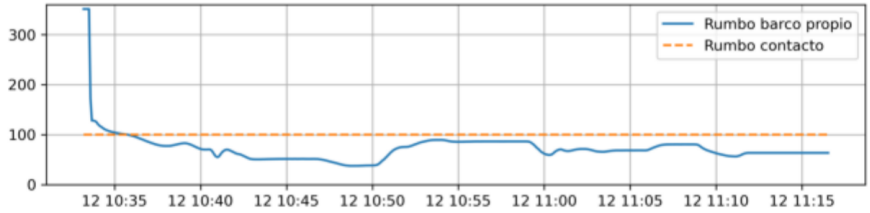
Penalizaciones:

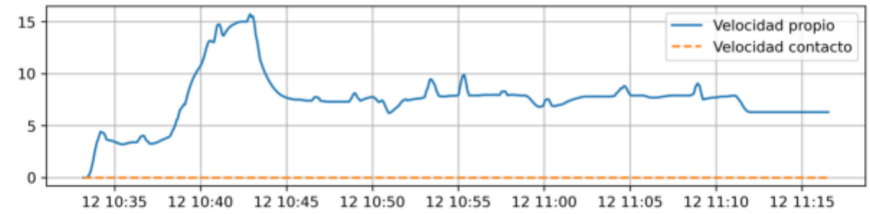
- CPA decreciente: Sí
- Corte de proa: No

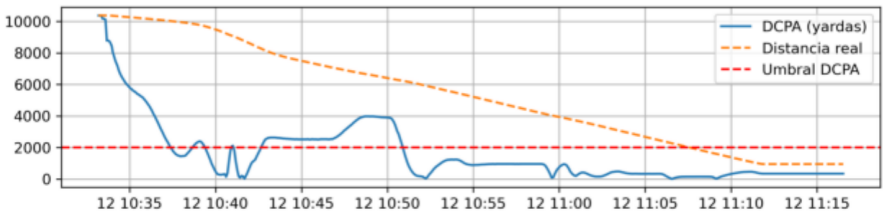
3.7 ANÁLISIS CONTACTO MMSI 123450123

Trayectoria completa y análisis cinemático del contacto.









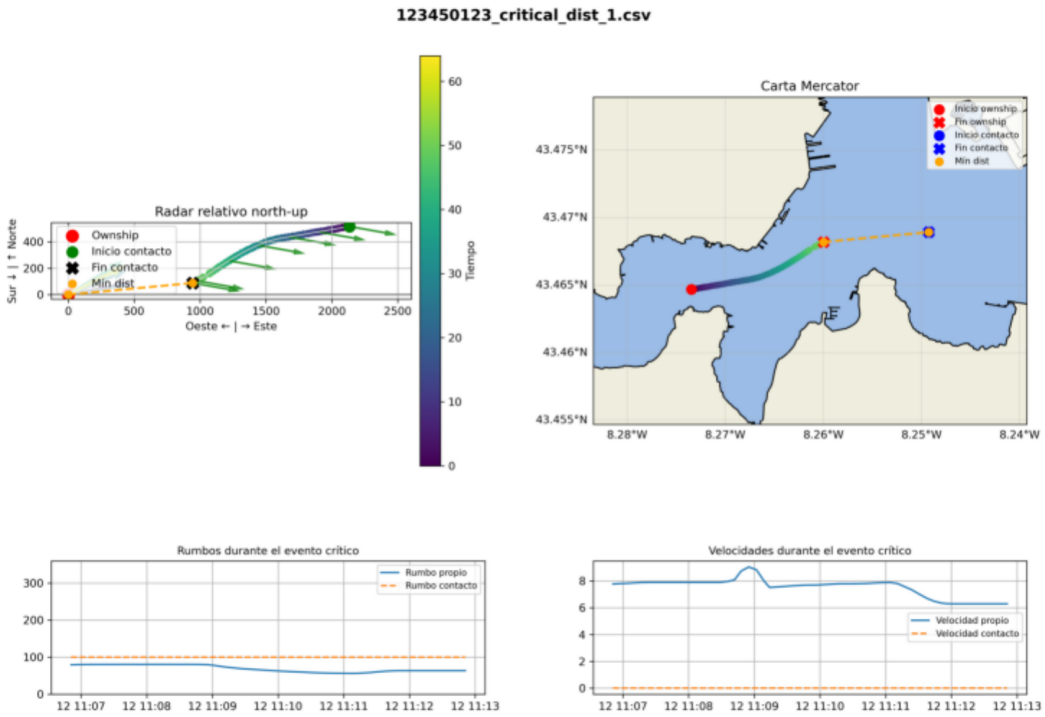
3.7.1 Evento crítico – critical_dist_1

Resumen paramétrico del evento detectado.

MMSI	**123450123**
RIPAM	FONDEADO
Dist mín (yd)	948.9
DCPA mín (yd)	18.4
Corte de proa al contacto	NQR
Maniobra total	Sí
Maniobra rumbo	Sí
Maniobra velocidad	Sí
Δ rumbo neto (°)	**-17.2 BABOR**
Δ rumbo BABOR (°)	24.2
Δ rumbo ESTRIBOR (°)	7.0
Δ velocidad neta (kn)	**-1.07**
Δ aumento vel (kn)	1.46
Δ reducción vel (kn)	2.77
Tendencia velocidad	REDUCCION

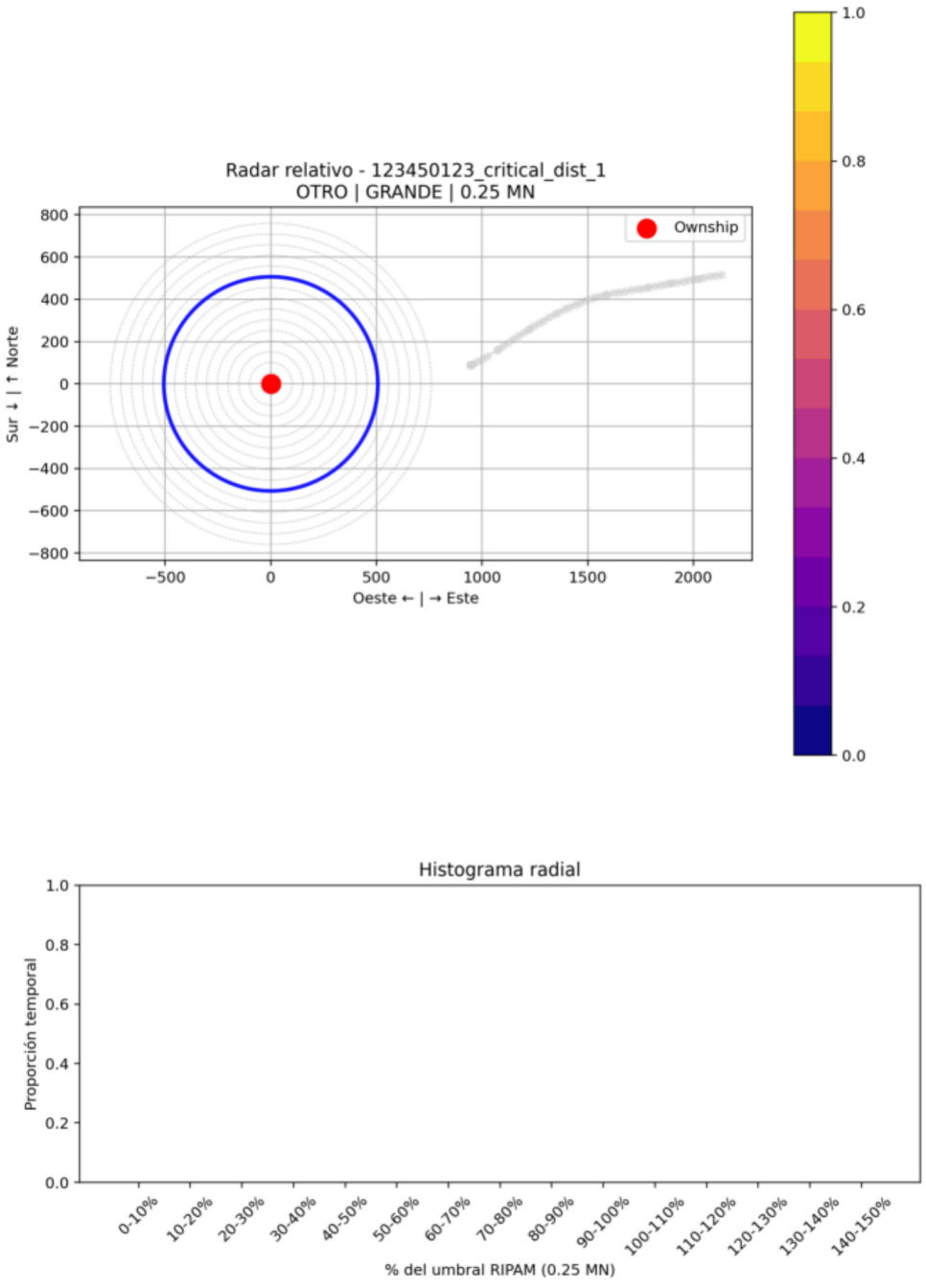
3.7.1 Representación espacial – critical_dist_1

Visualización radar relativa y carta Mercator asociada al evento.



3.7.1 Histograma de distancias – critical_dist_1

Distribución temporal de distancia al contacto respecto al umbral recomendado.



3.7.1 Evaluación del evento – critical_dist_1

Criterios, indicadores y penalizaciones (Sí/No).

