



# MEMORIA DE INVESTIGACIÓN 2023-2024

Centro de referencia  
I+D+i ATM (CRIDA)

30/11/2025





# Índice

Carta del Presidente del Consejo	5
Carta del Director	6
<b>1</b> Presentación de CRIDA A.I.E.	7
<b>2</b> Misión, visión y valores	8
<b>3</b> Estrategia	9
<b>4</b> Personas	14
<b>5</b> Sus instalaciones	15
<b>6</b> Su negocio en cifras	16
<b>7</b> Resumen del periodo	19
<b>8</b> Avances técnicos	22
8.1 <i>Medición de prestaciones y calidad del servicio</i>	25
8.2 <i>Previsión de tráfico y trayectorias</i>	29
8.3 <i>Gestión de la demanda y la capacidad</i>	34
8.4 <i>Meteorología</i>	40
8.5 <i>Gestión de recursos de control en el día de operación</i>	44
8.6 <i>Factores humanos</i>	49
8.7 <i>Aeropuertos</i>	54
8.8 <i>Drones</i>	58
8.9 <i>Big Data e Inteligencia Artificial</i>	63
8.10 <i>Infraestructura de validación</i>	67
<b>9</b> Innovación abierta	72
<b>10</b> Vigilancia y transferencia tecnológica a sus socios	76
<b>11</b> Actividades 2025	79
<b>12</b> Entidades colaboradoras	82



# Carta del Presidente del Consejo

Es un orgullo presentar la Memoria de Investigación 2023–2024 del Centro de Referencia de I+D+i en Gestión del Tráfico Aéreo (CRIDA). Este documento refleja la solidez de una visión compartida: convertir la innovación en un pilar fundamental para la evolución del sistema de navegación aérea en España y su plena integración en el ecosistema europeo.

CRIDA ha demostrado una vez más su capacidad para liderar iniciativas estratégicas enmarcadas en el programa SESAR 3, actuando como motor del desarrollo tecnológico que impulsa la transformación del sistema ATM europeo. Su labor en áreas clave —como la medición de prestaciones, la automatización basada en inteligencia artificial, la gestión dinámica del espacio aéreo, la integración segura de drones o el análisis de factores humanos— sitúa a CRIDA en primera línea de la innovación aplicada al tráfico aéreo.

A través de CRIDA, ENAIRE refuerza su posición como referente internacional en seguridad, eficiencia y sostenibilidad, avanzando hacia un Cielo Único Europeo más eficiente, resiliente y orientado a las necesidades de sus usuarios.

El camino recorrido reafirma que la investigación aplicada es una pieza imprescindible para seguir construyendo un sistema de navegación aérea más eficiente, seguro, sostenible e inteligente. Mi agradecimiento más sincero a todos los profesionales y socios cuya labor hace posible estos avances.



Enrique Maurer Somolinos

Director General de ENAIRE

Presidente del Consejo de Administración de CRIDA

**ENAIRE** 

# Carta del Director

La Memoria de Investigación 2023–2024 sintetiza el esfuerzo, la dedicación y la visión colectiva que han guiado la actividad de CRIDA a lo largo de este periodo. Cada una de sus páginas refleja un trabajo basado en rigor técnico, colaboración y compromiso con la mejora continua del sistema de navegación aérea.

Durante estos dos años, CRIDA ha consolidado su papel como centro de referencia nacional e internacional en investigación aplicada al ATM. Hemos participado en 24 proyectos del programa SESAR 3, liderando áreas estratégicas como la cuantificación de prestaciones, la automatización inteligente, la gestión dinámica del espacio aéreo, la integración de drones y los factores humanos.

En este periodo hemos desarrollado plataformas esenciales para el análisis masivo de datos, la simulación operativa y la validación de soluciones de alta complejidad técnica, junto con nuevas capacidades en validación integrada aeronave–ATM y entornos específicos para drones.

Uno de los mayores valores de CRIDA sigue siendo su equipo: profesionales altamente cualificados y comprometidos, apoyados por una colaboración constante con universidades, industria, centros de investigación, startups y proveedores de servicios. Asimismo, el programa de Innovación Abierta de ENAIRE continúa impulsando la creatividad y la transferencia de conocimiento.

De cara a 2025 y 2026, nos encontramos en una etapa decisiva, marcada por la maduración de soluciones que influirán en el ATM europeo durante la próxima década. El compromiso de CRIDA permanece firme: transformar la investigación en valor operativo y contribuir a un sistema más seguro, eficiente y tecnológicamente avanzado.



José Miguel de Pablo Guerrero

Director General de CRIDA



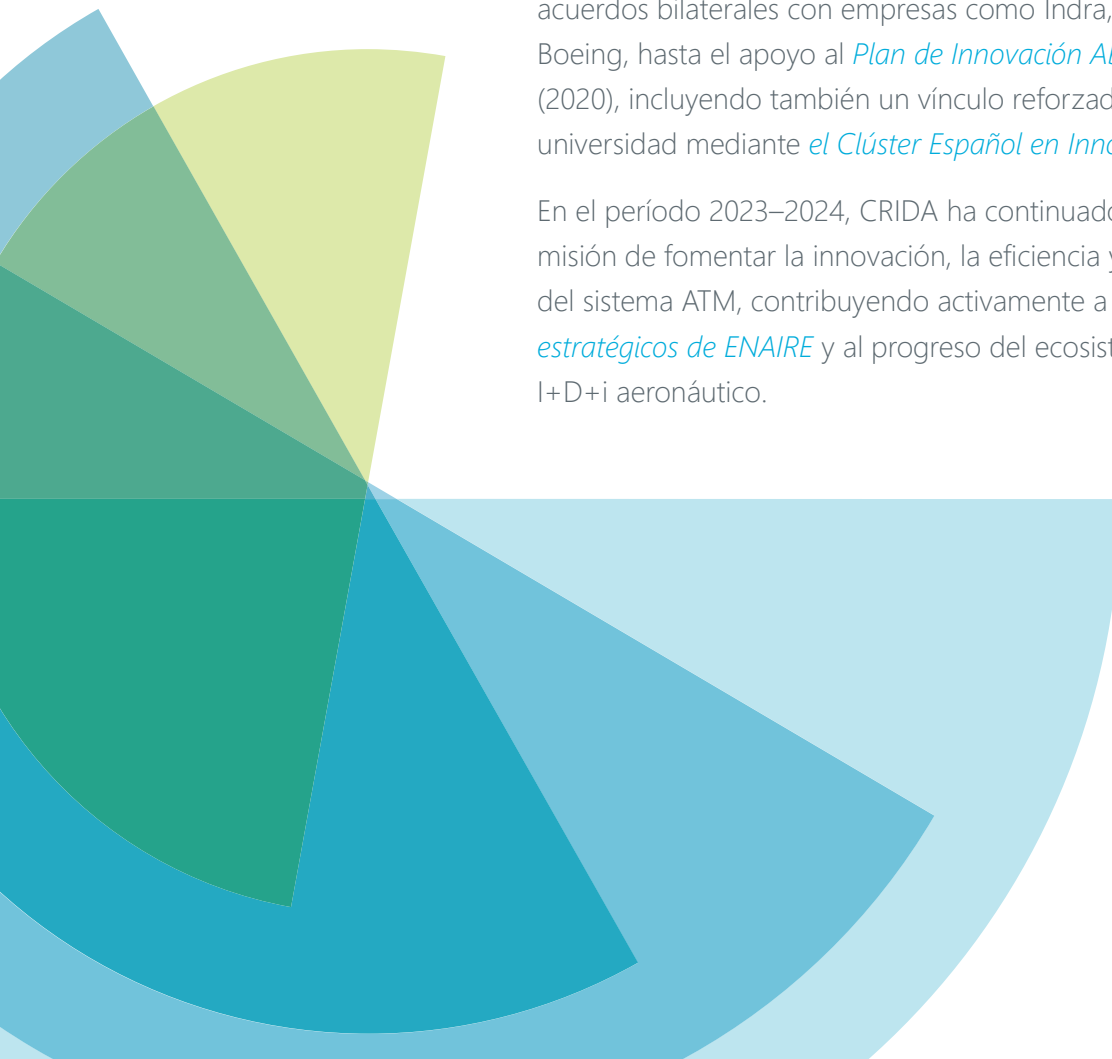
# 1 Presentación de CRIDA A.I.E.

CRIDA (Centro de Referencia I+D+i ATM) es una *agrupación de interés económico sin ánimo de lucro*, adscrita al *Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible* a través de ENAIRE, que junto con INECO y la Universidad Politécnica de Madrid (UPM) conforman su Consejo de Administración.

Desde su creación en 2008, CRIDA ha consolidado su posición como un *referente nacional e internacional en investigación, desarrollo e innovación en gestión del tráfico aéreo (ATM)*. Su incorporación al programa de investigación del *Cielo Único Europeo, SESAR* en 2010 ha permitido su participación en más de 100 proyectos, canalizando buena parte de la contribución de ENAIRE al marco europeo de I+D+i. En la actual fase del programa, SESAR 3, CRIDA participa en 22 de los 41 proyectos orientados al desarrollo de soluciones innovadoras y transferibles a la industria.

CRIDA mantiene una estrecha colaboración con el sector, desde acuerdos bilaterales con empresas como Indra, Air Europa o Boeing, hasta el apoyo al *Plan de Innovación Abierta de ENAIRE* (2020), incluyendo también un vínculo reforzado con la universidad mediante *el Clúster Español en Innovación en ATM*.

En el período 2023–2024, CRIDA ha continuado avanzando en su misión de fomentar la innovación, la eficiencia y la sostenibilidad del sistema ATM, contribuyendo activamente a los *objetivos estratégicos de ENAIRE* y al progreso del ecosistema europeo de I+D+i aeronáutico.



## 2 Misión, visión y valores

### Misión

CRIDA tiene por misión *mejorar la eficiencia y prestaciones del sistema de gestión de tráfico aéreo (ATM) español*, entendiéndolo como parte integrante de un sistema global, por medio del desarrollo de proyectos de Investigación, Desarrollo e Innovación (I+D+i). Para ello analiza cuantitativa y sistemáticamente las prestaciones del sistema, diagnostica sus problemas y causas, propone y valida soluciones innovadoras, y colabora en el proceso de implantación de las soluciones óptimas.

 Proactividad

 Compromiso

 Talento

 Experiencia

 Independencia

### Visión

CRIDA persigue ser reconocido como *centro experto* por el resto de los actores del sector, de forma que sus investigaciones sean un referente para la selección de las soluciones a implementar en el sistema de gestión de tráfico aéreo. CRIDA fomenta la creatividad en la búsqueda de ideas, el trabajo en equipo, la excelencia en sus resultados, y la flexibilidad ante cambios en las nuevas necesidades de investigación.

### Valores

La actividad de CRIDA se sustenta en la *independencia*, objetividad y rigor científico. Sus valores fundamentales son:

- *Proactividad* en la búsqueda de soluciones innovadoras.
- *Excelencia técnica* y especialización en el ámbito ATM.
- *Compromiso* con la aplicación de los resultados que mejoran el sistema.

Además, CRIDA se alinea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Agenda 2030 y con la Política Palanca VI del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR), que impulsa un pacto por la ciencia y la innovación para situar a España como referente en Inteligencia Artificial y acelerar de forma sostenible la inversión en I+D+i.

## 3 Estrategia

CRIDA ha diseñado su estrategia para estar en plena sintonía con el Plan de Vuelo 2025 de ENAIRE, especialmente con su Plan de Innovación, que reconoce a CRIDA como un actor clave en el impulso de nuevas ideas y tecnologías para la navegación aérea.

El plan se apoya en *cuatro grandes líneas de trabajo*, que reflejan su apuesta por la especialización y la eficiencia:

- *Medición de prestaciones* del sistema de gestión del tráfico aéreo (ATM), para conocer cómo funciona y cómo puede mejorar.
- *Validación de soluciones innovadoras*, asegurando que las nuevas ideas realmente funcionan antes de aplicarlas.
- *Desarrollo de nuevas soluciones tecnológicas*, adaptadas a las necesidades del sector.
- *Innovación abierta*, colaborando con otros actores para enriquecer el ecosistema de innovación.

Además, CRIDA se apoya en tres tecnologías clave que actúan como facilitadores de esta estrategia:

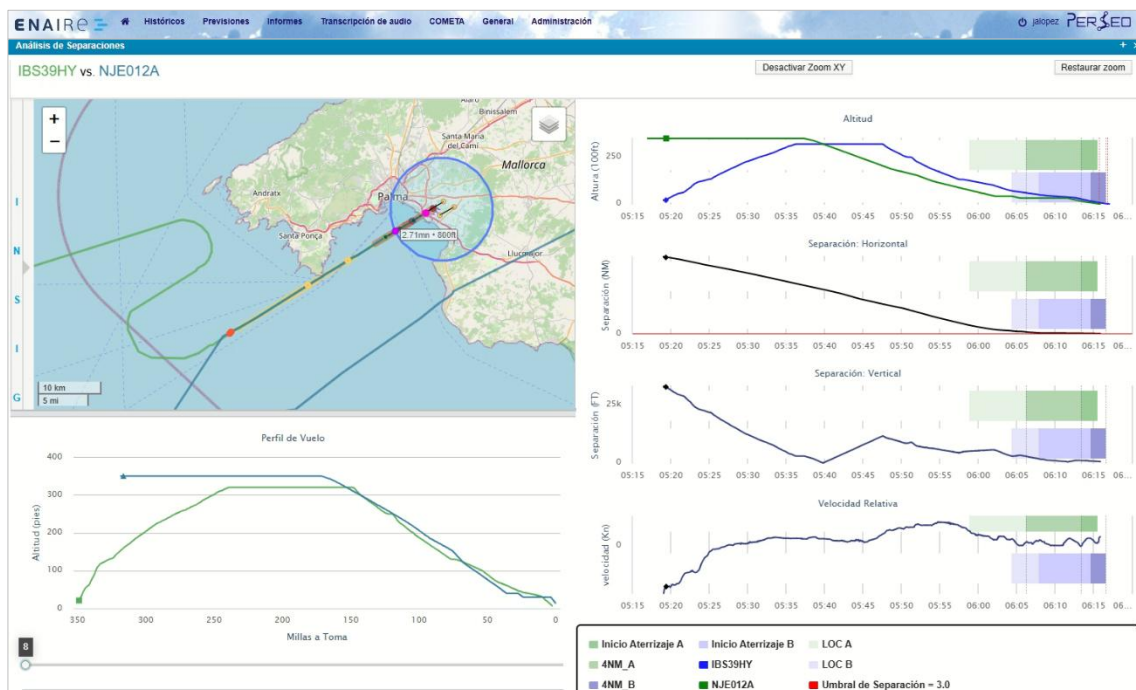
- *Automatización*, que permite analizar el sistema de forma más rápida y precisa, liberando tiempo para centrarse en la investigación.
- *Inteligencia artificial*, para aprovechar grandes volúmenes de datos y mejorar tanto el diagnóstico del sistema como el diseño de nuevas soluciones.
- *Tecnologías para aviación no tripulada*, que sirven como laboratorio para probar cómo impactan las nuevas ideas en el sistema aéreo tradicional, especialmente en lo que respecta a la automatización y digitalización.

## Línea Estratégica 1: Medición Sistemática de Prestaciones

CRIDA identifica como línea estratégica prioritaria la *monitorización, diagnóstico y análisis causal del sistema ATM* y sus problemas por medio de la cuantificación de prestaciones a partir de fuentes de información objetivas.

Para ello, CRIDA investiga, desarrolla y pone a disposición de sus socios *medios de análisis innovadores* que posibilitan el acceso, almacenamiento, procesado e integración de múltiples fuentes de información, así como la generación sistemática y automática de indicadores asociados a varias áreas de prestaciones, incluyendo capacidad, eficiencia o impacto ambiental.

Esta información es la base sobre la que se construye el *modelo causal del sistema*, una herramienta clave que guía la búsqueda de soluciones de I+D+i para superar las barreras que frenan el nivel óptimo de prestaciones.



Nueva vista de Perseo para la monitorización de aterrizajes frustrados

## Línea Estratégica 2: Validación de soluciones I+D+i

La segunda línea estratégica consiste en el estudio y validación de soluciones proporcionando *su impacto operacional y cuantificando sus beneficios*. Para ello, CRIDA investiga y desarrolla *técnicas e infraestructuras de validación* que doten a sus socios de capacidad de respuesta, eficiencia económica y flexibilidad ante necesidades de análisis de soluciones.

CRIDA emplea esas nuevas técnicas en realizar validaciones para evaluar soluciones de diverso grado de madurez, *desde ideas de concepto hasta soluciones en fases próximas a la industrialización* que requieren el análisis en entornos similares al real. Todas ellas se realizan de acuerdo con las metodologías empleadas en la medición de prestaciones del sistema, y empleando indicadores similares, facilitando con ello la comparación con la operativa actual.



Actividades de validación del proyecto SESAR FCA (Flight Centric ATC) en las instalaciones de CRIDA en noviembre de 2024.

### Línea Estratégica 3: Colaboración en el desarrollo e implantación de soluciones de I+D+i

Del análisis de los problemas surge la identificación de las *soluciones con mayor impacto en el rendimiento del sistema*. Esta tercera línea estratégica consiste en la colaboración en el desarrollo e implantación de esas soluciones en el entorno real.

En general, CRIDA se centra en *colaborar con las empresas del sector* en la preparación de las fases de desarrollo e implantación de la solución, con el fin de garantizar que la solución final se adapta a lo esperado según su evaluación en la fase de investigación.

En aquellos casos en los que la solución a implantar se basa en la explotación de módulos desarrollados por CRIDA como parte de la medición de presentaciones del sistema o la validación de soluciones (líneas I y II), CRIDA contribuye al desarrollo de prototipos funcionales que sirven para la puesta en explotación. Estos casos son excepcionales dada la dimensión de CRIDA y los recursos de que dispone.



Evaluación en tiempo real (modo sombra) del prototipo PISA MaT (Millas a Toma) en el ACC de Barcelona en septiembre de 2024.

## Línea Estratégica 4: Innovación abierta

Esta cuarta línea estratégica apunta al carácter de CRIDA como centro de referencia, y a su rol de motor de la Innovación en ENAIRE.

Partiendo de la premisa de que los cambios tecnológicos suceden cada vez más deprisa, y que la I+D+i requiere una gama cada vez mayor de capacidades y conocimientos, CRIDA tiene como prioridad el diseño de procesos de innovación abierta que *favorezcan la transmisión y socialización del conocimiento generado*. Esta línea estratégica permite a CRIDA conectar personas o actores clave dentro y fuera de la organización, lo que entronca con el rol de centro referencial de CRIDA.

Por otro lado, esta línea tiene como objetivo *extender el ámbito de I+D+i* de CRIDA a otros aspectos del ATM que puedan significar nuevas oportunidades de negocio para sus socios, incluyendo la aviación general o incluso aspectos sociales como la experiencia del pasajero.



*Instalación en el aeropuerto de Sabadell de las balizas desarrolladas por BIRDSTOP, ganador del primer concurso de startups del programa de innovación abierta.*

## 4 Personas

Talento joven, diversidad y excelencia técnica: el equipo que impulsa la innovación en ATM.

Con una plantilla de menos de cincuenta profesionales, la organización se caracteriza por su juventud —con una media de edad de 38 años— y por una sólida experiencia, reflejada en una antigüedad media de siete años.

Todos los empleados cuentan con titulación universitaria, predominando la *Ingeniería Aeronáutica y del Espacio, Informática y Telecomunicaciones*. En cuanto a la diversidad, aproximadamente el 40% de la plantilla son mujeres, una cifra significativa en un sector tradicionalmente masculinizado como el aeronáutico. Aunque la mayoría del equipo es de nacionalidad española, CRIDA ha contado a lo largo de los años con profesionales de distintas procedencias, incluyendo China, Estados Unidos, Austria, Italia y Francia.

Como centro de referencia, *CRIDA impulsa el talento joven mediante su programa de becas y su compromiso con la formación doctoral*. En 2023 y 2024 se publicaron 53 becas en colaboración con universidades como la Universidad Politécnica de Madrid, la Universidad Politécnica de Valencia, la Universidad Politécnica de Cataluña, la Universidad Carlos III de Madrid, la Universidad de Vigo, la Universidad Europea de Madrid, la Universidad Autónoma de Barcelona y la Universidad de Nápoles.

CRIDA lidera el *Clúster español de investigación en ATM*, una red que agrupa a universidades nacionales vinculadas al sector, con el objetivo de compartir experiencias, definir líneas de trabajo y fomentar la participación en proyectos comunes.

CRIDA dispone de un *plan de formación flexible y adaptado a las necesidades de su equipo*, con especial foco en tecnologías emergentes como el tratamiento de datos, la inteligencia artificial y el aprendizaje automático. Además, fomenta la participación de su personal en el Máster en Gestión de Servicios de Navegación Aérea, impulsado por ENAIRE.

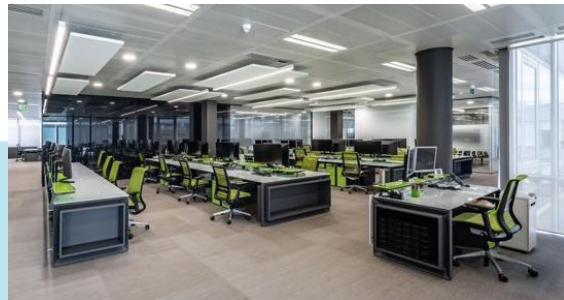
## 5 Sus instalaciones

CRIDA desarrolla su actividad en dos ubicaciones principales. Su sede oficial se encuentra en el parque empresarial *Kudos Innovation Campus Las Mercedes*, en Madrid, compartiendo complejo con las oficinas centrales de ENAIRE. Su dirección es: C/ de Campezo, 1, Edificio 7, Planta 4, 28022 Madrid.

Además, CRIDA cuenta con oficinas en la *Escuela Técnica Superior de Ingeniería Aeronáutica y del Espacio (ETSIAE)* de la Universidad Politécnica de Madrid. Esta cercanía con el entorno universitario facilita una colaboración directa con el mundo académico, actuando como puente entre las ideas emergentes en el ámbito de la gestión del tráfico aéreo y su aplicación práctica en ENAIRE.

Ambas sedes disponen de *laboratorios de simulación*, que han sido fundamentales desde la creación de CRIDA. En ellos se validan nuevas soluciones de I+D+i mediante técnicas como la simulación en tiempo real y acelerado o pruebas en vuelo en colaboración con ENAIRE.

*Oficinas de CRIDA*



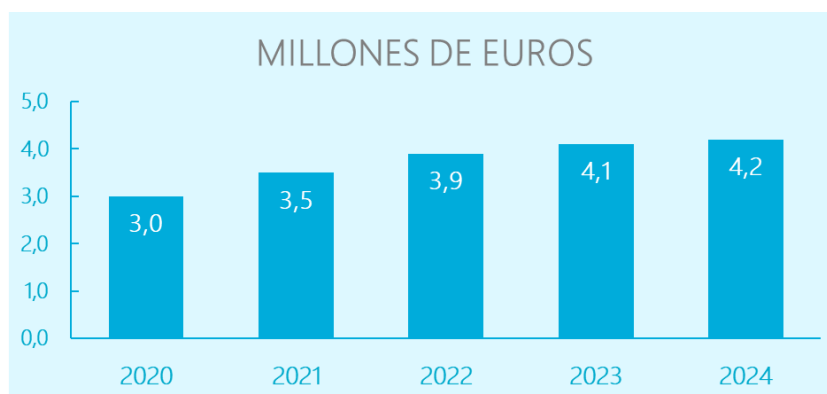
## 6 Su negocio en cifras

Crecimiento sostenido y estabilidad económica al servicio de la innovación.

Durante los ejercicios 2023 y 2024, CRIDA A.I.E. ha mantenido una *tendencia positiva en su cifra de negocio*, consolidando un crecimiento sostenido en su actividad. Los ingresos de explotación alcanzaron los 4,1 millones de euros en 2023 y los 4,2 millones de euros en 2024.

### Evolución de Ingresos

La evolución de los ingresos en el periodo 2020–2024 pone de manifiesto la fortaleza financiera de la entidad y su capacidad para mantener una tendencia estable de crecimiento. Esta estabilidad constituye la base para la planificación a largo plazo y la ejecución continuada de proyectos de I+D+i en el ámbito del ATM europeo.

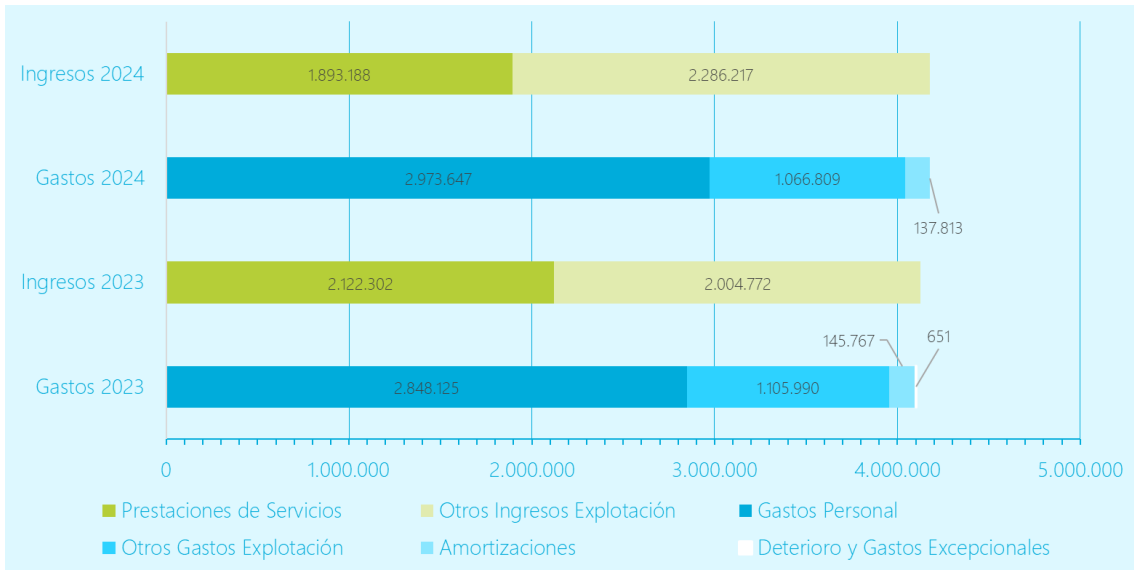


*Evolución de Ingresos 2020-2024*

### Resumen del Balance de Cuentas

La evolución de los resultados refleja una gestión eficiente y equilibrada de los recursos disponibles. Los gastos totales se situaron en 4,1 millones de euros en 2023 y 4,2 millones de euros en 2024, manteniendo una adecuada correlación con los niveles de ingresos y garantizando el *principio de reinversión íntegra de los fondos en actividades de investigación, desarrollo e innovación*.

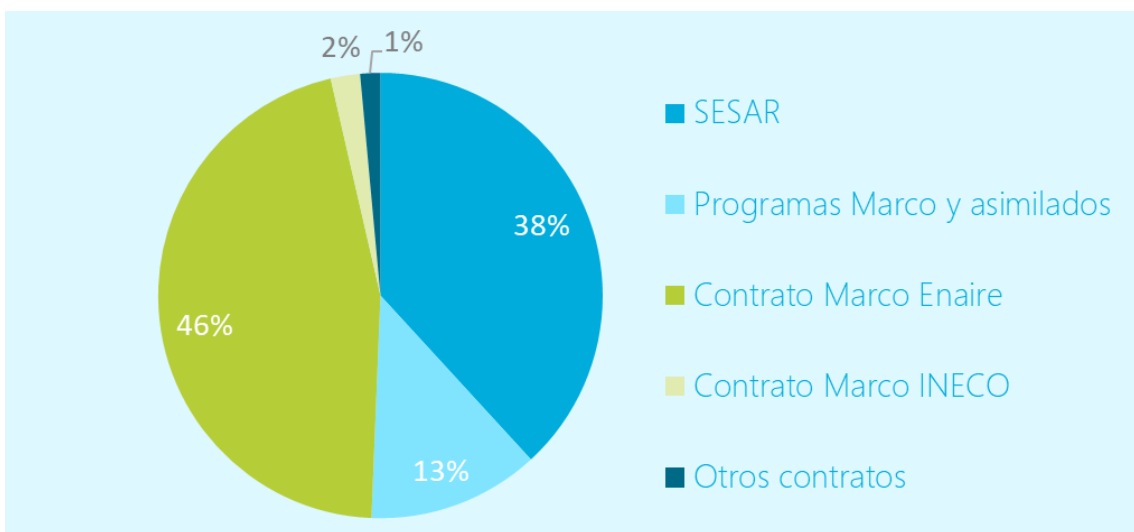
Este comportamiento confirma el compromiso de CRIDA con la sostenibilidad económica y la excelencia en la gestión, asegurando que todos los recursos generados se destinen a potenciar su contribución al avance del sistema ATM y a la mejora continua de sus capacidades técnicas y operativas.



Resumen balance de cuentas ejercicios 2023-2024

### Fuentes de Ingresos

Las principales fuentes de financiación de CRIDA provienen de *contratos con ENAIRE e INECO*, así como de *proyectos de investigación y desarrollo tecnológico nacionales y europeos*, complementados con aportaciones de colaboraciones estratégicas con socios del sector aeronáutico. Esta combinación de financiación interna y externa garantiza la autonomía operativa y refuerza la posición de CRIDA como centro de referencia en innovación ATM.



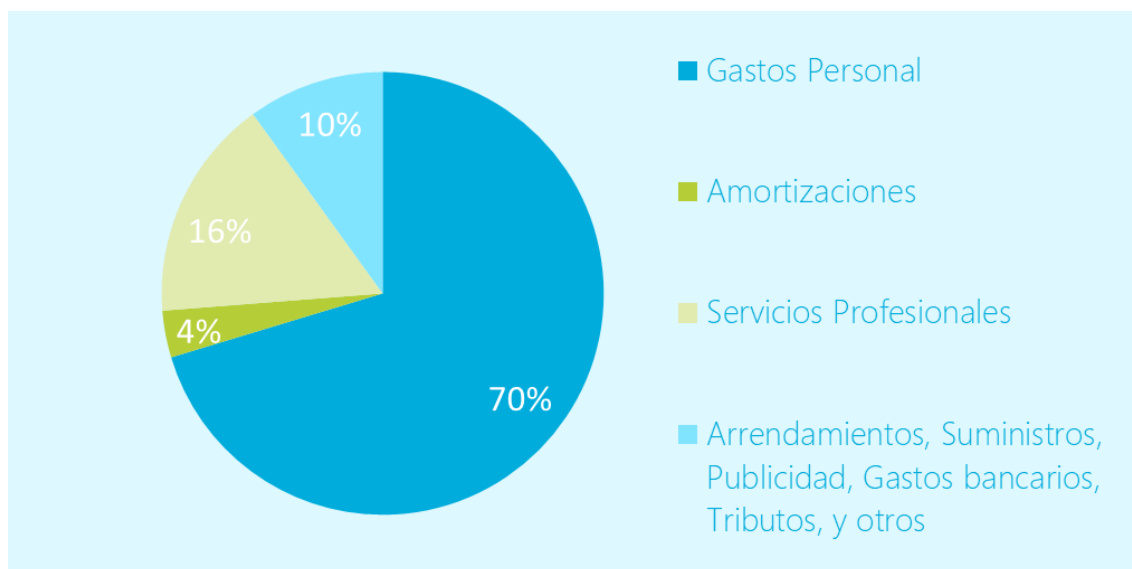
Fuentes de Ingresos en el periodo 2023-2024

Cada ingreso se transforma en conocimiento, innovación y mejora del sistema ATM.

## Distribución de gastos

La política de gasto de CRIDA se orienta a maximizar el impacto de la inversión en investigación aplicada, destinando la mayor parte de los recursos a proyectos de I+D+i, desarrollo tecnológico y validación de soluciones. La gestión presupuestaria se caracteriza por un control riguroso, orientado a la eficiencia y al cumplimiento de los objetivos estratégicos de la organización.