NOTA FINAL: 9.3/10 → SEGURA

Criterios empleados:

- RIPAM: FONDEADO
- Tamaño: GRANDE
- Distancia mínima: 0.47 MN
- Rango permitido: [0.25, 0.50] MN

Maniobra:

- Obligación: COND
- ¿Hay que maniobrar?: No
- Maniobra realizada: Sí
- Banda: BABOR

Indicadores del histograma:

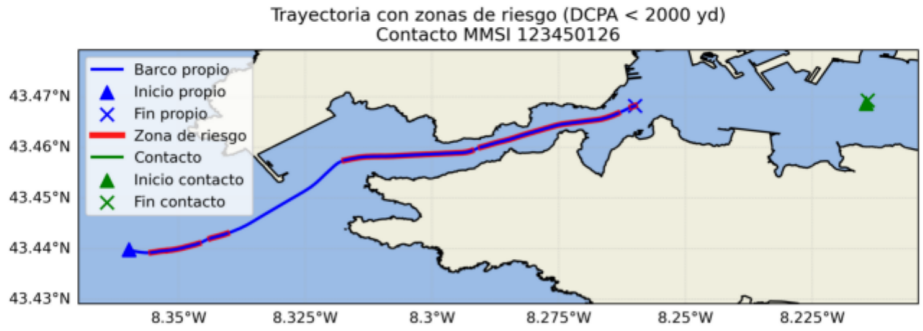
- Zona más cercana: 140_150 (prob=100.0%)
- % tiempo dentro del umbral (<100%): 0.0%
- % tiempo cumpliendo umbral (≥100%): 100.0%

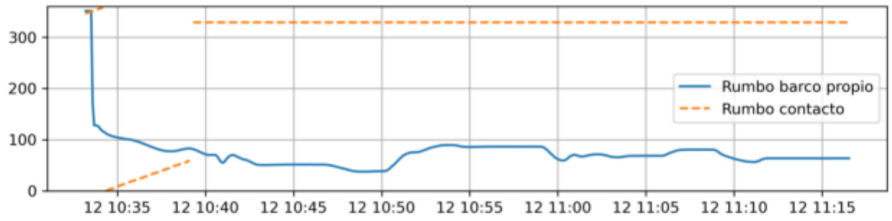
Penalizaciones:

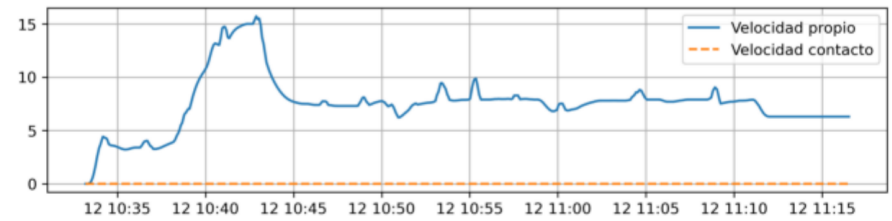
- CPA decreciente: No
- Corte de proa: No

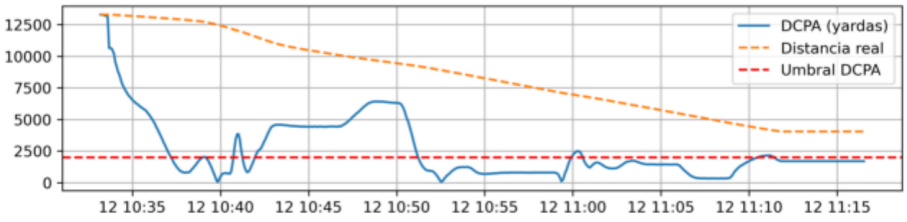
3.8 ANÁLISIS CONTACTO MMSI 123450126

Trayectoria completa y análisis cinemático del contacto.









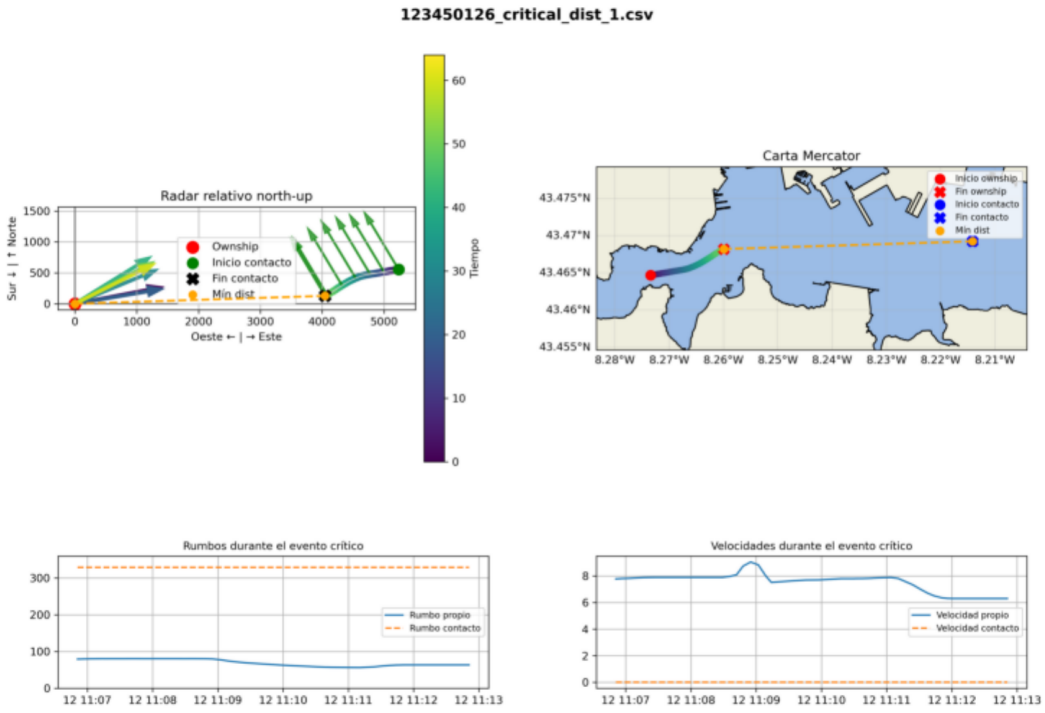
3.8.1 Evento crítico – critical_dist_1

Resumen paramétrico del evento detectado.

MMSI	**123450126**
RIPAM	FONDEADO
Dist mín (yd)	4049.2
DCPA mín (yd)	326.8
Corte de proa al contacto	NQR
Maniobra total	Sí
Maniobra rumbo	Sí
Maniobra velocidad	Sí
Δ rumbo neto (°)	**-17.2 BABOR**
Δ rumbo BABOR (°)	24.2
Δ rumbo ESTRIBOR (°)	7.0
Δ velocidad neta (kn)	**-1.07**
Δ aumento vel (kn)	1.46
Δ reducción vel (kn)	2.77
Tendencia velocidad	REDUCCION

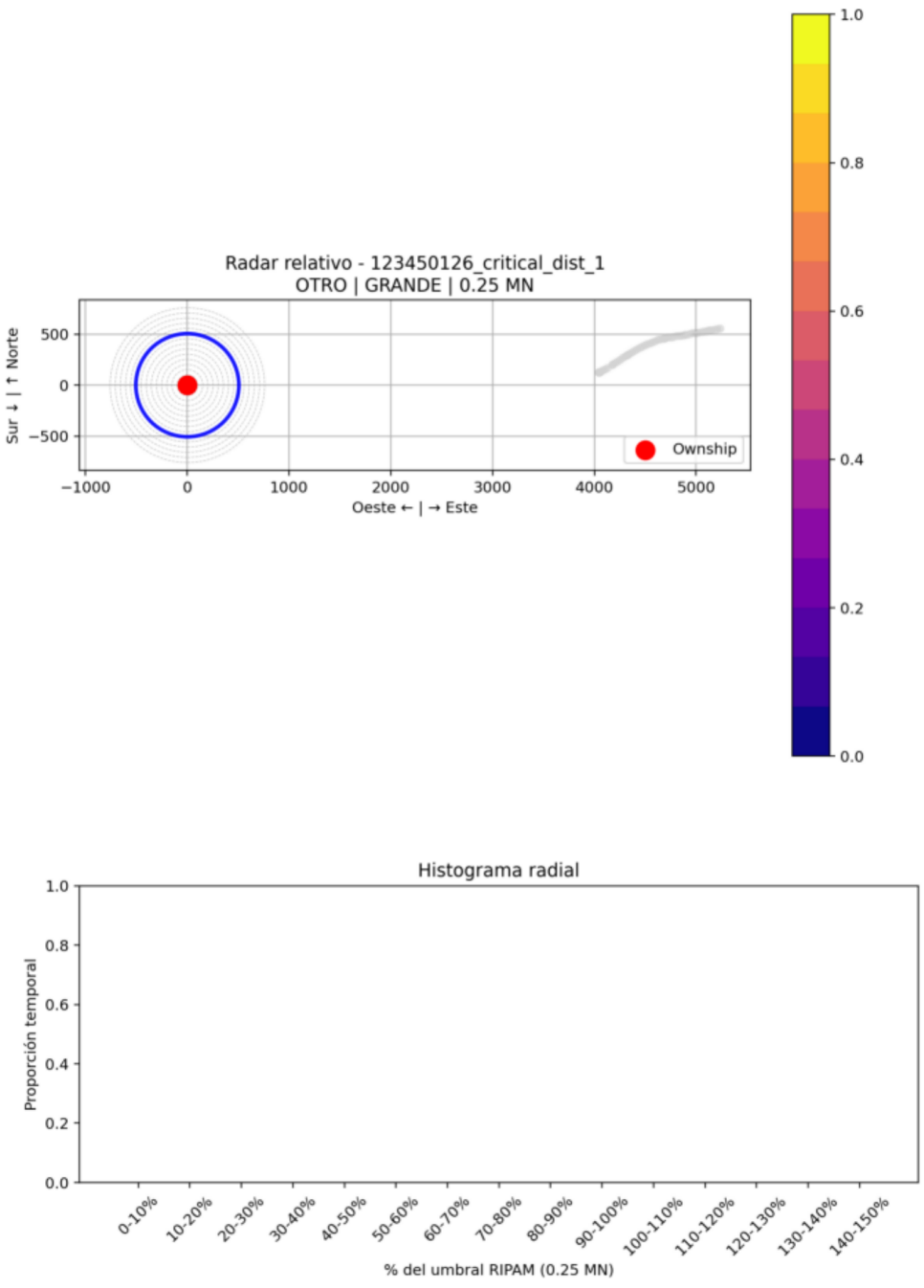
3.8.1 Representación espacial – critical_dist_1

Visualización radar relativa y carta Mercator asociada al evento.