Esta estructura financiera refleja el papel de CRIDA como centro de referencia en investigación aplicada al tráfico aéreo, con una estrategia clara de *reinversión en talento, tecnología y colaboración*.




Distribución de gastos en el periodo 2023-2024

## 7 Resumen del periodo

Durante el periodo 2023–2024, CRIDA ha desarrollado su actividad técnica en dos grandes ámbitos:

- *Actividades en colaboración*, principalmente en el marco de los programas de SESAR —la principal iniciativa de investigación de la Unión Europea en materia de Gestión del Tráfico Aéreo—, financiadas a través de convocatorias competitivas de investigación.
- *Actividades internas para ENAIRE e INECO*, orientadas a la mejora directa del sistema ATM nacional y al soporte estratégico del proveedor de servicios de navegación aérea.

Ambas líneas se han articulado a través de *áreas técnicas* especializadas, alineadas con el Plan de Vuelo 2025 de ENAIRE y con los objetivos estratégicos de CRIDA.



La contribución de CRIDA a SESAR 3 refuerza el papel de ENAIRE como referente en innovación aeronáutica.

En el primer semestre de 2023 se dio por finalizado el programa *SESAR 2020*, en el que CRIDA participó en 20 proyectos, y se dedicó este periodo a la consolidación de resultados. A continuación, dio comienzo *SESAR 3*, donde *CRIDA participa en 24 de los 61 proyectos* activos en el periodo 2023-2024, consolidando su papel como uno de los socios con mayor implicación en la innovación europea e impulsando la transferencia de resultados hacia la red operativa de ENAIRE.

El programa abarca soluciones de distinta madurez tecnológica, desde investigación exploratoria (*exploratory research*), pasando por la fase de investigación pre-industrial (*Industrial research* y *Fast track*), hasta demostraciones en entornos operacionales reales que preparan el despliegue (*Digital Sky Demosntrations*).









En SESAR 3, CRIDA lidera actividades en áreas clave como la cuantificación de prestaciones aportadas por las nuevas soluciones (PEARL), gestión dinámica del espacio aéreo (ISLAND, HARMONIC, SMARTS, MITRANO), predicción de trayectorias (ATC-TBO), automatización en control de tráfico (FCA, JARVIS) y desarrollo de soluciones para U-space (U-ELCOM, SPATIO, ENSURE, OPERA).

También contribuye a la mejora de los factores humanos en ATM en proyectos como IFAV3, CODA, RESPONSE y SOLO. En todos ellos, CRIDA aporta conocimiento técnico, herramientas de simulación y metodologías de evaluación.

En este contexto, CRIDA ha desarrollado componentes esenciales de algunas soluciones (SECTORIA, DCB Solver o algoritmos de optimización e inteligencia artificial, entre otros), herramientas para mejorar la eficiencia en la ejecución de simulaciones y análisis de resultados (TESEO, PUZZLE o VOCALIST) así como integraciones entre plataformas de validación que han permitido disponer de las capacidades para validar todas las soluciones planteadas.

Dentro de su *plan de actividades para ENAIRE*, CRIDA ha impulsado múltiples iniciativas orientadas a mejorar el sistema ATM nacional y acelerar la adopción de soluciones innovadoras. Destacan la evolución de la plataforma PERSEO, con el desarrollo de nuevos indicadores de medición de presentaciones, y la mejora de los modelos de predicción táctica y estratégica del tráfico aéreo, DELFOS. También se han perfeccionado herramientas para optimizar el diseño de sectores y cuantificar su complejidad, SECTORIA y eCOMMET.


CRIDA impulsa la transferencia tecnológica y convierte la I+D en soluciones aplicadas.

 <p>Connected and automated ATM</p> <p><b>CODA</b> <b>FCA</b></p> <p><b>iSNAP</b> <b>ATC-TBO</b></p>	 <p>Artificial intelligence (AI) for aviation</p> <p><b>JARVIS</b></p>	 <p>Virtualisation and cyber-secure data sharing</p> <p><b>VITACY</b></p>
 <p>Capacity-on-demand and dynamic airspace</p> <p><b>SMARTS</b> <b>KAIROS</b></p> <p><b>IFAV3</b> <b>ISLAND</b></p>	 <p>Civil/Military interoperability and coordination</p> <p><b>HARMONIC</b> <b>MITRANO</b></p>	 <p>Aviation green deal</p> <p><b>HERON</b> <b>ECHOES</b></p>
 <p>U-space and urban air mobility</p> <p><b>U-AGREE</b> <b>EUREKA</b></p> <p><b>OperA</b> <b>ENSURE</b> <b>SPATIO</b> <b>U-ELCOM</b></p>	 <p>Air-ground integration and autonomy</p> <p><b>SOLO</b> <b>IRINA</b></p>	<p>Transversal</p> <p><b>PEARL</b> <b>AMPLE3</b></p>
<p><b>EXPLORATORY RESEARCH</b></p> <p><b>INDUSTRIAL RESEARCH</b></p>	<p><b>FAST-TRACK VALIDATION</b></p> <p><b>DIGITAL SKY DEMONSTRATORS</b></p>	

Proyectos del programa SESAR 3 participados por CRIDA en 2023-2024. Organizados según las áreas de principales de SESAR 3 y el grado de madurez tecnológica.

En el área de factores humanos, se han realizado estudios psicofisiológicos a los controladores con dispositivos para registrar la actividad cerebral o el movimiento y dilatación de la pupila, y se ha creado un laboratorio especializado en colaboración con la Universidad Politécnica de Madrid (UPM).

Además, CRIDA ha impulsado el *programa de innovación abierta de ENAIRE*, consolidando un ecosistema de colaboración entre universidades, startups y el sector aeronáutico. Durante este periodo se han lanzado concursos de becas, ideas de negocio y retos tecnológicos, destacando soluciones como U-MICROMETEO, CIA3 y Quantum Reservoir Computing. Asimismo, se ha acelerado el desarrollo de startups como Birdstop y Applied Innovation Methods, con pruebas piloto en entornos reales. El Demo Day celebrado en abril de 2024 sirvió como escaparate de los avances logrados.



CRIDA fortalece la conexión entre investigación académica y aplicación operativa.

La colaboración con el ámbito universitario constituye un pilar fundamental de la estrategia de innovación de CRIDA. Esta relación se articula principalmente a través del *Clúster Español en Investigación en ATM*, liderado por CRIDA, que agrupa a universidades nacionales vinculadas al sector aeronáutico. Durante el periodo 2023–2024, se han publicado 53 becas en colaboración con hasta 10 universidades, lo que ha permitido impulsar el talento joven y reforzar la formación doctoral en áreas clave del sistema ATM. Además, se han desarrollado proyectos conjuntos en investigación aplicada, especialmente en factores humanos, abordando modelos cognitivos, estudios sobre carga mental, confianza en la automatización y nuevas interfaces sensoriales.

Durante el periodo 2023–2024, CRIDA ha reforzado sus mecanismos de *transferencia tecnológica*. A través de jornadas divulgativas y sesiones de formación dirigidas a sus socios, especialmente en ámbitos como Big Data, Machine Learning y validación de conceptos ATM. Además, CRIDA ha materializado múltiples acciones de transferencia tecnológica.

Paralelamente, CRIDA ha consolidado su papel como *agente de diseminación científica y tecnológica*, con una destacada presencia en congresos y ferias internacionales tales como ATM Seminar, SESAR Innovation Days, ICRAT, Airspace World y DASC.

## 8 Avances técnicos

Orientación estratégica hacia la investigación aplicada a través de proyectos de I+D+i.

CRIDA estructura su actividad en *Áreas Técnicas especializadas en aspectos clave del sistema ATM*. Estas áreas permiten abordar los retos del tráfico aéreo desde múltiples perspectivas, combinando conocimiento técnico, innovación y colaboración.

Las actividades de CRIDA están *diseñadas para apoyar los objetivos definidos en su Plan Estratégico, a su vez alineado con el Plan de Vuelo 2025, la hoja de ruta de ENAIRE*. Esta alineación garantiza que los esfuerzos de investigación, desarrollo e innovación de CRIDA estén plenamente integrados en la estrategia global del proveedor de servicios de navegación aérea, contribuyendo así a su evolución y modernización.

En este marco, CRIDA desempeña un papel clave en la consecución de los objetivos estratégicos de ENAIRE, como el refuerzo de la seguridad operacional, la mejora de la calidad y resiliencia de los servicios, el impulso a la sostenibilidad ambiental, el aumento de la eficiencia y competitividad, y la aceleración de la transformación digital.

Además, sus actividades están vinculadas a diversos planes específicos del Plan de Vuelo 2025, como los dedicados a la innovación, el cielo digital, la gestión de clientes, los drones y la sostenibilidad, consolidando su papel como motor tecnológico y estratégico dentro del sistema de navegación aérea.

A continuación, se presentan las principales áreas técnicas en las que CRIDA concentra sus esfuerzos de investigación y desarrollo. Cada una de ellas aborda aspectos clave del sistema de navegación aérea, contribuyendo de forma directa a los objetivos estratégicos de ENAIRE.



## Medición de prestaciones y calidad del servicio

Esta área se centra en evaluar de forma objetiva cómo funciona el sistema ATM y cómo pueden mejorarse sus servicios. Medir es el primer paso para innovar.



## Previsión de trayectorias y demanda

Mejora las estimaciones de tráfico aéreo, fundamentales para planificar con precisión y optimizar la seguridad, eficiencia y calidad del servicio.



## Gestión de la demanda y capacidad

Trabaja en el dimensionamiento óptimo del sistema ATM, asegurando que se adapte a las necesidades operativas actuales y futuras.



## Gestión meteorológica

Desarrolla soluciones para afrontar los desafíos que plantea la previsión y gestión del clima, un factor crítico en la operación aérea.



## Gestión de recursos de control

Contribuye a mejorar la escalabilidad, resiliencia y capacidad de la red, facilitando una gestión más eficiente de los recursos humanos y técnicos.



## Análisis de factores humanos

Estudia cómo las personas interactúan con el sistema, asegurando que las soluciones desarrolladas tengan en cuenta el rendimiento humano y la experiencia del usuario.



## Aeropuertos

Refuerza la relación con los aeropuertos como clientes de ENAIRE, promoviendo nuevos servicios más globales y adaptados a sus necesidades.



## Drones

Impulsa el desarrollo de tecnologías emergentes y nuevos usuarios del espacio aéreo, como los drones y la movilidad aérea urbana.



## Inteligencia Artificial

Da soporte transversal a todas las áreas, facilitando la digitalización del sistema ATM mediante el uso de Big Data e IA, en línea con el Plan de Innovación de ENAIRE.



## Infraestructura de validación

Proporciona entornos de simulación y prueba para validar nuevas soluciones antes de su implementación, garantizando su eficacia y seguridad.

## 8.1 Medición de prestaciones y calidad del servicio

### Líneas de actuación



Comprender las causas, predecir las prestaciones y anticipar los beneficios: pilares del análisis técnico en CRIDA.

Esta área técnica forma parte del Plan Estratégico de CRIDA, ya que contribuye directamente a su misión: “analizar cuantitativa y sistemáticamente las prestaciones del sistema, diagnosticar los problemas e identificar sus causas”.

Las líneas de actuación en el área son:

1. *Análisis causal y predicción de prestaciones del sistema actual* para una gestión en la provisión de servicios de tráfico aéreo basada en prestaciones.
2. *Predicción de beneficios de nuevas soluciones ATM* en el momento de su implantación, y desarrollo de nuevas metodologías para predecir prestaciones.
3. Evaluación de *interdependencias entre indicadores* de prestaciones.
4. Evolución en el análisis de *factores humanos* y su impacto en seguridad.

### Avances técnicos

La medición de prestaciones en CRIDA se articula en torno a dos pilares principales: el desarrollo iterativo de la plataforma PERSEO (en proceso de industrialización a través de su incorporación a la herramienta EYWA); y el liderazgo de las actividades de gestión de prestaciones del programa SESAR desde su inicio en 2008.

#### Actividades en colaboración con terceros

Durante 2023 y 2024, CRIDA ha liderado los proyectos de medición de prestaciones del programa SESAR. Hasta finales de 2023, coordinó *PJ19.04* consolidando los resultados de prestaciones de todas las soluciones del programa. Desde entonces, continúa esta labor a través del proyecto *PEARL*, que

además de medir prestaciones, participa en la definición de los nuevos objetivos para el horizonte 2050, recogidos en la edición 2024 del *Plan Maestro ATM Europeo*.

Este liderazgo ha impulsado la *colaboración con la Performance Review Unit (PRU) de Eurocontrol en el área de seguridad*, evaluando la adopción europea de herramientas desarrolladas por CRIDA para monitorización y análisis causal. También se ha explorado el uso de datos abiertos como fuente fiable para estas capacidades.

CRIDA lidera la definición de prestaciones en SESAR, integrando simulación, análisis causal y factores humanos.

En el marco de *PJ19.04* y *PEARL*, se ha evolucionado el *modelo de evaluación de beneficios del programa SESAR*, incluyendo métricas para U-space y nuevos indicadores sobre la experiencia del pasajero, alineados con la normativa europea. Además, CRIDA ha contribuido a definir la *hoja de ruta que conecta la investigación de SESAR con los escenarios de despliegue* a través del proyecto AMPLE3.

CRIDA ha integrado en PEARL los resultados del proyecto NOSTROMO, basado en *metamodelos que permiten anticipar prestaciones mediante simulaciones aceleradas*, facilitando la identificación de interdependencias entre soluciones SESAR.

Finalmente, en el ámbito del análisis de factores humanos, CRIDA ha liderado esta área dentro de SESAR. Junto a Honeywell, ha coordinado la *definición de la evolución de la interacción entre operadores humanos e inteligencia artificial*, reflejada en la ruta de automatización del Plan Maestro ATM Europeo.



Participantes del curso de seguridad operacional impartido por PEARL en diciembre 2024

PERSEO es un marco de análisis y monitorización de indicadores de tráfico aéreo desarrollada por CRIDA.

## Actividades internas para ENAIRE

Las actividades internas se han centrado en la evolución de la plataforma PERSEO y alimentan a la línea de actuación de *análisis causal y predicción de prestaciones del sistema actual*. Incluyen el soporte a su industrialización a nivel de definición de arquitectura y especificaciones de la herramienta EYWA, en colaboración con ENAIRE.

Las nuevas características desarrolladas en PERSEO incluyen una nueva vista de vuelos VFR, la evolución de la monitorización automática de aterrizajes frustrados, la incorporación de la información meteorológica y nuevas vistas para el análisis de la seguridad operacional.

Por otro lado, se han realizado análisis del impacto de nuevos directos en el espacio aéreo español basados en datos de PERSEO. Dichos análisis han resultado en el desarrollo de una metodología que facilita el análisis para la adopción de nuevos directos.

De igual forma, se ha mejorado la base de datos de PERSEO, incorporando nuevas fuentes de información y evolucionando los procesos de análisis de la calidad del dato. Este sistema, que contiene más de 15 años de información operacional, se consolida como base esencial para la medición automática de prestaciones y el desarrollo de modelos predictivos e inteligencia artificial.



Nueva vista de Perseo para la monitorización de movimientos VFR

## Siguientes pasos

En el *análisis causal y predicción de prestaciones del sistema* se identifican cuatro actividades:

- Evolución de funcionalidades PERSEO, incluyendo modelos predictivos.
- Incorporación de nuevas fuentes de datos, especialmente en tiempo real proporcionadas, entre otros, por el sistema *HYPERION* de ENAIRE.
- Estudios específicos de aspectos del sistema ATM.
- Soporte a la industrialización de PERSEO en EYWA

Como parte de la línea de *predicción de beneficios de nuevas soluciones*, se pretende continuar con el liderazgo de las prestaciones en la nueva llamada del programa SESAR 3.

En el ámbito de la evaluación *de interdependencias entre indicadores*, se prevé seguir evolucionando las metodologías de la estimación de interdependencias y beneficios previstos de las soluciones, mediante la explotación de los resultados de proyectos previos como NOSTROMO y SIMBAD en el proyecto PEARL. Además, se ha identificado la necesidad de identificar las interdependencias entre ATM y U-space cuando coexisten en el mismo espacio aéreo.

Finalmente, uno de los objetivos de CRIDA es mantener el liderazgo del área de *Factores Humanos* en SESAR 3, aplicándolo a dominios emergentes como la Inteligencia Artificial y su relación con los operadores humanos.

## 8.2 Previsión de tráfico y trayectorias



CRIDA impulsa la predicción de demanda y trayectorias como base para la automatización inteligente del sistema ATM.

### Líneas de actuación

Esta área técnica se centra en mejorar la previsión de la demanda de tráfico y de la predicción táctica de las trayectorias. Las mejoras en la predicción permiten identificar con antelación situaciones que requieren intervención operativa, mientras que una previsión precisa de la demanda facilita el dimensionamiento eficiente del sistema ATM y sus recursos

Las actividades desarrolladas contribuyen a dos objetivos del plan estratégico de CRIDA. Por un lado, la predicción precisa de demanda y trayectorias es clave para construir un modelo causal y predictivo de la operación y la seguridad operacional de ENAIRE, apoyando el objetivo de gestión basada en la evaluación y predicción de prestaciones. Por otro lado, el uso de aprendizaje automático mejora la calidad de las predicciones que alimentan funciones de automatización en procesos ATM, contribuyendo al objetivo de facilitar la adopción de tecnologías de IA/ML en niveles más avanzados de automatización.

En línea con estos objetivos estratégicos, CRIDA identifica tres líneas de actuación:

1. *Predicción táctica de trayectorias* con horizontes temporales de hasta 30 minutos, mediante una infraestructura de servicios basada en aprendizaje automático.
2. *Predicción pre-táctica de la demanda* con caracterización de su precisión y volatilidad para mejorar la toma de decisiones asociadas a la gestión de la capacidad y demanda.
3. *Provisión de predicciones estratégicas* de la demanda tanto a corto plazo (hasta un año vista), incluyendo su distribución horaria y espacial, como a medio/largo plazo (a partir de un año vista), incluyendo su distribución espacial y granularidad mensual.

## Avances técnicos

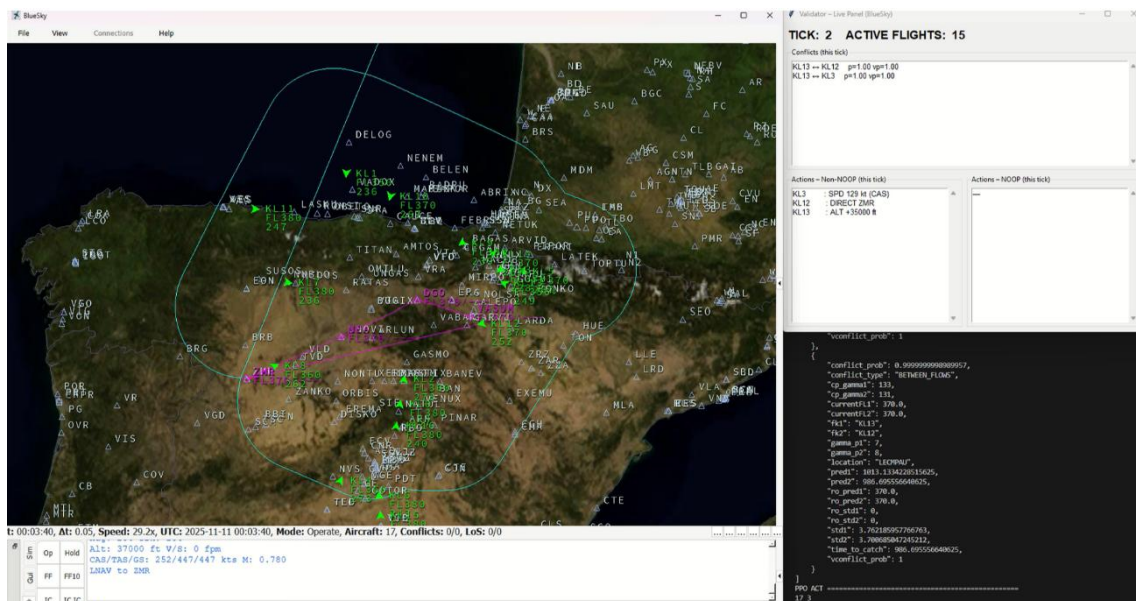
Entre 2023 y 2024, CRIDA ha centrado sus esfuerzos en la previsión estratégica del tráfico aéreo, consolidando el trabajo iniciado en 2020 tras la pandemia. También ha participado en proyectos del programa SESAR, enfocados en la predicción de trayectorias y demanda pre-táctica.

## Colaboraciones


CRIDA trabaja en la predicción de trayectorias a partir de datos históricos sobre la intención de la aeronave y la de control, mejorando la precisión y facilitando la gestión basada en trayectorias.

Durante este periodo, se han desarrollado predictores multi-horizonte adaptados a los flujos de tráfico del sector. En el proyecto *ATC-TBO* (SESAR), se han creado modelos para evaluar la incertidumbre en la predicción táctica y su impacto en la detección de conflictos. Estos resultados se publicaron en 2024 en la revista *Aerospace*, en colaboración con la Universidad Politécnica de Madrid. CRIDA también ha liderado el diseño de soluciones para la gestión de la *separación en entornos altamente automatizados*.

ATC-TBO:  
modelos  
predictivos  
para una  
gestión del  
tráfico aéreo  
más precisa y  
automatizada.



Captura de las simulaciones en tiempo acelerado realizadas con la herramienta BlueSky de TU-Delft en la que se muestran las resoluciones propuestas por un agente entrenado con técnicas de Aprendizaje de Refuerzo.



DELFO  
evoluciona de  
herramienta de  
emergencia a  
sistema clave  
para la  
planificación  
estratégica del  
tráfico aéreo.

Además, junto a la Universidad Politécnica de Madrid, se ha desarrollado un *modelo basado en Inteligencia Artificial que predice el plan de vuelo más probable*, como actividad complementaria al proyecto *DELFO*. Este modelo predice por qué sectores pasa el vuelo, en qué orden, y a qué hora, además de predecir el flujo que sigue.

## Actividades internas para ENAIRE

*DELFO* es una herramienta de predicción de tráfico aéreo desarrollada en 2020 para responder a la necesidad de previsión de demanda durante la pandemia de COVID-19, cuando los modelos tradicionales dejaron de ser efectivos. Su metodología, basada en la monitorización de errores históricos, permite realizar previsiones en dos horizontes:

- Corto plazo (hasta 1 año): predicción a nivel de vuelo.
- Medio/largo plazo (hasta 5-10 años): predicción de volumen diario por mercados.

Durante 2023 y 2024, con el restablecimiento del tráfico prepandemia, CRIDA y ENAIRE han trabajado en consolidar la metodología de *DELFO*, mejorar su precisión y ampliar su aplicación a otras previsiones, como las unidades de servicio. Los principales avances en la metodología han sido:

- *Predicción de sobrevuelos*: se han incorporado técnicas de Machine Learning para mejorar la precisión y granularidad frente a los métodos estadísticos iniciales.
- *Movimientos por aeropuerto y franjas horarias*: se han desarrollado modelos específicos para vuelos no programados, tradicionalmente difíciles de predecir.
- *Predicción a medio/largo plazo*: se ha automatizado la metodología basada en series temporales, incorporando variables de intervención (COVID, PIB, paro, eventos, etc.).
- *Plan de vuelo detallado*: se han aplicado técnicas de Machine Learning para predecir la secuencia de sectores y puntos de paso de cada vuelo, en colaboración con la UPM.

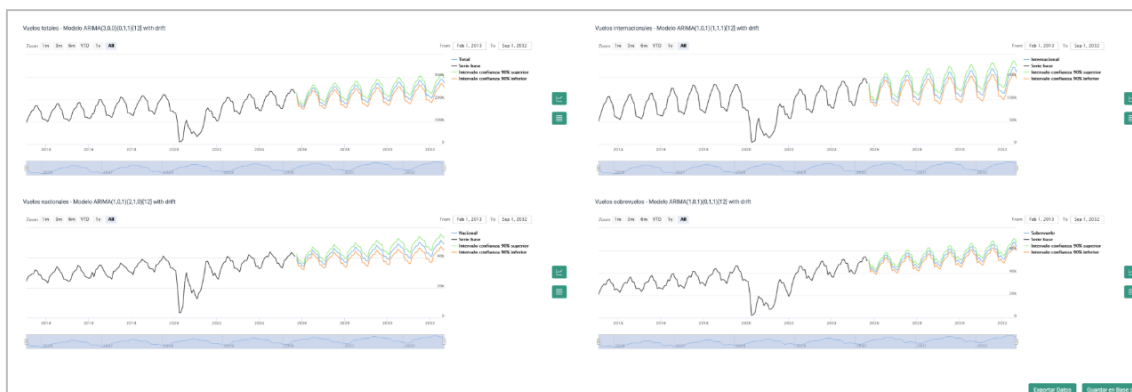
- *Estimación de tasas de navegación aérea*: por primera vez, se ha utilizado la demanda prevista por DELFOS para estimar unidades de servicio e ingresos a corto plazo

*TRACTOR* es un proyecto desarrollado por CRIDA cuyo objetivo es predecir trazas radar de vuelos a partir de plan de vuelo mediante técnicas de aprendizaje automático, con el fin de estimar indicadores clave en la plataforma PERSEO. Durante este periodo, se ha trabajado en:

- La identificación de fuentes de datos necesarias para el entrenamiento del modelo.
- El desarrollo de la estrategia de implementación.
- La verificación de los primeros prototipos de Machine Learning, desarrollados por la empresa *ISA Software*.
- El inicio de la definición de los servicios necesarios en PERSEO para la integración del modelo TRACTOR.

Además, en 2024 se ha desarrollado un marco de *tratamiento de datos para acelerar el entrenamiento de predictores basados en redes neuronales*, con vistas a su aplicación en el despliegue del *Free Route* en España, dentro del proyecto *HISPAFRA* de ENAIRE.

The screenshot shows the DELFOS application interface with two main sections: 'PREVISION' and 'DATOS AUXILIARES'. The 'PREVISION' section has a dropdown menu for 'Prognosis DELFOS' with the selected value 'DEL\_20251020\_20261015\_AUTO'. The 'DATOS AUXILIARES' section contains several input fields: 'Prognosis DELFOS' (DEL\_20250929\_20260924\_AUTO), 'Prognosis ECTL' (2025-08-04), 'Fuente OAG' (20250929), 'Fuente Geslot' (2025-10-05), and 'Históricos Reales' (2023). At the bottom right, there are 'Aplicar' and 'Cancelar' buttons.



Gráficas de resultados de una previsión de medio/largo plazo lanzada desde la aplicación DELFOS en la que se ven los 3 mercados (nacional, internacional y sobrevuelo) más el total con la representación de serie histórica, previsión e intervalos de confianza.

## Siguientes pasos

En el ámbito de las predicciones estratégicas de DELFOS, se plantean los siguientes desarrollos:

- *Continuar incorporando técnicas de Machine Learning* para mejorar la precisión y aumentar la granularidad de las predicciones, en particular continuar mejorando la precisión de las predicciones de movimientos por aeropuertos y franjas horarias.
- *Consolidar la predicción del plan de vuelo completo*, asegurando una asociación robusta con el paso por sectores.
- *Ampliar las funcionalidades de la web de DELFOS* para ofrecer más información útil a ENAIRE.

Además, CRIDA prevé utilizar las previsiones de DELFOS para avanzar en el análisis de prestaciones del sistema, pasando de la medición a la *predicción de indicadores*. Para ello, se combinarán los planes de vuelo generados por DELFOS con otras predicciones, como las del proyecto TRACTOR.

En colaboración con la UPM, se utilizarán las predicciones de DELFOS como entrada para el *diseño automático del espacio aéreo*. Los planes de vuelo más probables permitirán estimar la complejidad prevista y proponer nuevas estructuras de espacio aéreo.

En cuanto a las predicciones pre-tácticas, CRIDA aplicará estos desarrollos para mejorar la *monitorización de la seguridad operacional*. Los predictores de trayectorias y conflictos se emplearán para analizar parámetros de controlabilidad y su impacto en las pérdidas de separación.

## 8.3 Gestión de la demanda y la capacidad



CRIDA apuesta por soluciones inteligentes para afrontar la crisis de capacidad y anticiparse a la variabilidad de la demanda.

### Líneas de actuación

En su Plan Estratégico, CRIDA identifica la necesidad de *validar soluciones que den respuesta a la crisis de capacidad y a la creciente variabilidad de la demanda*. Para ello, resulta fundamental desarrollar medios y técnicas de validación eficientes en el ámbito de la gestión de la demanda y la capacidad del espacio aéreo.

La adopción de tecnologías de Inteligencia Artificial (IA) y aprendizaje automático en los sistemas de gestión del espacio aéreo y de afluencia se considera esencial para optimizar el uso y la provisión de capacidad. Asimismo, CRIDA contribuye a acelerar el ciclo de vida de I+D y el despliegue de soluciones mediante propuestas de mejora en la evaluación de la capacidad.

En coherencia con este objetivo, se establecen tres líneas principales de actuación:

1. *Mejora de la capacidad y gestión de afluencia*: Propuestas orientadas a optimizar la configuración del espacio aéreo y seleccionar medidas de gestión de la demanda más eficientes, con el fin de minimizar las demoras y el impacto sobre los usuarios.
2. *Automatización e Inteligencia Artificial*: Investigación y aplicación de técnicas avanzadas que permitan alcanzar mayores niveles de automatización en la gestión del espacio aéreo, favoreciendo una toma de decisiones más eficiente y precisa.
3. *Validación de soluciones*: Desarrollo de prototipos y herramientas de validación que permitan reducir los tiempos de desarrollo y adaptar los servicios a las necesidades operativas reales, reforzando la fiabilidad y madurez de las soluciones propuestas.

# Avances técnicos

## Colaboraciones

**HARMONIC, ISLAND, SMARTS y MITRANO: Innovación para un espacio aéreo más flexible y eficiente.**

Desde sus inicios, CRIDA ha trabajado en la mejora de la capacidad del espacio aéreo y la optimización de la gestión de la demanda. Los avances técnicos logrados durante 2023 y 2024 son, en su mayoría, una continuación de líneas de investigación consolidadas.


### Mejora de la capacidad y gestión de afluencia

CRIDA continúa desarrollando el concepto de *Dynamic Airspace Configuration*, que permite un diseño más flexible del espacio aéreo, adaptado a los flujos de tráfico y más resiliente ante variaciones en la demanda. En esta línea, lidera soluciones de alto nivel de madurez dentro del programa SESAR, como los proyectos *HARMONIC* e *ISLAND*, así como iniciativas más experimentales como *SMARTS*.

En el marco del mismo programa, el proyecto *MITRANO* avanza en la *integración operativa de las misiones militares*. CRIDA ha participado en el desarrollo y validación del concepto de áreas móviles dinámicas (*Dynamic Mobile Areas -DMA*) como mecanismo de reserva flexible del espacio aéreo. Este concepto permite adaptar en tiempo real la extensión y posición de las áreas reservadas según las necesidades de las misiones militares, garantizando al mismo tiempo la eficiencia y seguridad del tráfico civil.



*Metodología del proyecto SMARTS: Explora el diseño flexible de sectores y la optimización de los procesos DCB, mediante técnicas avanzadas de Machine Learning y algoritmos de optimización.*



Desarrollo de algoritmos de optimización e inteligencia artificial que mejoran la resiliencia del sistema ATM.

### Herramientas de apoyo a la gestión de afluencia

En el marco de estos proyectos, se han mejorado las funcionalidades del optimizador de configuraciones *SECTORIA*, incluyendo:

- Un sistema de ranking que considera el coste asociado al cambio entre configuraciones (*configuration pathway*).
- El desarrollo de un indicador de *resiliencia*, que se integrará en la función de coste del optimizador.

### Desarrollo del módulo DCB Solver

Se ha iniciado el desarrollo del módulo *DCB Solver*, orientado a la identificación de medidas de demanda en las fases pre-táctica y táctica, especialmente en la fase INAP (de 6 horas a 20-30 minutos antes de la operación). Este módulo propone medidas óptimas (re- enrutamientos, restricciones de nivel de vuelo, horarios de paso obligatorios) para resolver desequilibrios entre demanda y capacidad, considerando su impacto en indicadores clave como retrasos, consumo de combustible o distancia recorrida.