3.8.1 Histograma de distancias – critical_dist_1

Distribución temporal de distancia al contacto respecto al umbral recomendado.



3.8.1 Evaluación del evento – critical_dist_1

Criterios, indicadores y penalizaciones (Sí/No).

NOTA FINAL: 9.3/10 → SEGURA

Criterios empleados:

- RIPAM: FONDEADO
- Tamaño: GRANDE
- Distancia mínima: 2.00 MN
- Rango permitido: [0.25, 0.50] MN

Maniobra:

- Obligación: COND
- ¿Hay que maniobrar?: No
- Maniobra realizada: Sí
- Banda: BABOR

Indicadores del histograma:

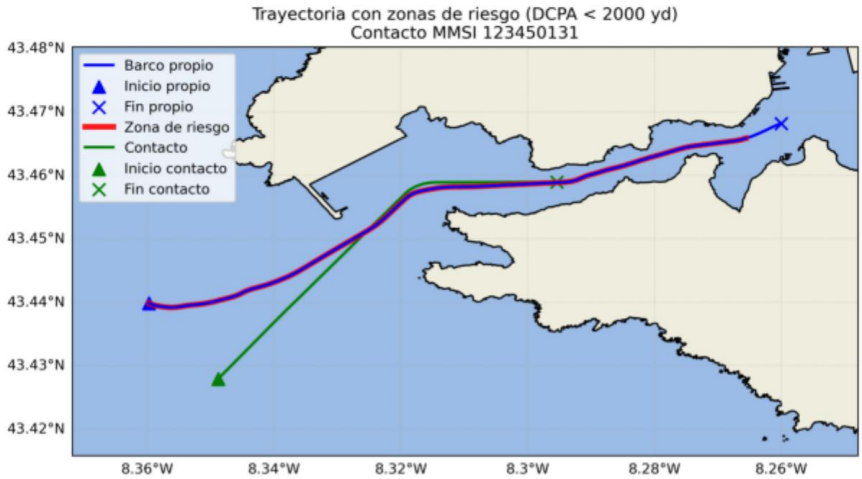
- Zona más cercana: 140_150 (prob=100.0%)
- % tiempo dentro del umbral (<100%): 0.0%
- % tiempo cumpliendo umbral (≥100%): 100.0%

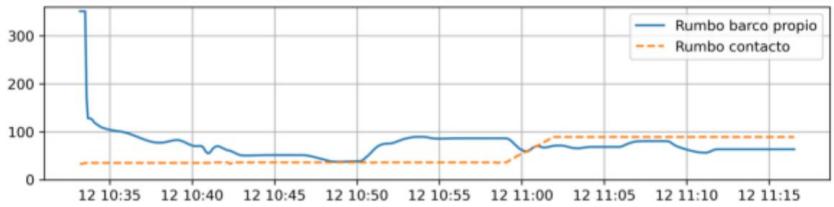
Penalizaciones:

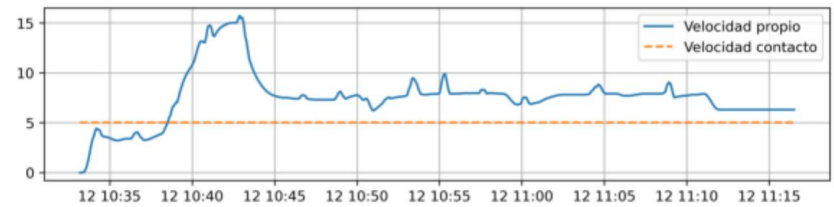
- CPA decreciente: No
- Corte de proa: No

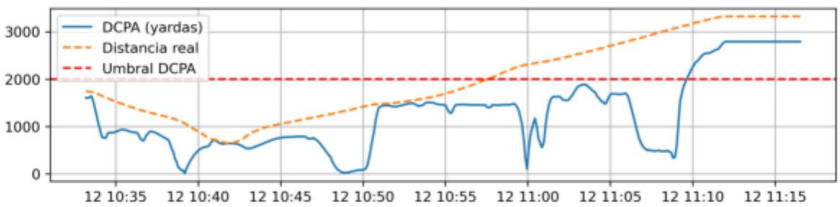
3.9 ANÁLISIS CONTACTO MMSI 123450131

Trayectoria completa y análisis cinemático del contacto.



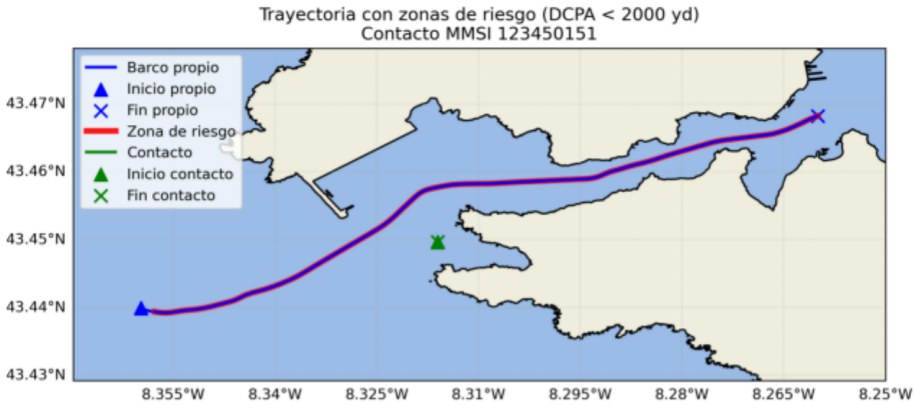


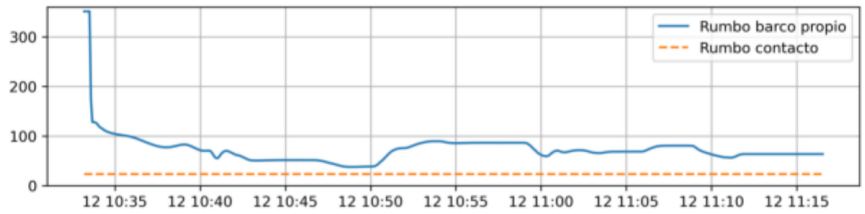


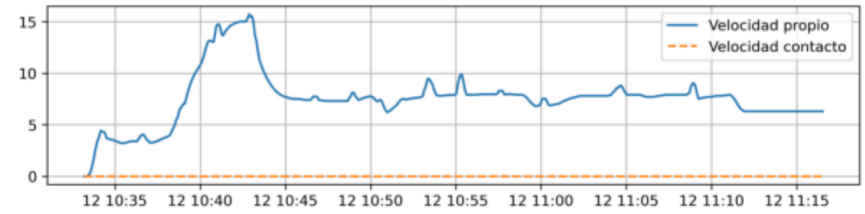


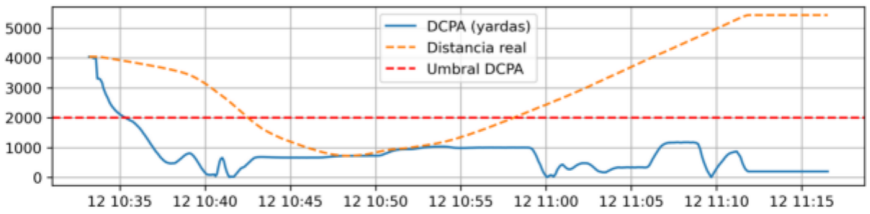
3.10 ANÁLISIS CONTACTO MMSI 123450151

Trayectoria completa y análisis cinemático del contacto.









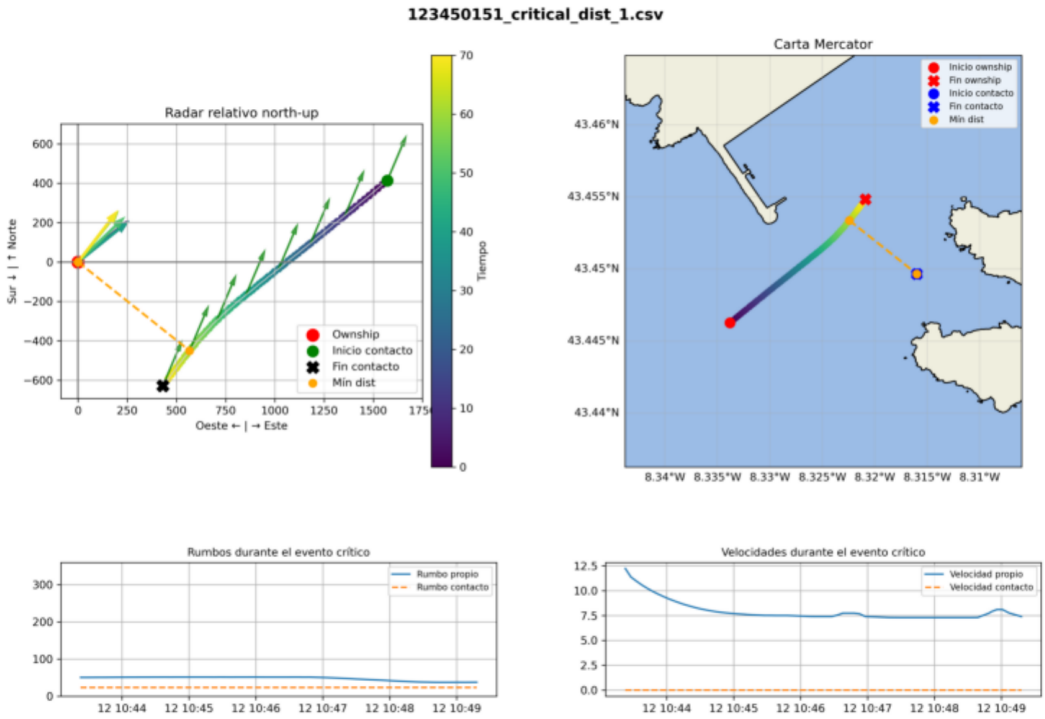
3.10.1 Evento crítico – critical_dist_1

Resumen paramétrico del evento detectado.