### Automatización e Inteligencia Artificial

CRIDA ha desarrollado algoritmos basados en *Machine Learning* para:

- Determinar automáticamente medidas de demanda óptimas y los vuelos a los que aplicar dichas medidas.
- Calcular de forma automática el umbral de capacidad de un sector, especialmente relevante en entornos DAC con alta variabilidad y granularidad en el diseño del espacio aéreo.
- Identificación automática del plan de configuraciones óptimo en entornos de sectorización dinámica.

Este último desarrollo se ha realizado en colaboración con el departamento de simulación de ENAIRE, integrando la metodología SCOPE, actualmente utilizada para la determinación de capacidad de los sectores de espacio aéreo.

PUZZLE es la plataforma insignia de CRIDA para la integración de herramientas de equilibrio entre Demanda y Capacidad.

### Validación de soluciones

Se ha desarrollado una nueva plataforma de simulación orientada a servicios (*PUZZLE*), conectada con la plataforma del Network Manager de INNOVE mediante servicios B2B. Esta plataforma está diseñada para su uso por parte de la posición FMP (Flow Management Position) y ha servido para la validación de las soluciones desarrolladas en los proyectos DCB de SESAR. Proporciona funcionalidades para:

- Monitorización y declaración de desequilibrios de demanda y capacidad (spots).
- Aplicación de medidas de gestión de demanda y capacidad en un entorno de sectorización dinámica.
- Integración de indicadores de complejidad y algoritmos de optimización de configuraciones.
- Análisis what-if y what-else (integrando herramientas como SECTORIA y DCB Solver).
- Funcionalidades pre-tácticas de ASM/ATFCM y servicios de comunicación con el WOC (Wing Operations Centres).
- Capacidades para configuración y gestión en tiempo real de parámetros DMA con integración en plataforma ATC.



Vista de servicios FMP de PUZZLE implementados en los proyectos HARMONIC, ISLAND y SMARTS.

Finalmente, se han preparado y coordinado los ejercicios de validación que se llevarán a cabo en 2025, con el objetivo de cuantificar los beneficios de las soluciones propuestas en la gestión de demanda y capacidad.

## Actividades internas para ENAIRE

CRIDA ha impulsado la aceleración del ciclo de vida de I+D de soluciones orientadas al incremento de la capacidad y a la optimización de la gestión de afluencia, mediante la colaboración con ENAIRE para la integración de resultados en sus sistemas y operaciones.

En este contexto, se ha trabajado en el refinamiento del optimizador de configuraciones SECTORIA y de la herramienta eCOMMET, con el objetivo de su potencial incorporación en la herramienta operacional de ENAIRE (IMPACT). Estas acciones contribuyen a mejorar la eficiencia en la toma de decisiones y a optimizar la configuración del espacio aéreo, alineándose con los objetivos estratégicos de ENAIRE en materia de capacidad y gestión del tráfico.



*Infraestructura de validación de MITRANO, que incorpora en PUZZLE funcionalidades de gestión pre-táctica ASM/ATFCM, servicios de comunicación con el WOC y configuración de DMAs conectadas con ITEC.*

## Siguientes pasos

En el ámbito técnico, CRIDA continuará avanzando en las tres líneas estratégicas, con especial foco en:

- *Incremento de la automatización*: Se prevé mejorar las herramientas de soporte para diseñadores de espacio aéreo, FMP y controladores, con el objetivo de reducir su carga de trabajo sin comprometer la consciencia situacional.
- *Mejora del algoritmo de capacidad y demanda*: Se desarrollarán nuevas funciones de soporte para el análisis y resolución de desequilibrios, destacando:
  - *Un algoritmo que determine los umbrales de ocupación para nuevos sectores operacionales*, complementando los umbrales tradicionales de entradas por hora.
  - *La mejora de las funcionalidades what-if y what-else*, incorporando factores clave en la toma de decisiones como transiciones entre configuraciones, meteorología, actividad militar y el impacto medioambiental.

## 8.4 Meteorología



La integración de información meteorológica en ATM aporta capacidad predictiva, eficiencia operativa y resiliencia al sistema ATM.

### Líneas de actuación

La gestión del impacto de las condiciones meteorológicas adversas en el tráfico aéreo es un aspecto crítico para garantizar la seguridad y la eficiencia de las operaciones. Conocer de forma anticipada estas ocurrencias y sus efectos es clave para minimizar su impacto. Sin embargo, actualmente no se dispone de herramientas precisas de predicción meteorológica adaptadas a los usos ATM ni integradas en las plataformas de gestión de tráfico existentes.

Asimismo, queda mucho por avanzar en el análisis del impacto que determinadas condiciones meteorológicas tienen sobre las prestaciones del sistema, un ámbito en el que la digitalización puede aportar soluciones significativas.

En respuesta a esta necesidad, CRIDA definió un objetivo específico en su plan estratégico: *incorporar* información meteorológica al análisis de prestaciones. Para ello, se ha creado un área técnica dedicada a la integración de datos meteorológicos con el resto de la información del sistema, de forma que su explotación pueda aplicarse desde la operación hasta el análisis.

Las líneas de actuación para alcanzar este objetivo son:

1. *Análisis del impacto de ocurrencias y condiciones meteorológicas* en las operaciones y en las prestaciones del sistema ATM.
2. *Desarrollo de metodologías y herramientas* orientadas tanto a la mejora de la predicción meteorológica adaptada a usos ATM como al apoyo en la gestión de condiciones adversas.
3. *Integración de información meteorológica* en las herramientas existentes de gestión y análisis de datos ATM.

## Avances técnicos

### Colaboraciones

**KAIROS:**  
anticipación  
meteorológica  
para decisiones  
inteligentes en  
la red y la  
movilidad  
aérea urbana.

Mediante su participación en el proyecto *KAIROS*, actualmente en ejecución, CRIDA contribuye a las líneas de actuación relacionadas con el análisis del impacto de condiciones meteorológicas y el desarrollo de metodologías y herramientas.

KAIROS, una iniciativa enmarcada en la Investigación Industrial de SESAR3, busca transformar la forma en que se gestionan las reducciones de capacidad debido a condiciones meteorológicas adversas, permitiendo a los actores de la aviación tomar decisiones informadas a nivel de red, en los centros de gestión de afluencia (FMPs) y en el contexto de la movilidad aérea urbana (Urban Air Mobility). Al proporcionar predicciones meteorológicas precisas con mayor anticipación, KAIROS redundará en una mejor planificación operativa, reduciendo las interrupciones y aumentando la eficiencia.

En este marco, CRIDA desempeña un papel clave en la *evaluación de los módulos de predicción meteorológica basados en inteligencia artificial (IA)*, coordinando la evaluación de la calidad y usabilidad de las predicciones en entornos operacionales.

Los fenómenos meteorológicos que se predicen en KAIROS son:



Convección



Turbulencias



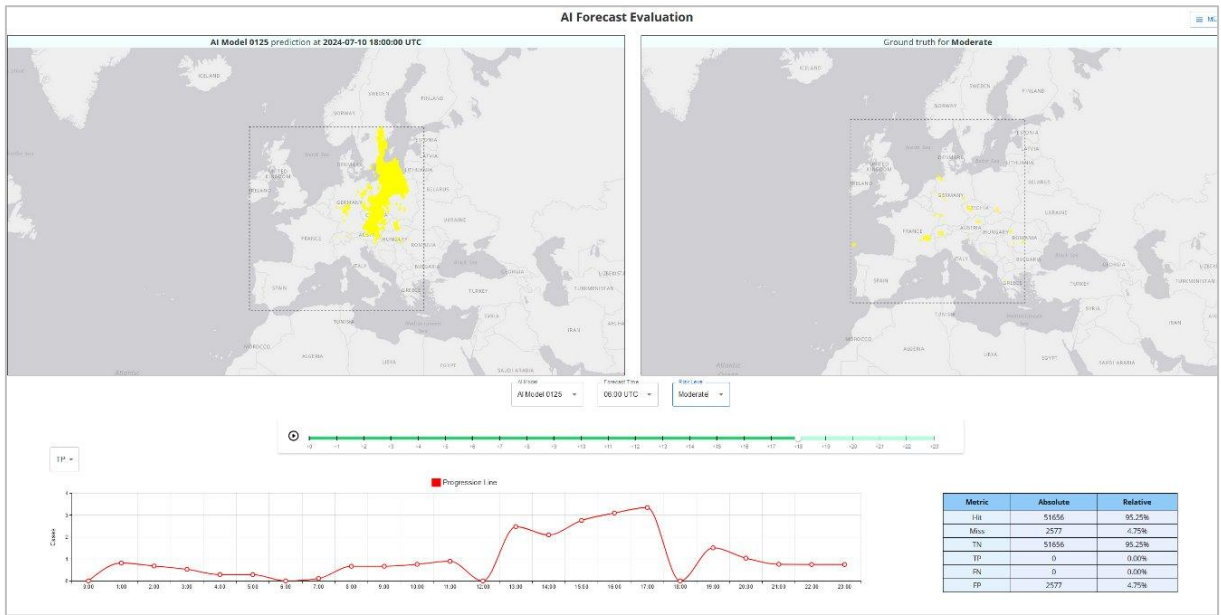
Engelamiento



Baja visibilidad

En esta actividad se llevan a cabo evaluaciones operacionales para analizar los beneficios derivados de la integración de la predicción meteorológica basada en IA en plataformas de los usuarios finales. Se evalúan tanto la precisión de las nuevas herramientas y predictores, como la representación visual, granularidad y funcionalidades en las interfaces de los operadores.

CRIDA coordina las pruebas y validaciones operacionales, trabajando junto con otros socios como Eurocontrol, DSNA, ENAIRE e INTELMET, en escenarios simulados y en entornos pre-operacionales.

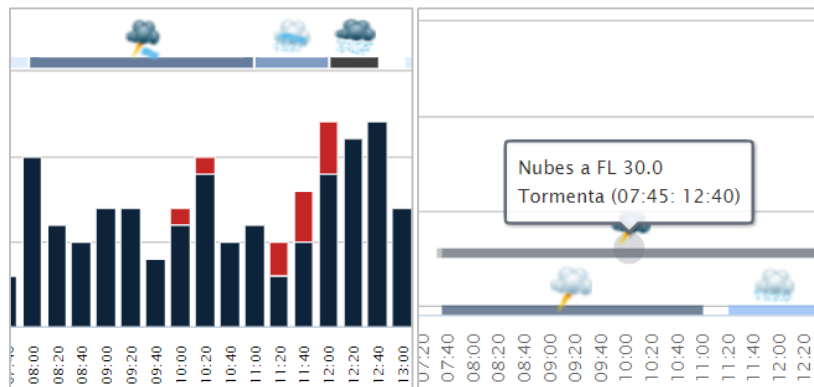


Evaluaciones de predictor IA de fenómenos convectivos de KAIROS

## Actividades internas para ENAIRE

Las actividades internas se han centrado en el ámbito de integración de información meteorológica en herramientas existentes. CRIDA ha continuado su actividad de años anteriores de *inclusión de datos de los informes meteorológicos de aeródromo METAR en la herramienta PERSEO*. La nueva vista de históricos de esperas, operativa desde comienzos de 2023, permite analizar información meteorológica de forma visual y textual junto con datos de esperas en llegadas.

La presentación incluye un mapa de fenómenos significativos (basados en informes meteorológicos SIGMET) por tipo, duración y altitud, y una tabla de viento con indicación visual de dirección, variabilidad y máxima intensidad.



Capturas de la vista de la herramienta PERSEO con información meteorológica

Durante 2024 se ha trabajado en adaptar la presentación de *información meteorológica a las visualizaciones de frustradas* en aeródromos disponibles en la herramienta PERSEO.

Este mismo año, CRIDA ha desarrollado un *histórico detallado de predicciones meteorológicas de temperatura, presión atmosférica y vientos, tanto en superficie como a diferentes altitudes*, utilizando datos públicos proporcionados por la Agencia Meteorológica Alemana (DWD). Esta iniciativa se ha centrado en procesar y analizar estos datos para obtener predicciones más precisas y útiles para su aplicación en la gestión del tráfico aéreo.

## Siguientes pasos

En la línea de *análisis de impacto de ocurrencias meteorológicas*, CRIDA tiene previsto usar técnicas avanzadas de detección de patrones en las variables meteorológicas, que posteriormente puedan analizarse en términos de correlación estadística con prestaciones aeronáuticas, incluyendo demoras.

En la línea de *desarrollo de metodologías y herramientas*, se prevé continuar mejorando los modelos predictivos adaptados a usos ATM con observaciones radar para afinar la precisión de las predicciones. Se continuará trabajando en desarrollar herramientas capaces de proporcionar predicciones basadas en diversos modelos seleccionables, e información meteorológica en tiempo real. Se prevé madurar las herramientas predictivas adaptadas al uso en ATM mediante simulaciones en plataformas ATFCM y validaciones en tiempo real. Uno de los retos clave es incorporar la inteligencia extraída de los análisis de impacto al rediseño y optimización de procedimientos y toma de decisiones.

En cuanto a la *integración de información meteorológica*, se ampliará a otras vistas de PERSEO la presentación integrada de parámetros meteorológicos junto con indicadores de prestaciones, y se evaluará la incorporación de nuevas fuentes de información.

En la hoja de ruta está además la integración de resultados y visualizaciones de modelos predictivos de fenómenos y tendencias meteorológicas con herramientas operacionales de gestión de tráfico y afluencia, así como un análisis de las regulaciones debidas a meteo y de su impacto en las prestaciones del sistema.

## 8.5 Gestión de recursos de control en el día de operación



Innovación continua hacia una gestión aérea más inteligente, flexible y colaborativa.

### Líneas de actuación

La gestión de recursos ATC constituye un problema multidimensional que requiere la consideración simultánea de restricciones normativas (tiempos de trabajo y descanso), mantenimiento de habilitaciones mediante rotación entre sectores, estacionalidad del tráfico y desviaciones respecto a la planificación. La falta de conciliación óptima entre estos factores puede generar impactos significativos en:

- Coste-eficiencia: sobredimensionamiento o infra dimensionamiento de turnos.
- Capacidad: incremento de regulaciones y demoras.
- Factores humanos: sobrecarga cognitiva, fatiga y pérdida de atención.

Para mitigar estos riesgos, CRIDA define tres líneas de actuación en el área de Gestión de Recursos de Control, alineadas con sus objetivos estratégicos de *análisis causal, predicción de prestaciones y aceleración del ciclo de vida I+D*:

1. *Análisis del impacto de futuros conceptos de operación en la gestión de recursos* para reducir demoras asociadas a falta de capacidad y mejorar la eficiencia.
2. *Diseño de procedimientos y herramientas que faciliten el mantenimiento y adquisición de habilitaciones.*
3. *Desarrollo de herramientas de soporte para optimizar y asignar turnos de control* tanto en fase de planificación como en fase táctica.

## Avances técnicos

### Colaboraciones

FCA transforma el tráfico aéreo, distribuye la carga de forma inteligente y abre paso a la automatización.

CRIDA ha impulsado avances en la optimización de conceptos operativos, procedimientos y herramientas, liderando actividades en diversos proyectos de SESAR3 orientadas a analizar cómo nuevos conceptos pueden transformar la gestión de recursos.

#### *Flight Centric ATC o Control sin sectores.*

El concepto Flight Centric ATC (FCA) propone un modo de operación en el que cada controlador gestiona un conjunto de aeronaves durante todo su tránsito por un área FCA. Este enfoque busca distribuir la carga de trabajo de manera más uniforme, aumentar la capacidad y reducir las demoras y las emisiones. *FCA supone un auténtico cambio de paradigma y abre la puerta a una nueva manera de organizar los recursos.*

Durante este periodo, CRIDA ha participado en el proyecto *FCA* de SESAR 3, cuyo objetivo es cerrar el ciclo de investigación del concepto. En el marco del proyecto, CRIDA representa a ENAIRE, liderando la evolución del concepto y la realización de una simulación en tiempo real en la plataforma iTEC.




*Las pruebas del proyecto FCA que tuvieron lugar en noviembre de 2024, en las que se probaron la integración de flujos de tráfico en corredores aéreos de alta automatización (airstreams).*

El proyecto investiga la viabilidad del control por flujos, incorporando el concepto de alta automatización de *airstreams*, transformando la gestión táctica y estratégica del tráfico aéreo.

La validación final se llevará a cabo en abril de 2025, aunque las primeras pruebas comenzaron en noviembre de 2024. La participación en FCA arroja innovadores resultados que van más allá del propio concepto:

- Evaluación de funcionalidades de alta automatización, incluyendo el módulo avanzado de detección y resolución de conflictos.
- Adaptación de la métrica de complejidad eCOMMET al control por flujos, integrando nuevos factores de complejidad en el algoritmo.
- Desarrollo de la herramienta PUZZLE para la monitorización de la distribución de la carga de trabajo y para el soporte en la asignación dinámica de vuelos a controlador.
- Análisis de beneficios y riesgos de la alta automatización en base a análisis de seguridad y factores humanos.

### Mayor Flexibilidad en la asignación de los controladores



IFAV3 habilita la asignación flexible de controladores y optimiza la gestión de recursos.

En la línea estratégica orientada al *diseño de procedimientos y herramientas que faciliten el mantenimiento y adquisición de habilitaciones*, el proyecto *IFAV3 de SESAR 3* aborda el reto de la falta de flexibilidad en la asignación de controladores, derivada de la complejidad regulatoria y de la creciente necesidad de ATCOs habilitados en múltiples sectores, como facilitador de conceptos innovadores tales como la delegación de espacio aéreo o la sectorización dinámica.

CRIDA lidera una solución que incorpora herramientas para reducir la carga cognitiva y reforzar la conciencia situacional, estructuradas en tres categorías:

- *Pre-Shift*: soporte al briefing previo con representación de puntos críticos, volumetría de sectores y consulta de flujos y procedimientos.

- *Adaptativas*: información contextual durante la operación (waypoints, límites verticales, procedimientos digitalizados, soporte en emergencias).
- *Asesoramiento*: recomendaciones directas para la gestión de vuelos específicos (procedimientos integrados en etiquetas, resaltado de vuelos de interés, visualización de flujos y alertas para aplicación de procedimientos).

En 2025 se realizarán dos ejercicios de validación en tiempo real en el laboratorio de CRIDA, con participación de controladores de ENAIRE y NATS. Estos ejercicios simularán entornos operativos en ACC Madrid y Barcelona bajo condiciones diversas (operaciones nocturnas, baja complejidad, meteorología adversa, modos degradados) para evaluar la viabilidad operacional, el rendimiento humano y la eficacia de las herramientas IFAV. La plataforma de validación será iTEC, incorporando nuevas funcionalidades IFAV3 desarrolladas por Indra.

Además, IFAV3 incluye otras soluciones complementarias que contribuyen al *desarrollo de herramientas de soporte orientadas a optimizar y asignar turnos de control*. Una de ellas, liderada por la Universidad Politécnica de Madrid (UPM), consiste en el desarrollo de un *marco común europeo de competencia* alineado con la normativa EU 2015/340. La segunda, liderada por INECO, se centra en la creación de una herramienta para analizar la agrupación de sectores en los que se habilitan los controladores, con el objetivo de mejorar la eficiencia operativa.



Lanzamiento del proyecto IFAV3 en las oficinas de ENAIRE

## Centros Virtuales

CRIDA apoya a ENAIRE en la validación de los centros virtuales, un concepto clave para avanzar hacia una gestión más flexible y resiliente, y coordina el grupo de trabajo de EUROCAE (WG-122) encargado de desarrollar los estándares y entregables necesarios para apoyar la implementación del concepto de centro virtual. Además, participa en los proyectos iSNAP- que evoluciona la plataforma iTEC SkyNex para dar soporte a los centros virtuales- y VITACY (Virtual Center with Triangle Architecture and Cyber-resilience), donde lidera la estimación de beneficios en capacidad, eficiencia y reducción de costes.

## Siguientes pasos

Tras los avances logrados en FCA, IFAV3 y Centros Virtuales, la hoja de ruta contempla acciones orientadas a consolidar y ampliar la aplicabilidad de estas soluciones:

- *Maduración de las herramientas IFAV3*: evolucionar las funcionalidades para su integración en posiciones de control, incrementando su aplicabilidad en entornos de mayor complejidad y tráfico.
- *Extensión a fases estratégicas y pre-tácticas*: desarrollo de capacidades para planificación anticipada y gestión dinámica de recursos.
- *Alta automatización en la asignación de vuelos*: continuar el desarrollo de soluciones para una distribución óptima de la carga entre sistemas automáticos y controladores humanos, garantizando seguridad y eficiencia.
- *Integración con conceptos avanzados*: reforzar la interoperabilidad con iniciativas como la sectorización dinámica, delegación de espacio aéreo y centros virtuales, asegurando una transición fluida hacia operaciones basadas en prestaciones.
- *Validaciones en entornos pre-operacionales*: ejecutar ejercicios adicionales que simulen escenarios de alta densidad y complejidad, evaluando rendimiento humano, impacto en seguridad y beneficios operativos.

## 8.6 Factores humanos

### Líneas de actuación



El conocimiento del factor humano es clave para diseñar un sistema ATM más seguro.

El principal objetivo de CRIDA dentro del área de Factores Humanos es la identificación de los límites del factor humano, en particular de los controladores de tráfico aéreo. Ello incluye la *comprensión y mejora de aquellos factores que tienen un impacto directo en la seguridad y la eficiencia de las operaciones aéreas*, así como en el rendimiento humano en la operación. Desde CRIDA no solamente se desarrollan proyectos de investigación para la comprensión y mejora de los estados mentales actuales del controlador, sino que también se analiza cómo las futuras soluciones para la gestión de tráfico afectan a su rendimiento.


Se identifican dos líneas de actuación principales:

1. *Investigación, desarrollo, validación e implementación de medios y modelos para la medición de la carga mental del controlador de tráfico aéreo.* Esta línea incluye los proyectos enfocados a medir, gestionar y predecir tanto la carga de trabajo como la fatiga y el estrés de los controladores y otros operadores.
2. *Análisis del impacto de futuros conceptos de operación, niveles de automatización, nuevos interfaces o la entrada de nuevos operadores,* en el rendimiento de la tarea del controlador para evitar las situaciones límite antes descritas. Esta línea abarca proyectos que buscan mejorar la interfaz y la interacción entre los operadores y los sistemas automatizados o semiautomatizados, evaluando aspectos como la formación, habilitación, confianza en la automatización, o nuevas formas de interacción como alertas sensoriales.

Este objetivo está alineado con la Línea Estratégica de CRIDA *Medición sistemática de prestaciones*, en particular con su objetivo estratégico *Evolución en el análisis de factores humanos y su impacto en seguridad*.

## Avances técnicos

### Colaboraciones



CRIDA sitúa al factor humano en el centro de la innovación del sistema ATM europeo.

CRIDA ofrece el conocimiento experto de las metodologías definidas en el marco de SESAR y Eurocontrol para la identificación de problemas y beneficios sobre el rendimiento de las tareas del controlador. En particular, *CRIDA ha coordinado en este periodo el área de factores humanos de SESAR*, definiendo las metodologías para su análisis que se han usado en todos los proyectos del Programa.

Además, en colaboración con SESAR y como parte de la actividad del proyecto *PEARL* de SESAR 3, CRIDA ha representado el área de factores humanos del Programa en el grupo de coordinación entre la FAA y la Unión Europea.

Durante este periodo se han *aplicado las metodologías de SESAR de factores humanos en el análisis de conceptos desarrollados en el mismo programa*, en áreas tan diversas como la coordinación civil-militar, o la integración de drones en espacio aéreo controlado.

CRIDA además ha participado directamente en tres proyectos liderando soluciones con un alto contenido en Factores Humanos. *IFAV3*, *CODA* y *RESPONSE*. En *IFAV3* CRIDA ha analizado el impacto en las habilitaciones de los controladores aéreos de las nuevas funcionalidades y procedimientos para gestionar espacio aéreo pertenecientes a unidades que no están físicamente localizadas en el centro donde se presta el servicio. En *CODA* se han desarrollado modelos para predecir la sobrecarga mental, fatiga o estrés del controlador, y activar un asistente digital que le ayude en esos casos. Finalmente, en *RESPONSE*, se han investigado las interacciones cognitivas del piloto de la aeronave con los sistemas en cabina en caso de operar con uno solo piloto.

Dentro del proyecto *SOLO*, se ha evaluado el impacto en el trabajo de controladores y supervisores ante emergencias por incapacitación total de la tripulación en aeronaves con capacidad de vuelo con un solo piloto. Las simulaciones en tiempo real han permitido validar nuevas etiquetas en la CWP para alertar sobre el estado de la emergencia y cambios en las intenciones de la

aeronave, así como la recepción de trayectorias de contingencia vía VHF y CPDLC.

## Actividades internas para ENAIRE

### Análisis del modelo de carga de trabajo de ENAIRE

En el marco del Premio de Innovación de ENAIRE "Modelo de carga de trabajo ATC en Torres Digitales y Remotas", se ha llevado a cabo simulaciones utilizando la plataforma SACTA, centradas en sectores de ruta, con la intención de extender los resultados a TMA y Torre en el futuro próximo. El objetivo principal fue analizar la viabilidad del uso de dispositivos como los medidores de posición y dilatación de la pupila (*Eye-tracking*) y electroencefalogramas para evaluar la carga mental e integrar estos datos en los modelos actuales de evaluación de carga de trabajo de ENAIRE.

### Análisis del Índice de Fatiga.


CRIDA, junto con el departamento de Factores Humanos de ENAIRE y la Universidad de Granada, desarrolla un *índice que prediga el riesgo de fatiga* (proyecto FRIDAY – Fatigue Risk Index: Development & Assessment Yardstick) de los controladores aéreos. Este índice se basa en la identificación de los factores clave que contribuyen a la fatiga y el desarrollo de un modelo probabilístico para la predicción de la severidad de una situación de fatiga.

### Carga de Trabajo de los técnicos especializados en ATM.

Impulsado por la División de Explotación Técnica de ENAIRE, CRIDA participa en el desarrollo de un método para estimar la *carga de trabajo de supervisores de sistemas CNS/ATM* en todas las dependencias de ENAIRE. El prototipo, basado en simulaciones de Montecarlo, estima el tiempo de ocupación de este personal y, por tanto, su carga de trabajo. Actualmente se encuentra en proceso de validación.

### Herramientas para la medida de la carga mental

En este periodo, CRIDA ha adquirido una *diadema para capturar las ondas cerebrales (EEG)* como medida psicofisiológica para la detección de carga mental. Esta diadema, junto con las gafas de medición de la pupila, está permitiendo comparar los datos



Medición  
objetiva de la  
carga mental y  
la fatiga de los  
controladores,  
integrando  
neurociencia y  
simulaciones.

subjetivos recogidos durante las validaciones de nuevas soluciones con los controladores con los datos objetivos recogidos por estos nuevos dispositivos.



*Diadema para capturar las ondas cerebrales (EEG)*

### Modelo Cognitivo basado en Complejidad del Tráfico

CRIDA continúa mejorando el algoritmo *eCOMMET* para la predicción y cálculo de complejidad cognitiva para su uso tanto en los procesos de gestión de la afluencia como para el cálculo de los estados mentales de los controladores.

### Colaboraciones con universidades públicas

Además, CRIDA colabora con universidades públicas para empujar las siguientes líneas de investigación:

#### Actividades con la UAM

- *Medidas de Carga Mental y Conciencia Situacional:* Identificación y calibración de factores que influyen en la relación entre carga mental y conciencia situacional mediante simulaciones de control de tráfico aéreo. El objetivo es desarrollar un modelo empírico que relacione ambas dimensiones.
- *Investigación de nuevos interfaces vibro táctiles:* Diseño y prueba de sistemas de alertas vibro-táctiles (pulseras,

Universidades y  
CRIDA:  
investigando  
hoy para  
optimizar el  
control de  
mañana.

pechera) para apoyar a los controladores sin sobrecargar canales visuales y auditivos. Se estudia su eficacia en la detección de conflictos y en la aceptación de aviones en el sector.

#### Actividades con la UPM

- *Uso de datos neurológicos para evaluar el rendimiento humano (Proyecto CRITERIA).* El proyecto está permitiendo analizar el rendimiento humano en el control del tráfico utilizando datos neurofisiológicos y de simulaciones en tiempo real.
- *Confianza en la automatización:* Desarrollo de un índice que cuantifique la confianza del ATCO en la automatización, permitiendo analizar mediante simulaciones, cómo el controlador construye la confianza en la automatización.

#### Actividades con la UGR

- *Análisis complementarios a la definición del índice de riesgo de fatiga (Proyecto FRIDAY).* Revisión de literatura sobre factores de fatiga (sueño, turnicidad, ritmos circadianos, cronotipos) y redefinición de cuestionarios estándar como el SOFI (*Swedish Occupational Fatigue Inventory*) para obtener una evaluación más precisa de la fatiga mental.
- *Frecuencia Fundamental como medición de la fatiga.* Estudio del aumento de la frecuencia F0 de la voz durante la jornada laboral como indicador de fatiga, analizando el efecto del tiempo y la carga de la tarea.

## Siguientes pasos

En esta área se continúa con los proyectos internos para ENAIRE ya descritos, así como el apoyo a las validaciones de futuros conceptos. Cabe destacar la creación de un *laboratorio de FFHH en colaboración con la UPM* que permitirá analizar el rendimiento de la tarea del controlador bajo diferentes situaciones de carga mental, fatiga, y estrés.

## 8.7 Aeropuertos



Optimizar el ATM exige aeropuertos eficientes: CRIDA impulsa métricas avanzadas y soluciones innovadoras.

### Líneas de actuación

Los aeropuertos, como elementos clave del sistema de navegación aérea, influyen directamente en sus prestaciones y operaciones. Por ello, en el marco de la mejora del rendimiento del sistema ATM, es esencial considerar su papel para evitar que se conviertan en cuellos de botella. Además, los aeropuertos constituyen uno de los principales clientes de los servicios prestados por ENAIRE, lo que hace imprescindible garantizar un nivel de servicio adecuado.

En este contexto, CRIDA ha definido dos objetivos estratégicos en su Plan: por un lado, la medición y prognosis sistemática de las prestaciones aeroportuarias; por otro, la validación de soluciones innovadoras en entornos aeroportuarios. Para ello, se han establecido cuatro líneas de actuación:

1. *Análisis y mejora de la seguridad* en plataforma, calles de rodaje y pistas.
2. *Desarrollo de soluciones para servicios deslocalizados y de asistencia al controlador* que reduzcan los costes operativos en torres de control.
3. *Desarrollo de herramientas para la optimización de la capacidad aeroportuaria*, considerando su integración en el sistema ATM.
4. *Definición de métricas e indicadores de impacto ambiental*, adaptados a los nuevos procedimientos y operaciones en el entorno aeroportuario.

### Avances técnicos

#### Colaboraciones

En el primer trimestre de 2023, CRIDA participó en el cierre de los proyectos europeos *PJ02 Increased Runway and Airport Throughput* (Solución 21.1), *PJ05 Digital Technologies for Tower*

(Soluciones 35 y 97.1), y PJ04 *Total Airport Management* (Soluciones 28.3, y 29.1) todos financiados por SESAR.