MMSI	**123450151**
RIPAM	FONDEADO
Dist mín (yd)	723.4
DCPA mín (yd)	660.9
Corte de proa al contacto	NQR
Maniobra total	Sí
Maniobra rumbo	Sí
Maniobra velocidad	Sí
Δ rumbo neto (°)	**-11.3 BABOR**
Δ rumbo BABOR (°)	12.2
Δ rumbo ESTRIBOR (°)	1.0
Δ velocidad neta (kn)	**-3.30**
Δ aumento vel (kn)	0.34
Δ reducción vel (kn)	4.00
Tendencia velocidad	REDUCCION

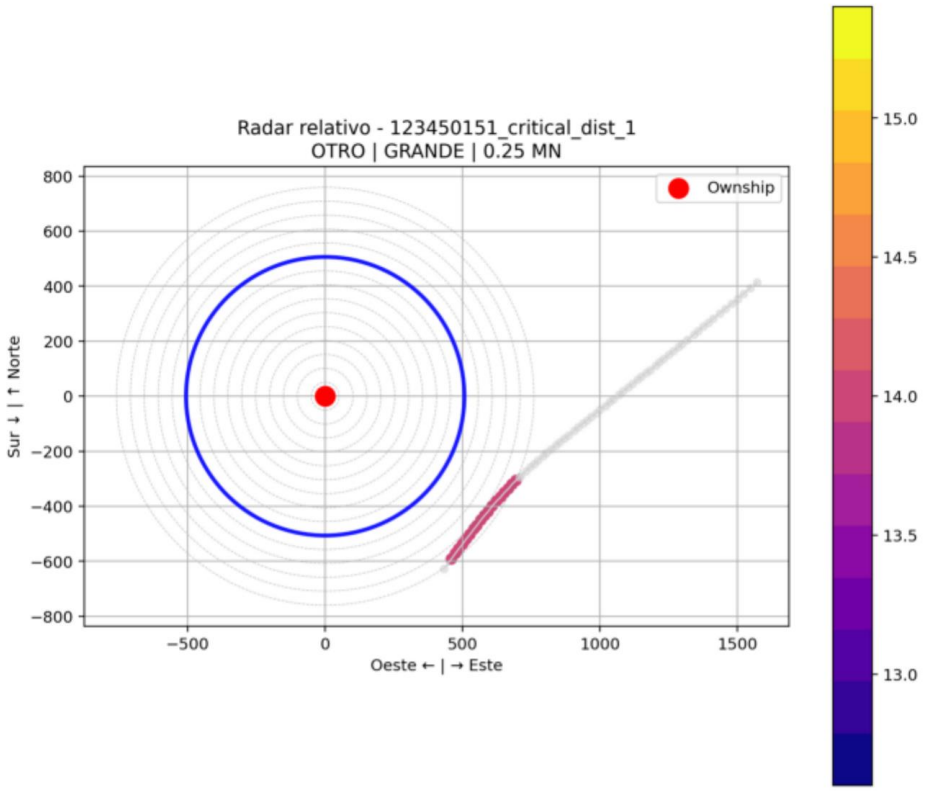
3.10.1 Representación espacial – critical_dist_1

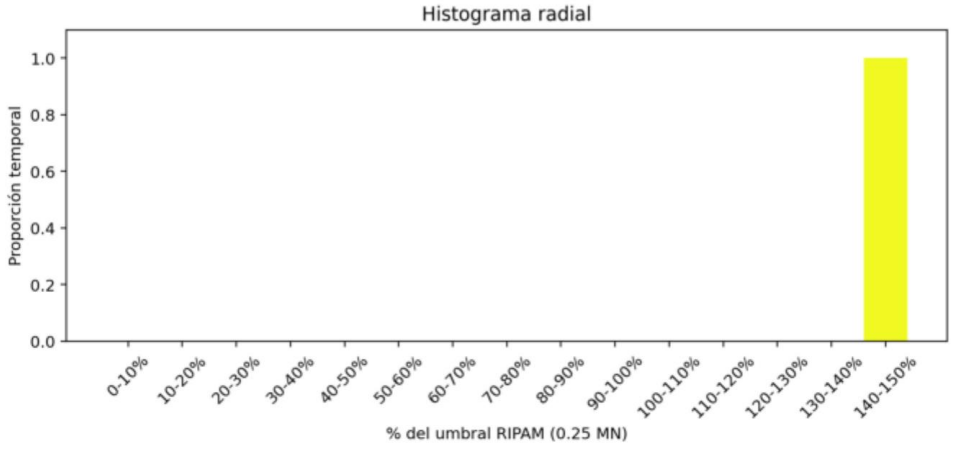
Visualización radar relativa y carta Mercator asociada al evento.



3.10.1 Histograma de distancias – critical_dist_1

Distribución temporal de distancia al contacto respecto al umbral recomendado.





3.10.1 Evaluación del evento – critical_dist_1

Criterios, indicadores y penalizaciones (Sí/No).

NOTA FINAL: 9.3/10 → SEGURA

Criterios empleados:

- RIPAM: FONDEADO
- Tamaño: GRANDE
- Distancia mínima: 0.36 MN
- Rango permitido: [0.25, 0.50] MN

Maniobra:

- Obligación: COND
- ¿Hay que maniobrar?: No
- Maniobra realizada: Sí
- Banda: BABOR

Indicadores del histograma:

- Zona más cercana: 140_150 (prob=100.0%)
- % tiempo dentro del umbral (<100%): 0.0%
- % tiempo cumpliendo umbral (≥100%): 100.0%

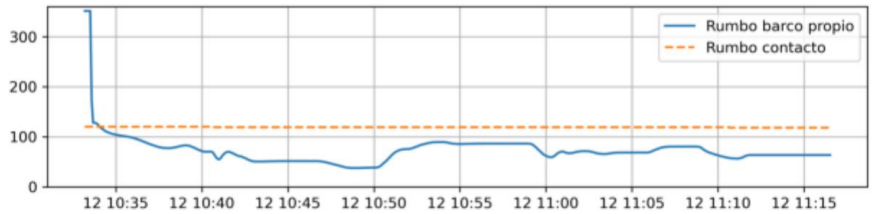
Penalizaciones:

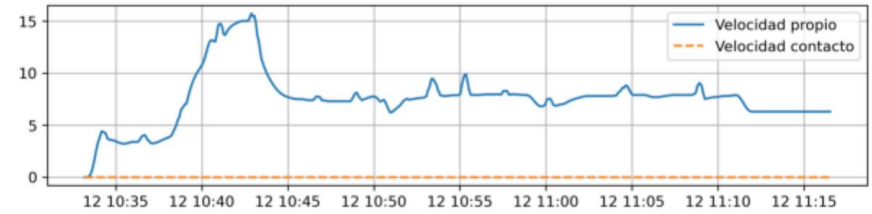
- CPA decreciente: No
- Corte de proa: No

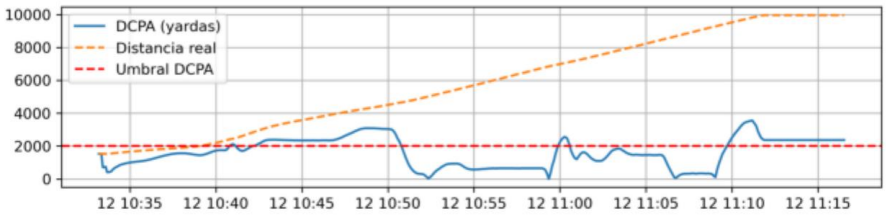
3.11 ANÁLISIS CONTACTO MMSI 123450158

Trayectoria completa y análisis cinemático del contacto.





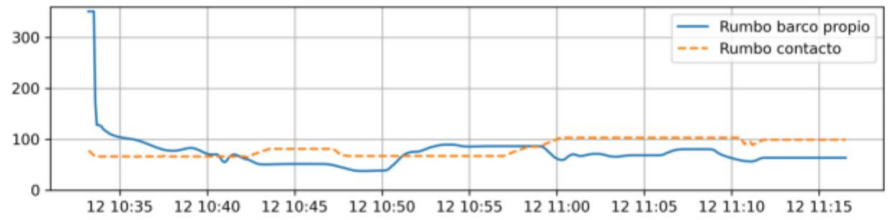


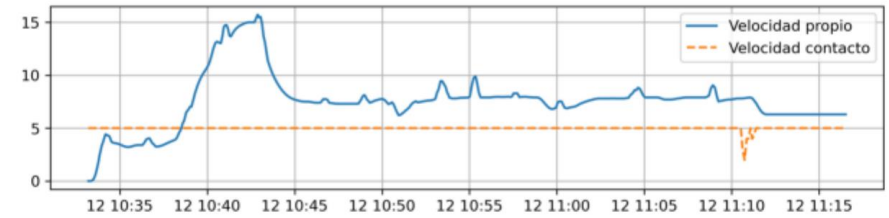


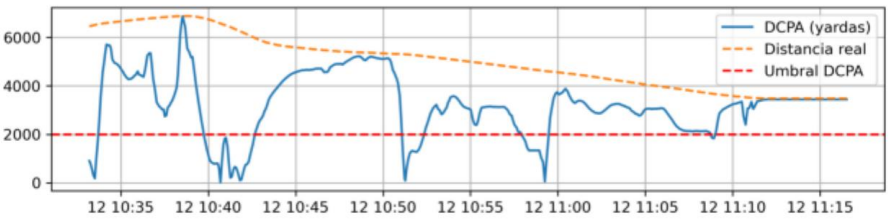
3.12 ANÁLISIS CONTACTO MMSI 123450162

Trayectoria completa y análisis cinemático del contacto.









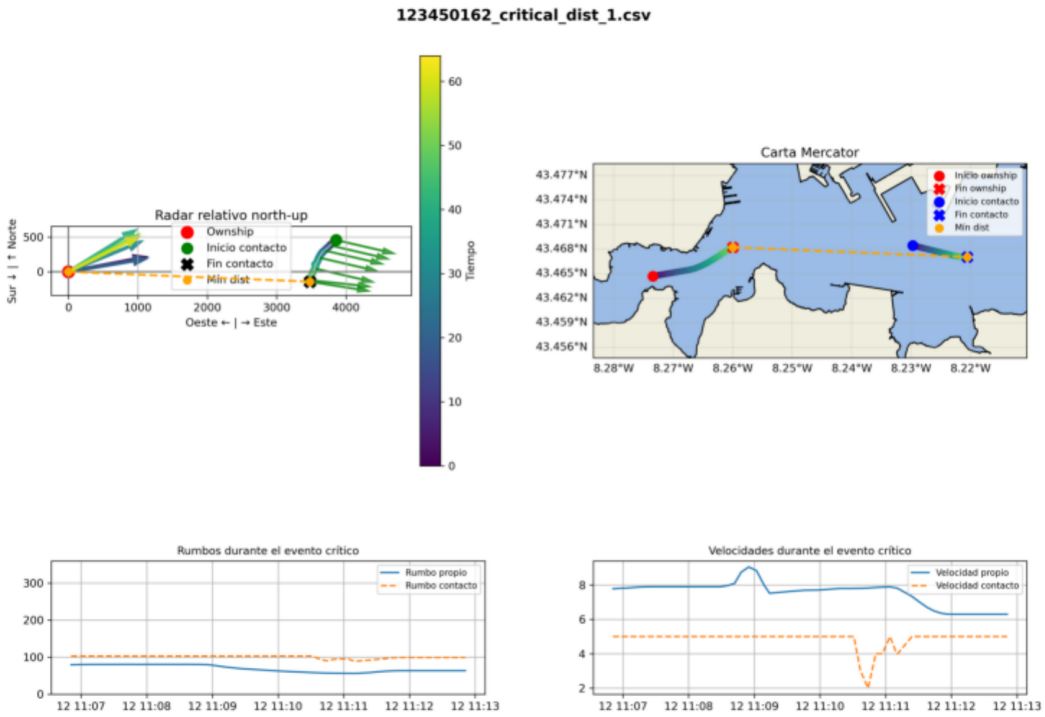
3.12.1 Evento crítico – critical_dist_1

Resumen paramétrico del evento detectado.

MMSI	**123450162**
RIPAM	ALCANZANDO
Dist mín (yd)	3482.0
DCPA mín (yd)	1827.5
Corte de proa al contacto	No
Maniobra total	Sí
Maniobra rumbo	Sí
Maniobra velocidad	Sí
Δ rumbo neto (°)	**4.1 ESTRIBOR**
Δ rumbo BABOR (°)	2.4
Δ rumbo ESTRIBOR (°)	6.5
Δ velocidad neta (kn)	**-1.03**
Δ aumento vel (kn)	0.07
Δ reducción vel (kn)	1.36
Tendencia velocidad	REDUCCION

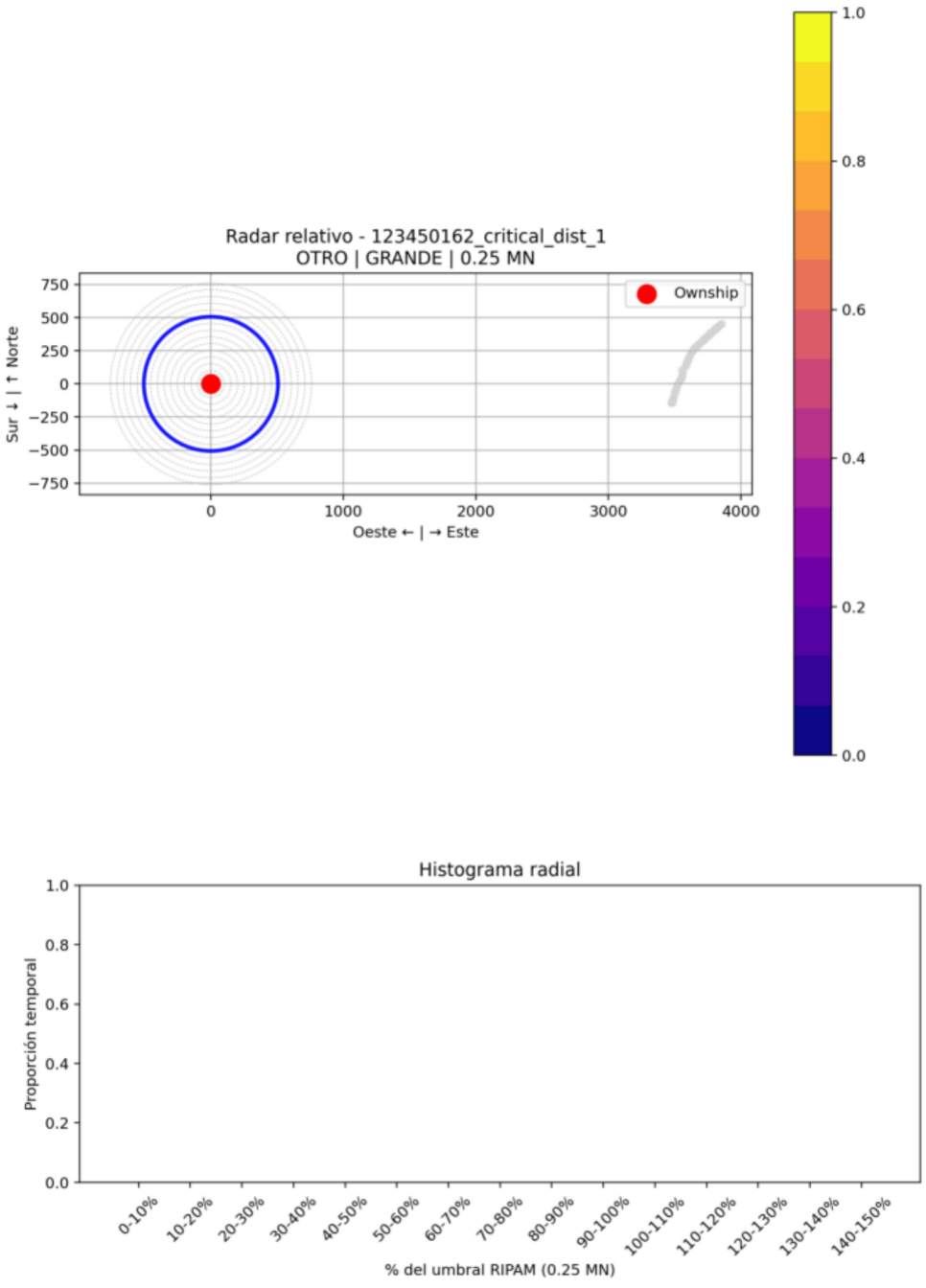
3.12.1 Representación espacial – critical_dist_1

Visualización radar relativa y carta Mercator asociada al evento.



3.12.1 Histograma de distancias – critical_dist_1

Distribución temporal de distancia al contacto respecto al umbral recomendado.



3.12.1 Evaluación del evento – critical_dist_1

Criterios, indicadores y penalizaciones (Sí/No).

NOTA FINAL: 10.0/10 → SEGURA

Criterios empleados:

- RIPAM: ALCANZANDO
- Tamaño: GRANDE
- Distancia mínima: 1.72 MN
- Rango permitido: [0.25, 0.50] MN

Maniobra:

- Obligación: YES
- ¿Hay que maniobrar?: Sí
- Maniobra realizada: Sí
- Banda: ESTRIBOR

Indicadores del histograma:

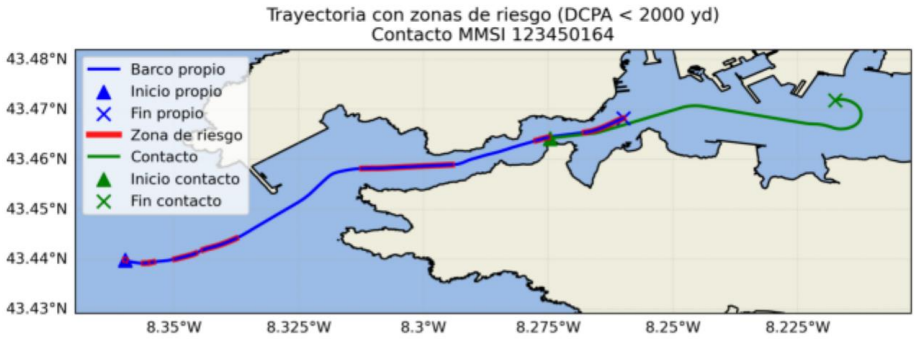
- Zona más cercana: 140_150 (prob=100.0%)
- % tiempo dentro del umbral (<100%): 0.0%
- % tiempo cumpliendo umbral (≥100%): 100.0%

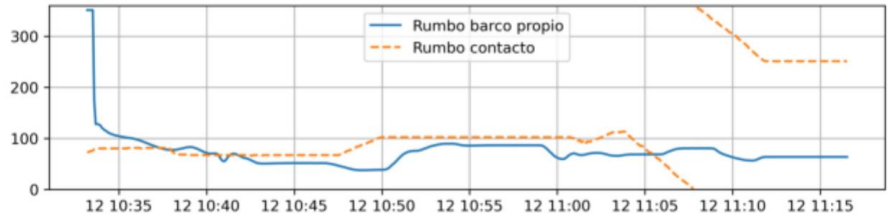
Penalizaciones:

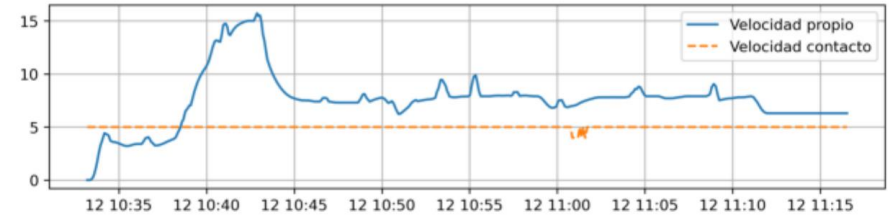
- CPA decreciente: No
- Corte de proa: No

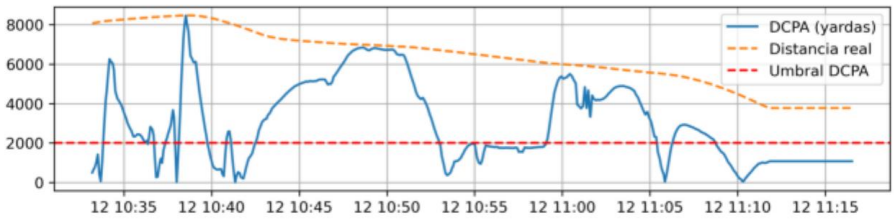
3.13 ANÁLISIS CONTACTO MMSI 123450164

Trayectoria completa y análisis cinemático del contacto.