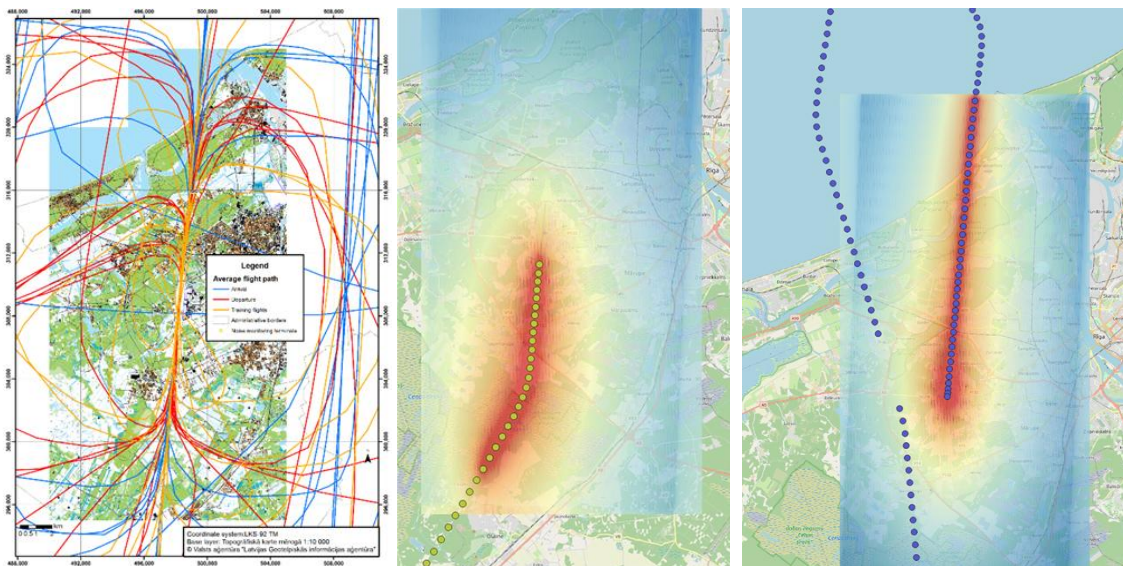
Además, se ha mejorado el *algoritmo de predicción del tiempo de ocupación de pista* (ROT, *Runway Occupancy Time*), incorporando nuevos parámetros como la meteorología a un modelo de *Machine Learning* desarrollado por CRIDA.

## INDIGO analiza calidad del aire y ruido en entornos aeroportuarios.

En el marco del programa *Horizon Europe*, CRIDA participa en el proyecto *INDIGO*, aportando conocimiento en ATM y operaciones aeroportuarias. Este proyecto tiene como objetivo reducir el impacto ambiental en términos de *calidad del aire y ruido en el entorno aeroportuario* mediante el diseño de una aeronave híbrida eléctrica innovadora.

Durante los dos primeros años del proyecto (2023 y 2024), CRIDA ha llevado a cabo:

- La caracterización de las operaciones aeroportuarias en cuatro aeropuertos representativos: Madrid, Barcelona, Riga y Dortmund.
- El análisis de las emisiones asociadas a los distintos procedimientos (SID/STAR) de cada aeropuerto.
- La clasificación de grupos de trayectorias y la identificación de los *best-in-class* para cada procedimiento operativo.



Resultados del proyecto INDIGO. Representación de las trazas del aeropuerto de Riga y de las emisiones de un vuelo.

Innovación en seguridad y sostenibilidad aeroportuaria mediante IA, indicadores ambientales y algoritmos de rendimiento.

## Actividades internas para ENAIRE

En el marco del programa de Innovación Abierta de ENAIRE, y dentro de la iniciativa de retos de negocio dirigida a startups, CRIDA, en su rol de gestor del programa, ha impulsado la aceleración de dos startups ganadoras. Una de ellas, *BIRDSTOP*, ha desarrollado una tecnología basada en balizas equipadas con sensores, que mediante algoritmos entrenados con modelos de Inteligencia Artificial, detectan con precisión la presencia de elementos pasivos en las capas bajas del espacio aéreo (como aves o drones), tanto dentro como fuera del entorno aeroportuario.

El objetivo es proporcionar esta información en tiempo real a los pilotos, a través de una aplicación que indique con la máxima precisión la posición de cualquier elemento volador que comprometa la seguridad. La prueba piloto se realizó en el aeródromo de Sabadell, obteniendo resultados satisfactorios en la detección de elementos en las proximidades del aeropuerto.

Además, CRIDA ha desarrollado *nuevos indicadores para la monitorización y predicción del impacto ambiental* de las operaciones aeroportuarias, desglosando las emisiones de partículas contaminantes generadas en el entorno aeroportuario.

Asimismo, se ha trabajado activamente en el grupo de trabajo de la *Performance Review Unit (PRU) de Eurocontrol*, contribuyendo al desarrollo de nuevas metodologías y algoritmos para el cálculo más preciso del *tiempo adicional en ASMA (Arrival Sequencing and Metering Area) y del tiempo adicional de rodaje*, tanto en llegadas como en salidas.

## Siguientes pasos

Se prevé el desarrollo de *nuevas metodologías para el análisis del impacto ambiental* de las operaciones aeroportuarias, con especial atención a las emisiones contaminantes y al ruido. En el marco del proyecto INDIGO, se simularán en tiempo acelerado las operativas de varios aeropuertos en escenarios futuros (horizonte 2035), integrando la aeronave híbrida-eléctrica con los procedimientos más eficientes desde el punto de vista ambiental. A partir de estas

simulaciones, se estimarán los beneficios en calidad del aire y reducción de ruido respecto a un escenario de referencia.

Asimismo, se continuará avanzando en la *integración efectiva del aeropuerto dentro del sistema ATM*. En particular, CRIDA está desarrollando una herramienta de *benchmarking* para comparar las prestaciones de los siete principales aeropuertos españoles con aeropuertos europeos de configuración similar. Este análisis permitirá identificar oportunidades de mejora y orientar las líneas de investigación y desarrollo con mayor impacto en el sistema aeroportuario nacional.

## 8.8 Drones



Integración segura de drones en el espacio aéreo mediante validación y desarrollo de servicios del sistema U-space.

### Líneas de actuación

Esta área técnica surge de la necesidad de apoyar a ENAIRE en la consecución de los objetivos establecidos en su Plan Estratégico "*Drones y nuevos usuarios*", incluido en el Plan de Vuelo 2025.

En línea con este planteamiento, CRIDA ha definido dos objetivos en su propio Plan Estratégico: por un lado, facilitar la *validación de nuevas soluciones tecnológicas relacionadas con el sistema U-space*; por otro, apoyar la *ejecución de pruebas en vuelo* en entornos urbanos para aquellas soluciones y servicios U-space de mayor madurez.

CRIDA identifica cinco líneas de actuación dentro de esta área. Las tres primeras contribuyen de forma directa a la consecución de los objetivos previos. La cuarta utiliza U-space como habilitador tecnológico para la automatización del sistema ATM. La quinta ha sido propuesta por ENAIRE para abordar las carencias actuales y aprovechar al máximo el potencial del sistema U-space desarrollado por ENAIRE.

1. *Definición de un marco de prestaciones* que sirva para la monitorización y la toma de decisiones en U-space.
2. *Definición de requisitos de nuevas infraestructuras de validación* adaptadas a las características de las operaciones de drones que permitan la validación de las tecnologías y arquitecturas de U-space.
3. *Realización de estudios y pruebas en vuelo* para analizar la integración de las operaciones de drones y de Movilidad Aérea en entornos urbanos y/o en espacio aéreo controlado.
4. *Análisis del impacto de la automatización del sistema ATM a través del estudio de U-space*. Para ello, se analizará el impacto sobre el controlador aéreo de la interacción con el sistema de alta automatización U-space.

5. Apoyo a ENAIRE en el desarrollo de un servicio adicional de U-space destinado a *cuantificar el riesgo asociado a las operaciones de drones*, con el fin de agilizar el proceso de aprobación de los planes de vuelo.

## Avances técnicos

### Colaboraciones

Durante los años 2023 y 2024 CRIDA ha contribuido al *refinamiento del marco de prestaciones de referencia para U-space* del programa europeo SESAR3. Esta actividad ha sido realizada en coordinación con varios socios europeos dentro del proyecto PEARL liderado por CRIDA.

Además, CRIDA está colaborando en el análisis de la idoneidad de los nuevos indicadores para su uso en los espacios aéreos U-space a través de demostraciones con vuelos reales de drones realizadas en varios emplazamientos en España en el proyecto *U-ELCOMÉ* financiado por SESAR.

Adicionalmente se están preparando nuevas pruebas que analizarán por medio de estos indicadores el impacto de las operaciones de drones, así como su efecto sobre la seguridad operacional de la aviación tripulada. Los proyectos *SPATIO*, *ENSURE*, *OPERA* y *EUREKA*, financiados por SESAR3, contribuyen en gran medida a este objetivo.

Gracias a su involucración en estos 4 de los 5 proyectos de investigación industrial de SESAR3, CRIDA fue invitado por la SJU a participar en sesiones técnicas para el análisis de los sistemas de gestión de tráfico de aviación no tripulada (UTM) entre Europa e instituciones relevantes fuera de Europa como la estadounidense FAA, la japonesa NEDO o la surcoreana KARI.



Sesiones sobre UTM con NEDO y la delegación SESAR en Japón

CRIDA participa en el desarrollo de U-space en Europa y su sincronización con iniciativas UTM en otros países.

Por otro lado, CRIDA ha colaborado con varios proveedores de infraestructura de validación en Europa, incluyendo Eurocontrol, Indra o el propio ENAIRE, con el objetivo de *mejorar las plataformas para la validación en tiempo real de soluciones* para la integración de drones con la aviación tripulada. Plataformas como *iTEC* o *GammaSIM* permitirán en el siguiente periodo de reporte validar la segregación dinámica del espacio aéreo o la completa integración de operaciones de Movilidad Aérea Urbana. Los proyectos europeos de investigación *ENSURE*, *OPERA* e *IRINA* financiados por SESAR3 emplearán estos simuladores en sus validaciones.

En este periodo, CRIDA está colaborando con Enaire en la *realización de pruebas en vuelo*, tanto para validar la nueva normativa para U-space publicada en Europa a través del proyecto *U-ELCOMÉ*. También está participando con otros socios europeos en la preparación de pruebas en vuelo de nuevos servicios U-space más allá de la regulación, como los servicios de separación automática entre drones, servicios de gestión de la demanda y la capacidad, o servicios vinculados a la Movilidad Aérea Urbana y el diseño de vertipuertos a través de los proyectos *SPATIO*, *OPERA* y *EUREKA*.



Pruebas de reconfiguración dinámica ATM y U-space realizadas en CRIDA a través del proyecto ENSURE

SPATIO,  
ENSURE,  
OPERA y  
EUREKA  
impulsan la  
integración de  
drones y  
operaciones de  
Movilidad  
Aérea Urbana.

Finalmente, CRIDA está realizando sucesivas validaciones para analizar el *impacto en factores humanos* de la integración del sistema ATM, con el controlador como pieza esencial del sistema, y el sistema U-space, altamente automatizado. Estas pruebas han ido un paso más allá de las actividades realizadas en los años 2021 y 2022, con la participación de controladores de ENAIRE del aeropuerto de Málaga. Estos análisis y validaciones se han realizado en el proyecto *ENSURE*.

### Actividades internas para ENAIRE

Durante los años 2023 y 2024, CRIDA ha contribuido a la definición de metodologías y requisitos para cuantificar el *nivel de riesgo operacional y el impacto ambiental de cada operación con drones*. En este contexto, CRIDA ha desarrollado un prototipo inicial para evaluar el impacto asociado al ruido combinado de varias operaciones en entornos urbanos a través del proyecto interno *TAUROS* realizado en colaboración con ENAIRE e INECO.

## Siguientes pasos

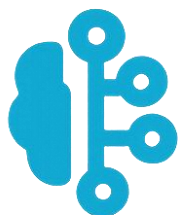
Entre los retos pendientes asociados a cada línea se encuentran:

- Completar las validaciones que estudian la *idoneidad de los indicadores definidos para U-space* para su uso en los

espacios aéreos U-space, con especial hincapié en los indicadores sociales y su proceso de cálculo.

- Identificación y desarrollo de *mejoras en las capacidades de simulación de CRIDA* con el fin de poder analizar soluciones para U-space y para la integración de aviación tripulada y drones. Se analizarán también los procesos de cálculo de indicadores según el marco de prestaciones definido por SESAR, así como la implementación de mejoras adicionales para la validación de casos no nominales como emergencias.
- Apoyo a *pruebas en vuelo para validar* nuevos procedimientos e infraestructura para la integración de operaciones de Movilidad Aérea Urbana, procesos y posición de control para la gestión dinámica del espacio aéreo entre U-space y ATC, y nuevos servicios de gestión de la separación entre drones y gestión de la capacidad y la demanda.
- Mejoras en las *metodologías y prototipos para la cuantificación del riesgo por operación* en espacio aéreo U-space. En particular, CRIDA tiene previsto calibrar el prototipo de predicción del impacto acústico. Para ello, está previsto adquirir y explotar sensores certificados para la medición de ruido en exteriores y el desarrollo de una metodología para su uso.
- Considerando la madurez de las tecnologías de automatización empleadas en U-space, se prevé la *definición de una hoja de ruta para la progresiva automatización del sistema ATM* e identificación de puntos de bloqueo en el proceso.

## 8.9 Big Data e Inteligencia Artificial



### Inteligencia Artificial al servicio de la mejora del sistema ATM

#### Líneas de actuación

El área de Inteligencia Artificial (IA) surge ante la necesidad de abordar con nuevos enfoques problemas que los métodos tradicionales no resuelven, como el análisis del comportamiento del sistema de gestión del tráfico aéreo en situaciones no nominales o la obtención de previsiones fiables de su evolución.

La aplicación de IA al tratamiento de grandes volúmenes de datos permitirá analizar eventos de control específicos —como operaciones frustradas o pérdidas de separación— e identificar sus causas. Asimismo, contribuirá a mejorar la previsibilidad del sistema, optimizando la capacidad del espacio aéreo y la gestión de recursos.

De acuerdo con el Plan Estratégico de CRIDA, *la IA se define como un área transversal, al servicio del resto de áreas técnicas*. Sus líneas de actuación se orientan a:

1. *Mejorar el análisis del comportamiento del sistema actual.*  
La IA puede aportar soluciones que mejoren el análisis de prestaciones del sistema y por extensión facilitar la identificación de problemas y sus soluciones.
2. *Mejorar la previsibilidad del sistema y facilitar con ello la toma de decisiones* que permitan optimizar la capacidad y la gestión de recursos.
3. *Automatizar tareas internas* para aumentar la eficiencia y el valor añadido del trabajo técnico.
4. *Automatización en la provisión del servicio de control de tráfico aéreo*, así como a mejorar la comprensión y confianza del controlador en las herramientas de automatización (Explainable AI).
5. *Crear un catálogo de soluciones basadas en IA* que facilite su implantación, seguimiento y reutilización.

# Avances técnicos

## Colaboraciones

JARVIS: el aprendizaje por refuerzo genera propuestas tácticas que optimizan la eficiencia y seguridad.

En la línea *de análisis del comportamiento del sistema actual* se han desarrollado varias actividades dentro del marco de proyectos SESAR 3 de investigación fundamental, las cuales abren puertas a futuras soluciones basadas en IA.

En la línea de *Automatización en la provisión del servicio de control de tráfico aéreo*, el proyecto JARVIS está estudiando técnicas de RL (Reinforcement Learning) para realizar propuestas de oportunidades tácticas a los controladores aéreos en diferentes situaciones con el objetivo de mejorar la eficiencia y seguridad del tráfico. Para proponer estas oportunidades se evalúa la carga de trabajo de los controladores y cómo influyen las acciones de control en esta carga, la eficiencia de la maniobra y como afecta a la seguridad operacional también es un factor considerado.

En *ATC-TBO* se están utilizando métodos basados en IA como agentes inteligentes y ML para la identificación de conflictos en el horizonte temporal del controlador planificador. El objetivo es que el propio agente pueda generar una propuesta de resolución adecuada para cada uno de los conflictos identificados, teniendo en cuenta factores como la incertidumbre del conflicto o la carga de trabajo de los controladores.