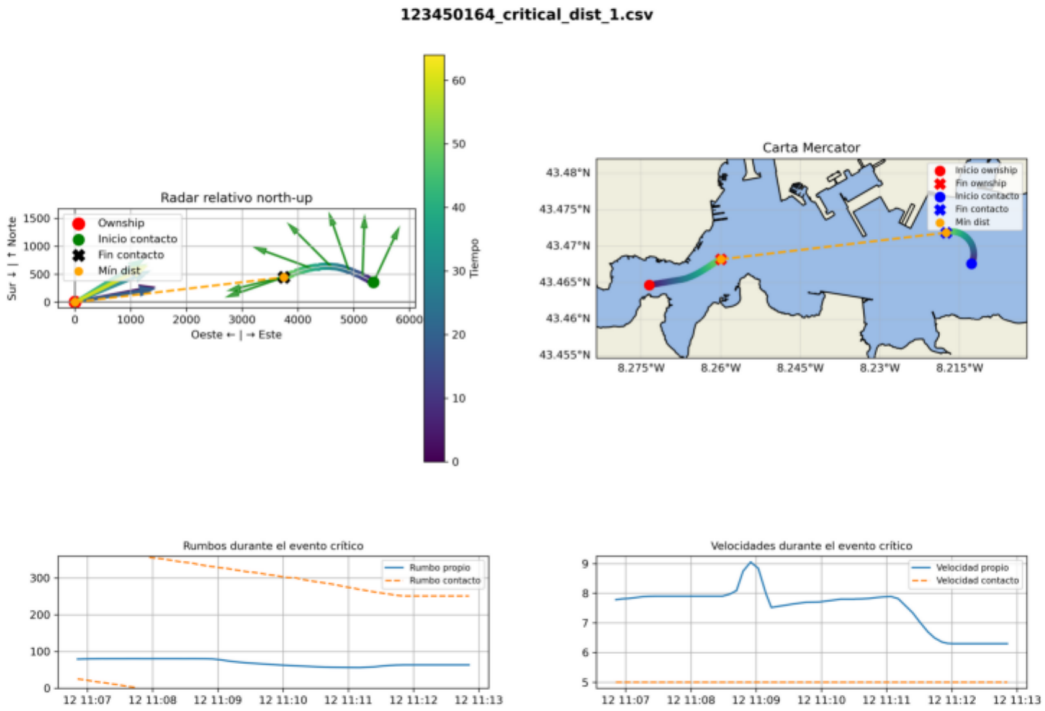
3.13.1 Evento crítico – critical_dist_1

Resumen paramétrico del evento detectado.

MMSI	**123450164**
RIPAM	CRUCE_ER
Dist mín (yd)	3771.6
DCPA mín (yd)	25.4
Corte de proa al contacto	Sí
Maniobra total	Sí
Maniobra rumbo	Sí
Maniobra velocidad	Sí
Δ rumbo neto (°)	**-17.2 BABOR**
Δ rumbo BABOR (°)	24.2
Δ rumbo ESTRIBOR (°)	7.0
Δ velocidad neta (kn)	**-1.07**
Δ aumento vel (kn)	1.46
Δ reducción vel (kn)	2.77
Tendencia velocidad	REDUCCION

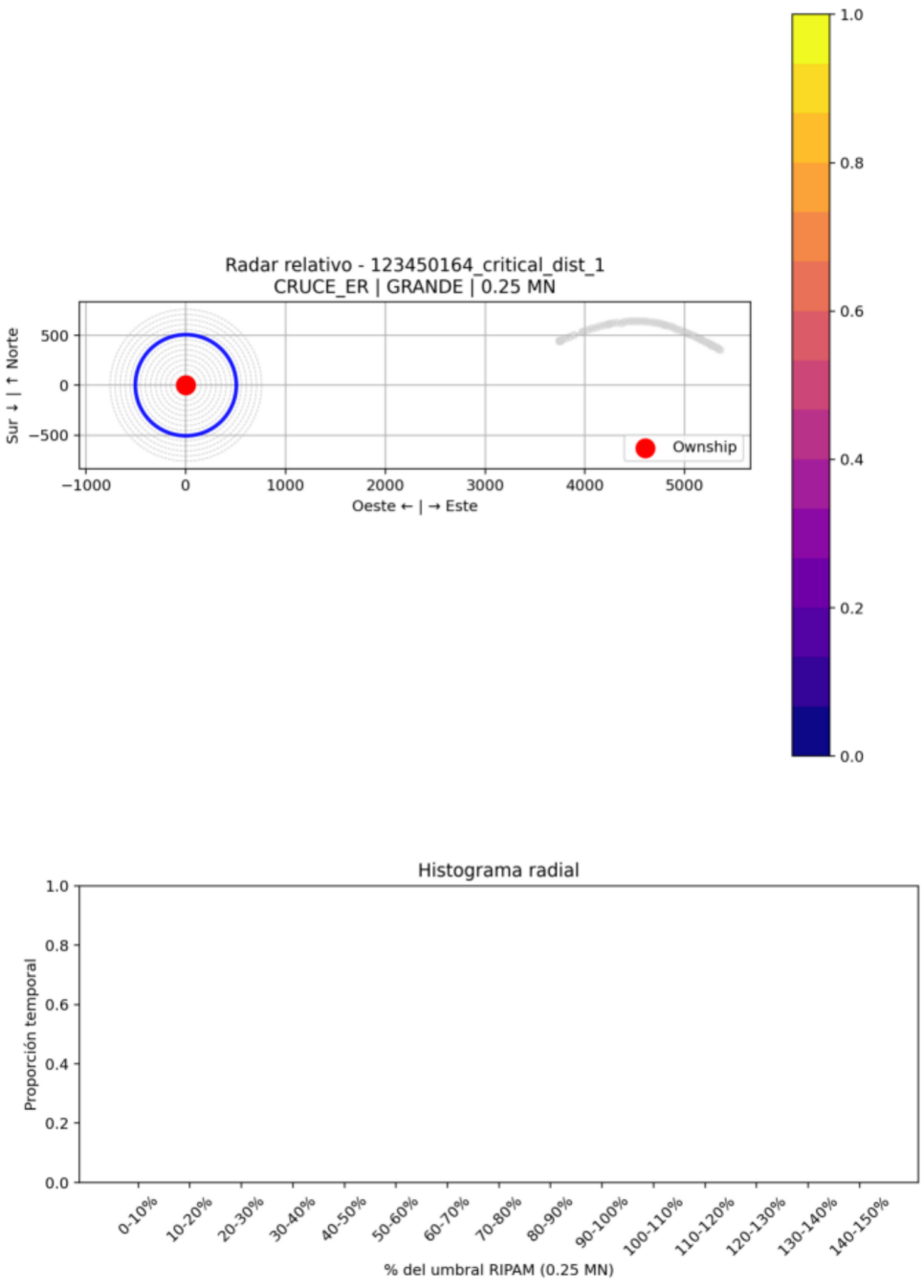
3.13.1 Representación espacial – critical_dist_1

Visualización radar relativa y carta Mercator asociada al evento.



3.13.1 Histograma de distancias – critical_dist_1

Distribución temporal de distancia al contacto respecto al umbral recomendado.



3.13.1 Evaluación del evento – critical_dist_1

Criterios, indicadores y penalizaciones (Sí/No).

NOTA FINAL: 7.7/10 → ACEPTABLE

Criterios empleados:

- RIPAM: ALCANZANDO
- Tamaño: GRANDE
- Distancia mínima: 1.86 MN
- Rango permitido: [0.25, 0.50] MN

Maniobra:

- Obligación: YES
- ¿Hay que maniobrar?: Sí
- Maniobra realizada: Sí
- Banda: BABOR

Indicadores del histograma:

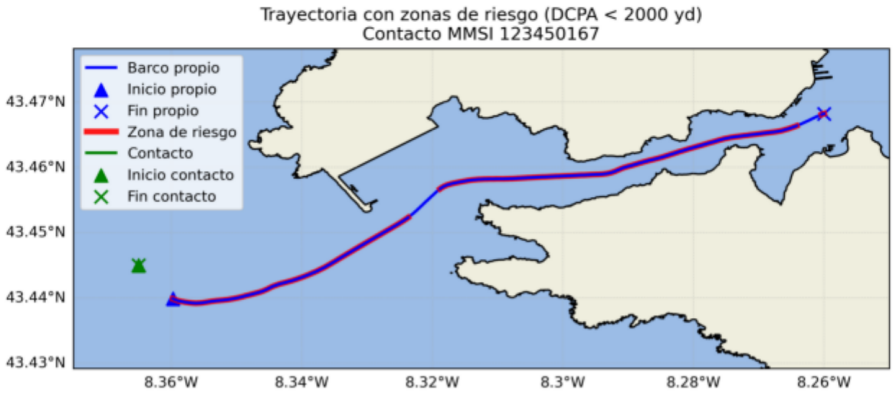
- Zona más cercana: 140_150 (prob=100.0%)
- % tiempo dentro del umbral (<100%): 0.0%
- % tiempo cumpliendo umbral (≥100%): 100.0%

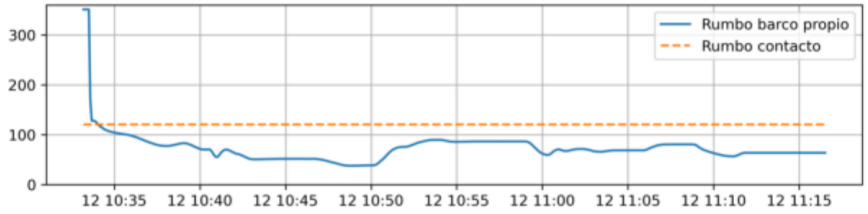
Penalizaciones:

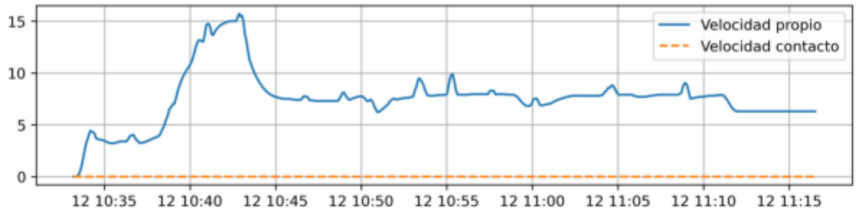
- CPA decreciente: Sí
- Corte de proa: Sí

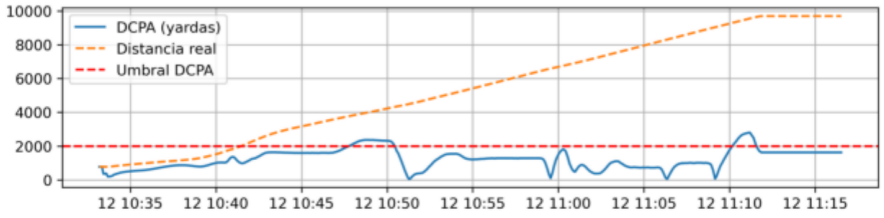
3.14 ANÁLISIS CONTACTO MMSI 123450167

Trayectoria completa y análisis cinemático del contacto.



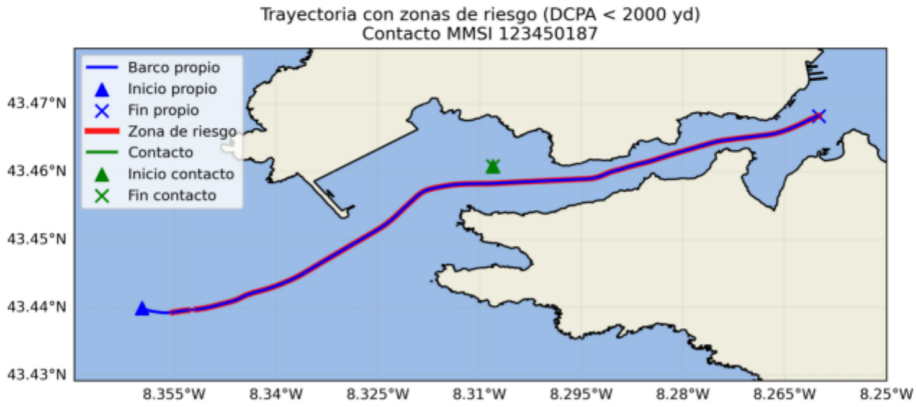




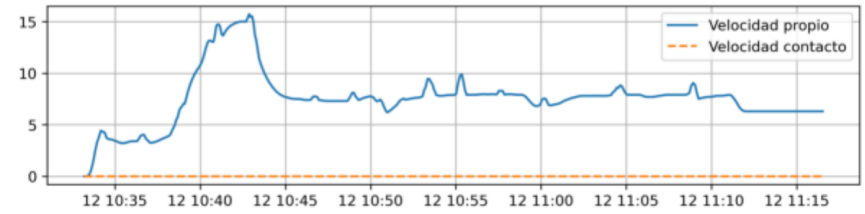


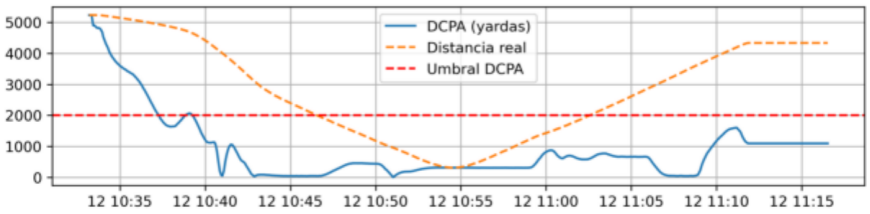
3.15 ANÁLISIS CONTACTO MMSI 123450187

Trayectoria completa y análisis cinemático del contacto.









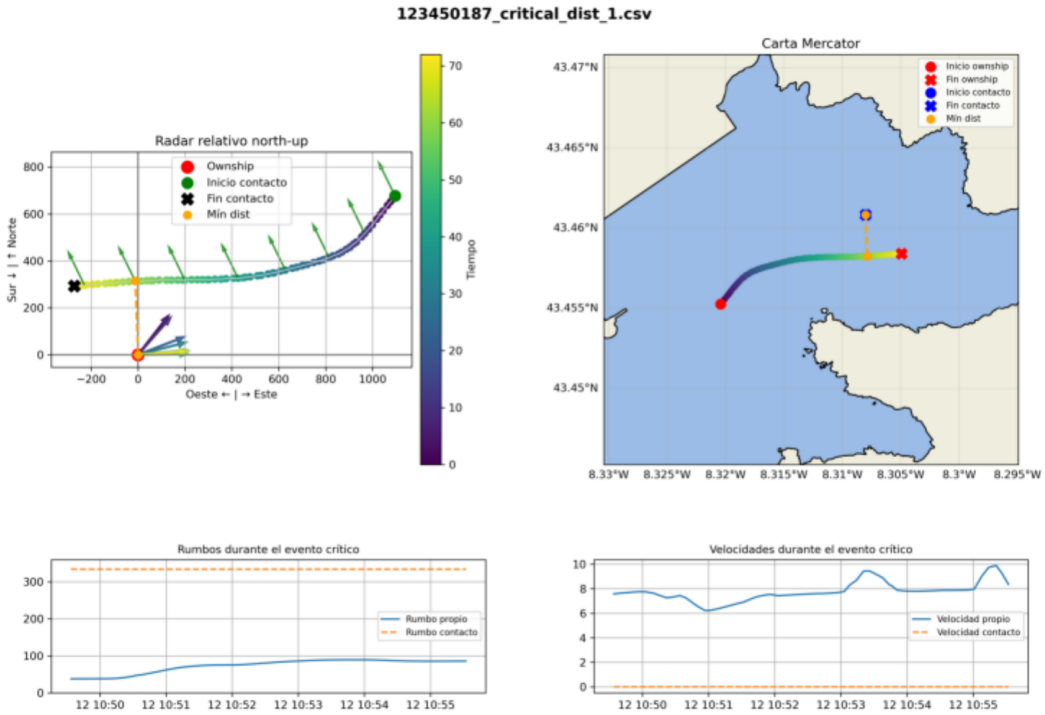
3.15.1 Evento crítico – critical_dist_1

Resumen paramétrico del evento detectado.

MMSI	**123450187**
RIPAM	FONDEADO
Dist mín (yd)	314.2
DCPA mín (yd)	5.4
Corte de proa al contacto	NQR
Maniobra total	Sí
Maniobra rumbo	Sí
Maniobra velocidad	Sí
Δ rumbo neto (°)	**49.1 ESTRIBOR**
Δ rumbo BABOR (°)	2.1
Δ rumbo ESTRIBOR (°)	51.2
Δ velocidad neta (kn)	**0.15**
Δ aumento vel (kn)	3.31
Δ reducción vel (kn)	3.10
Tendencia velocidad	ACELERACION

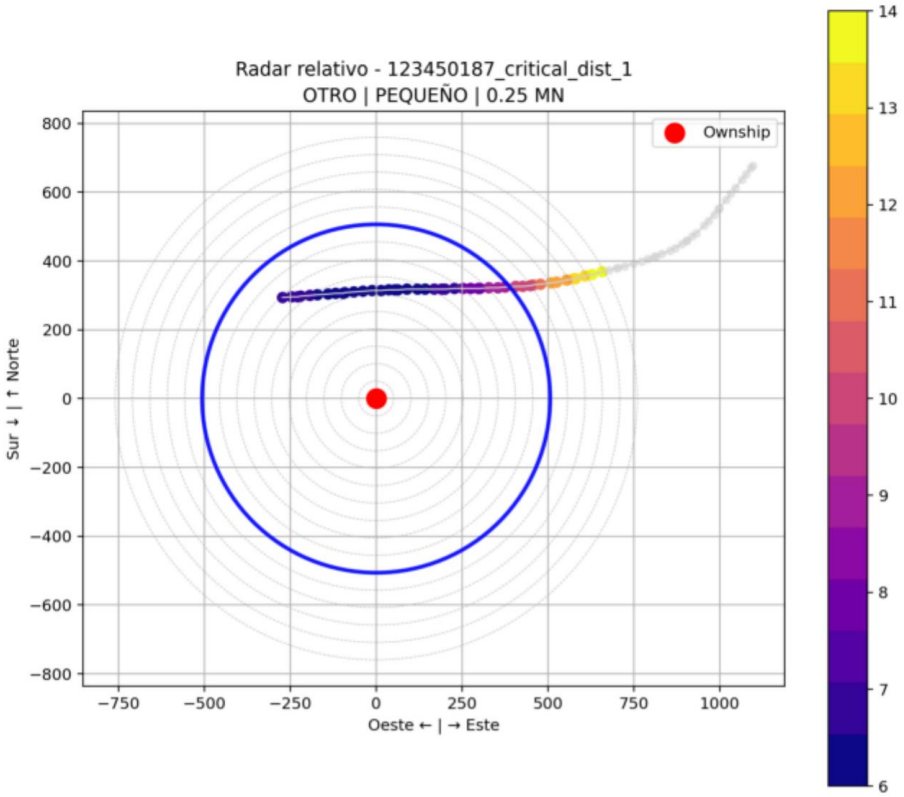
3.15.1 Representación espacial – critical_dist_1

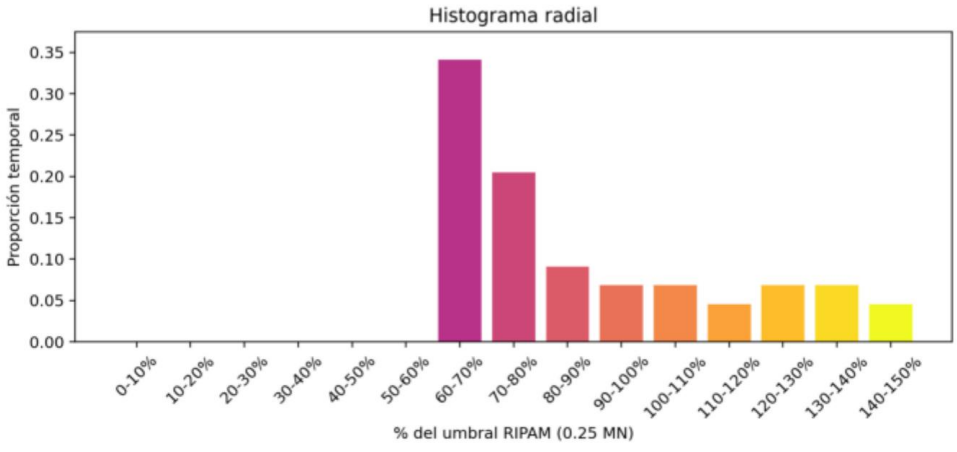
Visualización radar relativa y carta Mercator asociada al evento.



3.15.1 Histograma de distancias – critical_dist_1

Distribución temporal de distancia al contacto respecto al umbral recomendado.





3.15.1 Evaluación del evento – critical_dist_1

Criterios, indicadores y penalizaciones (Sí/No).

NOTA FINAL: 2.5/10 → PELIGROSA

Criterios empleados:

- RIPAM: FONDEADO
- Tamaño: PEQUEÑO
- Distancia mínima: 0.16 MN
- Rango permitido: [0.25, 0.50] MN

Maniobra:

- Obligación: COND
- ¿Hay que maniobrar?: Sí
- Maniobra realizada: Sí
- Banda: ESTRIBOR

Indicadores del histograma:

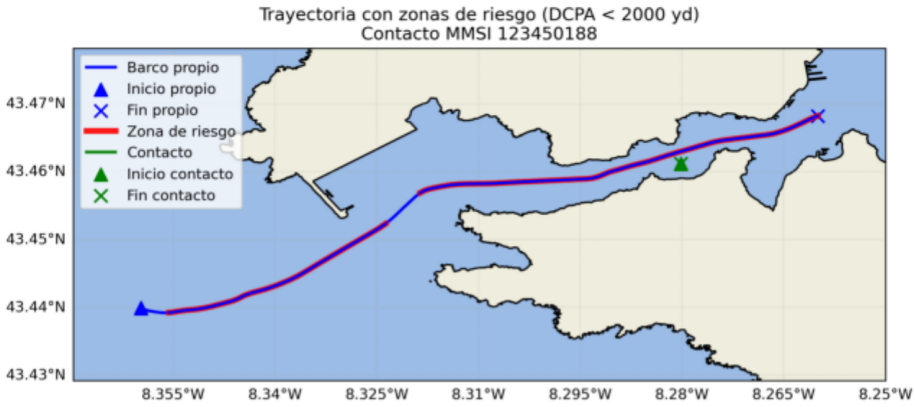
- Zona más cercana: 60_70 (prob=21.2%)
- % tiempo dentro del umbral (<100%): 42.4%
- % tiempo cumpliendo umbral (≥100%): 57.6%

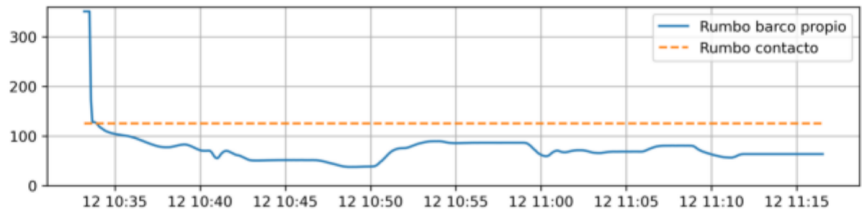
Penalizaciones:

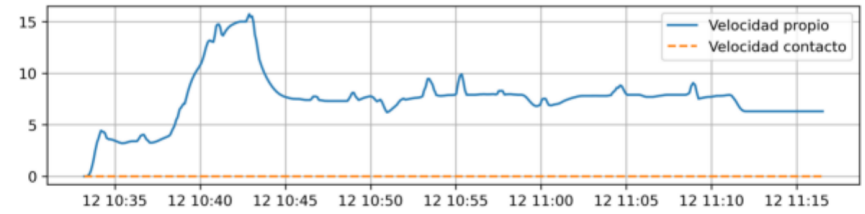
- CPA decreciente: No
- Corte de proa: No

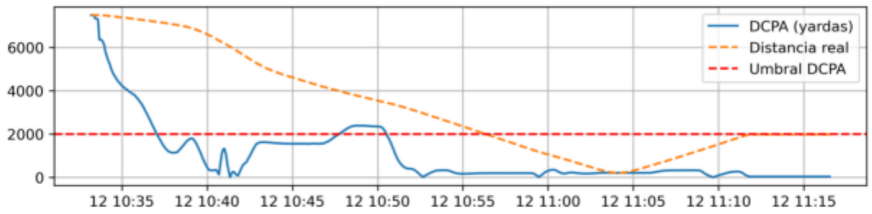
3.16 ANÁLISIS CONTACTO MMSI 123450188

Trayectoria completa y análisis cinemático del contacto.



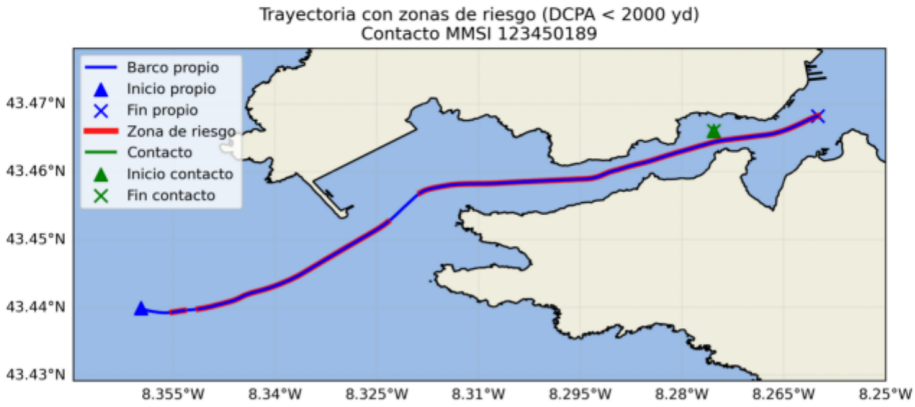




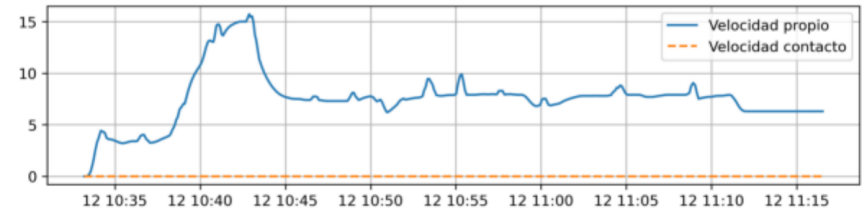


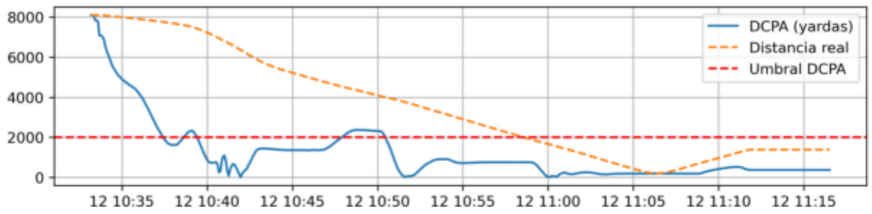
3.17 ANÁLISIS CONTACTO MMSI 123450189

Trayectoria completa y análisis cinemático del contacto.









RESUMEN FINAL

Media global: 7.83 / 10

Valoración final: ADECUADA

Nº de eventos evaluados: 12

Peores eventos:

- 123450078_critical_dist_1 → 0.74/10
- 123450187_critical_dist_1 → 2.55/10
- 123450070_critical_dist_1 → 7.22/10
- 123450164_critical_dist_1 → 7.65/10
- 123450006_critical_dist_1 → 9.30/10

Mejores eventos:

- 123450162_critical_dist_1 → 10.00/10
- 123450020_critical_dist_1 → 10.00/10
- 123450151_critical_dist_1 → 9.30/10
- 123450126_critical_dist_1 → 9.30/10
- 123450123_critical_dist_1 → 9.30/10

ANEXO IV: DECLARACIÓN DE USO DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL

Durante la elaboración del presente Trabajo Fin de Grado se han utilizado de forma puntual herramientas de inteligencia artificial generativa como apoyo auxiliar en tareas de redacción, corrección lingüística y mejora de la claridad expositiva.

Asimismo, a lo largo del desarrollo del proyecto se han empleado herramientas de asistencia basadas en modelos de lenguaje de gran tamaño (LLM), entre ellas ChatGPT, como apoyo en determinadas tareas de programación y exploración de soluciones técnicas. Su utilización se ha centrado principalmente en la generación de ejemplos de código, sugerencias de implementación y elaboración de prototipos preliminares. Todas las propuestas obtenidas han sido posteriormente revisadas, adaptadas y validadas antes de su integración en el sistema final.

El uso de estas herramientas ha tenido un carácter estrictamente complementario, orientado a mejorar la calidad de la expresión escrita, optimizar la organización de algunos apartados y facilitar la presentación estructurada de contenidos técnicos y visuales. En ningún caso han sustituido el trabajo personal del autor, ni el análisis, la interpretación de resultados, el desarrollo metodológico o la elaboración de conclusiones.

En consecuencia, tanto el contenido final del documento como el enfoque adoptado y las conclusiones expuestas son responsabilidad exclusiva del autor.