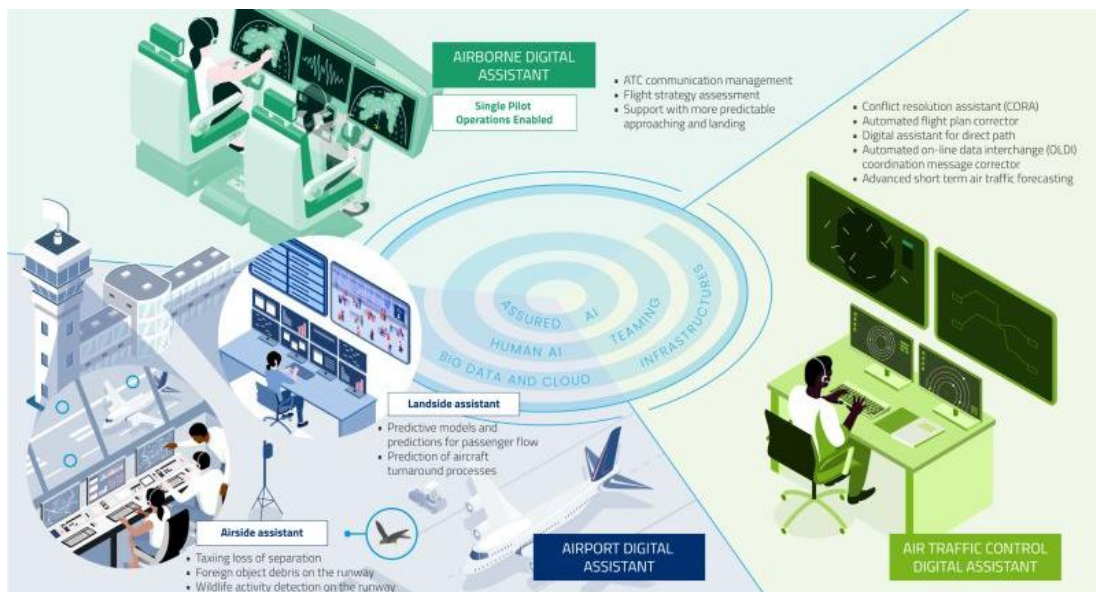



Imagen de concepto del proyecto JARVIS



CRIDA aplica IA para mejorar la eficiencia operativa y la previsibilidad en entornos aeroportuarios complejos.

En *ISLAND* se ha establecido una metodología para la asignación de capacidades a nuevos sectores en base a modelos de aprendizaje entrenados con datos de otros sectores. También se está explorando la generación de agentes que generen propuestas para establecer medidas de DCB en base a estimaciones de demanda y la capacidad.

### Actividades internas para ENAIRE

Complementariamente a las colaboraciones con terceros, CRIDA ha desarrollado diversas actividades para ENAIRE.

En la línea de *automatización en la provisión del servicio de control de tráfico aéreo*, destaca el proyecto *PISA*, centrado en proporcionar a los controladores la información de las millas a toma de las aeronaves. Este dato, especialmente demandado en aeropuertos como El Prat de Barcelona, permite realizar aproximaciones más eficientes y seguras.

CRIDA también avanza en el proyecto *DELFO*, orientado a *mejorar la previsibilidad del sistema* mediante algoritmos de ML que refinan las prognosis de tráfico.

Todas las soluciones desarrolladas —tanto en proyectos colaborativos como en actividades internas para ENAIRE— se han integrado en el *catálogo de soluciones IA de CRIDA*, gestionado mediante herramientas de MLOps que permiten su reutilización, monitorización de calidad y gestión del ciclo de vida. Para aumentar la agilidad en el desarrollo, se ha recurrido también al uso de entornos Cloud.

Finalmente, y dado el rápido avance de las tecnologías de IA, CRIDA ha reforzado su *plan de formación continua*, que identifica necesidades de capacitación de los perfiles de la organización, con el objetivo de maximizar el aprovechamiento de las herramientas de IA y fomentar la innovación.

## Siguientes pasos

CRIDA reconoce que mantenerse al día en los últimos avances en Inteligencia Artificial es un requisito fundamental para desarrollar soluciones competitivas e innovadoras.

Como continuación de las actividades realizadas durante este periodo, y basándose en el conocimiento adquirido, CRIDA identifica la necesidad de *reforzar la asistencia a las distintas líneas estratégicas y proyectos*, con el objetivo de mejorar el análisis del comportamiento del sistema, su previsibilidad y el grado de automatización.

Será esencial la exploración de *nuevas técnicas y tecnologías* que faciliten la implantación de soluciones, con especial atención a la mejora en ámbitos como la IA explicable (XAI) y las herramientas de AutoML, así como a la investigación de arquitecturas basadas en aprendizaje por refuerzo y algoritmos de optimización inteligente.

Estas líneas de actuación se verán reforzadas por la implantación del *plan de formación continua* desarrollado en este periodo, que contribuirá al buen desempeño de las actividades de IA, un área en constante y rápida evolución.

Asimismo, se promoverá la *adopción generalizada de modelos de lenguaje de gran tamaño (LLM)*, que facilitarán la generación de insights y recomendaciones, mejorando la toma de decisiones informadas y estratégicas. Su integración permitirá además incrementar la eficiencia, la productividad y la capacidad de innovación en el desarrollo de nuevas soluciones.

Por último, se continuará con el *mantenimiento y desarrollo del catálogo de soluciones de IA*, impulsando la reutilización de técnicas y modelos para agilizar nuevos desarrollos y optimizar los recursos disponibles.

## 8.10 Infraestructura de validación

### Líneas de actuación



Infraestructura de validación fortalecida para afrontar los retos del Cielo Único Digital y U-space.

El área técnica de infraestructura de validación actúa como soporte transversal a los proyectos de CRIDA, proporcionando medios y metodologías para validar nuevas soluciones de forma comparable con el entorno operativo real.

En línea con el Plan Estratégico de CRIDA, esta área persigue dos objetivos principales:

- Desarrollar *mecanismos de validación eficientes*, promoviendo la automatización y estandarización.
- Facilitar la *validación de soluciones relacionadas con el sistema U-space*.

Para responder a las necesidades del Plan de Vuelo 2025 de ENAIRE, se han definido cinco líneas de actuación que permitirán una evolución significativa de la infraestructura de validación:

1. *Simuladores en tiempo real de ruta y TMA*: mejora del portfolio de simuladores para validar soluciones del Cielo Único Digital Europeo, adaptándose al grado de madurez de cada propuesta.
2. *Simuladores de torre de control*: desarrollo de capacidades para validaciones de alta fidelidad en entornos aeroportuarios
3. *Infraestructura para escenarios de drones*: ampliación de capacidades para análisis realistas en el ámbito U-space.
4. *Herramientas de soporte a simulaciones*: incorporación de módulos que mejoren la eficiencia, reduzcan costes y permitan explotar resultados mediante indicadores de prestaciones reales.
5. *Validación desde la perspectiva de la aeronave/piloto*: integración de aspectos relacionados con la aeronave y/o el punto de vista del piloto.

## Avances técnicos

### Colaboraciones

Validación  
operacional  
integral  
mediante  
simuladores de  
ruta, TMA,  
torre y vuelo y  
herramientas  
propias.

Con relación a *Simuladores en tiempo real de ruta y TMA*, CRIDA ha colaborado con Indra, proveedor de sistemas de gestión de tráfico aéreo de ENAIRE, en la adaptación de uno de sus sistemas de control de tráfico aéreo para las fases de vuelo de ruta y TMA a las nuevas necesidades de validación derivadas de los proyectos de SESAR en los que CRIDA y ENAIRE participan.

Las capacidades de este simulador, correspondiente al sistema de control de tráfico aéreo futuro (*iTEC*), permitirán a CRIDA y ENAIRE validar soluciones como los asistentes digitales para el controlador planificador, o las mejoras en la posición de control para la inserción de aeronaves pilotadas de forma remota en espacio aéreo controlado, entre otros.

Adicionalmente, CRIDA ha desarrollado la capacidad de actualizar el simulador del sistema de control de tráfico aéreo actual para ruta y TMA (*SACTA*), con el objetivo de disponer en cualquier momento de la última versión desplegada en operación por ENAIRE. Se ha adquirido además la capacidad de poder diseñar e implementar diferentes entornos operacionales en dicho simulador.

En este periodo, en las líneas de *Simuladores de torre de control e Infraestructura para escenarios de drones*, CRIDA ha incorporado el simulador de torre de control desarrollado por ENAIRE, denominado *GammaSIM*, con el fin de disponer de una visualización del fanal de torre más realista, y ampliar el abanico de aeropuertos disponibles para la ejecución de simulaciones. Este simulador se ha empleado durante este periodo para la validación de procedimientos e infraestructura, como son los vertipuertos, para la integración de vehículos no tripulados empleados para Movilidad Aérea Urbana en espacio aéreo controlado.

A través de la línea de *Herramientas de soporte a simulaciones*, se ha continuado con la automatización de la captura de ficheros de salida de las plataformas de simulación, y su posterior adaptación e integración en *TESEO*, aplicación desarrollada por CRIDA que permite obtener indicadores de prestaciones para los vuelos

## CRIDA valida integración aeronave-ATM mediante el simulador de vuelo ORION en proyectos SESAR 3.

simulados, análogos a los obtenidos en el entorno real por PERSEO.

En cuanto a la *validación desde la perspectiva de la aeronave/piloto*, en el año 2023 ha comenzado la explotación del simulador de vuelo *ORION*, con el fin de validar soluciones que impliquen integraciones con sistemas a bordo. En particular, en el proyecto *SOLO* de SESAR 3 se probaron soluciones orientadas a reducir la tripulación de cabina a un único piloto. Para ello, *ORION* se integró con la plataforma de gestión de tráfico aéreo iTEC, lo que permitió la participación de un piloto en un entorno de trabajo realista como una aeronave más dentro la simulación. Esta integración, ya permanente, ha servido además como punto de partida para posteriores integraciones que se han realizado con otras plataformas de simulación como GAMMASIM.

En el proyecto demostrador *HERON*, se ha desarrollado un prototipo para recibir información ADS-C de los aviones a través de un servicio común europeo.

Por último, CRIDA ha adaptado dos de sus posiciones de control a las nuevas posiciones de control desarrolladas por ENAIRE, denominadas iFOCUCS, que se han empezado a desplegar en varios Centros de Control.



Vista de ORION y visual de torre del laboratorio de CRIDA al fondo

## Actividades internas para ENAIRE

Con relación a las actividades internas de apoyo a ENAIRE, durante el año 2023 se ha empleado la plataforma de *simulación de torre de control SACTA* con el fin de validar la operativa con ficha de progresión de vuelo electrónica.

A su vez, durante 2023 y 2024 se han establecido diversas colaboraciones con la División de desarrollo y formación ATC de ENAIRE, destacando:

- La implementación de una versión preliminar de los *pseudo-pilotos virtuales* en el simulador GammaSIM, con motivo del evento FITUR 2023.
- El despliegue del sistema de comunicaciones de voz de CRIDA (*VOCALIST*) para su utilización durante los ejercicios de simulación en los que se haga uso del simulador de tráfico aéreo GammaSIM.
- La mejora del algoritmo de reconocimiento de voz de CRIDA (*VOICE*) en el entorno aeroportuario.
- Por otro lado, se ha continuado con el desarrollo de los pseudo-pilotos virtuales, que permitirán reducir el número de pseudo-pilotos necesarios para realizar validaciones.



Vista del visual de torre del laboratorio de CRIDA al fondo

## Siguientes pasos

Durante el próximo periodo, 2025-2026, se prevé realizar diversas validaciones asociadas a proyectos enmarcados dentro del programa SESAR. Para hacer viable su ejecución, se desarrollará la completa *integración del simulador de vuelo con los simuladores de ruta, TMA y torre de control*, en particular con iTEC y GammaSIM.

A su vez, se introducirán en los simuladores *nuevos tipos de vehículos aéreos* con el fin de realizar validaciones centradas en Movilidad Aérea Urbana. Para ello, además, se adaptarán los controles del simulador de vuelo a este tipo de vehículos.

CRIDA prevé *automatizar* la puesta en marcha de los simuladores de tráfico, así como explorar la automatización de parte de las actividades que deben ser realizadas por operadores durante la ejecución de las simulaciones. En particular, se prevé analizar la automatización de las posiciones de control de los sectores circundantes a los que son objeto de estudio.

En lo referente a herramientas de soporte para las simulaciones, está previsto desplegar los *pseudo-pilotos* virtuales en todos los simuladores de tráfico aéreo, con el fin de reducir los recursos humanos necesarios para la ejecución de simulaciones.

Por otro lado, se prevé la evolución de *TESEO*, la herramienta de explotación de datos de simulación de CRIDA, para procesar los datos de nuevos simuladores desplegados, así como la incorporación de métricas asociadas a las operaciones de drones.



Vista de indicadores de TESEO, nueva plataforma para la estimación de prestaciones a partir de datos de simulación.

## 9 Innovación abierta

La innovación abierta conecta el talento con los retos reales del tráfico aéreo.

En mayo del 2022, ENAIRE lanza el programa de innovación abierta *Enaire Open Innovation* con el apoyo de CRIDA. Reconociendo que la complejidad y la importancia de la gestión del tráfico aéreo no son plenamente conocidas por el público en general, el programa de innovación abierta abarca diversas iniciativas para fomentar la creación de un ecosistema innovador en el sector de la gestión del tráfico aéreo. Entre estas iniciativas se destacan los concursos de becas entre universidades, concursos de ideas de negocio, concursos de retos tecnológicos, y significativamente, la aceleración de startups.

La *captación de talento innovador* consiste en el lanzamiento de convocatorias periódicas de becas que corresponden a desafíos tecnológicos planteados por CRIDA y por ENAIRE. Las mejores propuestas disponen de una beca personal para la realización de un Trabajo Fin de Grado o de Máster. El *Clúster español en investigación en ATM* sirve de marco para la difusión de estas convocatorias. A las convocatorias pueden presentarse los alumnos de Grado y Máster con el respaldo de un profesor de una de las universidades del Clúster.

El *Concurso de Ideas de Negocio* está diseñado para captar propuestas innovadoras de estudiantes universitarios, doctorandos, y emprendedores, con el fin de desarrollar soluciones aplicables al ámbito de la gestión del tráfico aéreo. La primera edición de este concurso, realizada en 2023, tuvo como ganadora la propuesta *U-MICROMETEO*. Esta idea revolucionaria propone la creación de un sistema de detección de variables meteorológicas utilizando drones estacionarios a diferentes alturas. Estos drones, anclados físicamente al suelo para garantizar la seguridad, son capaces de recopilar datos en tiempo real para generar modelos meteorológicos tridimensionales, mejorando significativamente la predicción de condiciones climáticas en entornos locales como aeropuertos o ciudades.



Entrega de premios de la segunda edición del concurso de ideas de negocio y retos tecnológicos.

En la segunda edición del concurso, llevada a cabo en 2024, la idea ganadora fue *AirEmpires Sky Management*, un innovador videojuego de estrategia en tiempo real que simula la gestión del tráfico aéreo. Este juego no solo ofrece una experiencia de entretenimiento, sino que también educa a los jugadores sobre la complejidad y los desafíos de la gestión del tráfico aéreo. El videojuego equilibra la eficiencia operativa con el impacto económico y medioambiental, y está dirigido tanto a un público general como a profesionales del sector.

El *concurso de retos tecnológicos* se centra en la búsqueda de soluciones innovadoras para problemas específicos del tráfico aéreo, aprovechando tecnologías provenientes de otros sectores. La segunda edición de este concurso, celebrada en 2023, selecciona como ganadora la solución *CIA3*, desarrollada por el Instituto Tecnológico Gallego. Esta solución utiliza inteligencia artificial para clasificar la fiabilidad de diferentes fuentes de información aeronáutica, asegurando la integridad de los datos críticos que se utilizan en la gestión del tráfico aéreo. Este avance representa un paso importante hacia la automatización y mejora de la seguridad en el sector

## El conocimiento compartido es el motor de la innovación sostenible.

En 2024, la tercera edición del concurso destacó por la solución *Quantum Reservoir Computing*, propuesta por la Universidad Autónoma de Madrid. Esta solución explora el uso de la computación cuántica y técnicas avanzadas de machine learning para abordar problemáticas en el ATM. Como caso de uso, se identifica si a través de técnicas de Quantum Computing se podrían obtener mejores resultados en la predicción del “buffer” en separación aplicado por los controladores durante su práctica normal, y si esa señal podría usarse como un precursor para la predicción de pérdidas de separación.

La *aceleradora de startups* es una iniciativa clave para atraer a empresas emergentes con soluciones innovadoras aplicables al sector aeronáutico. En 2023, se llevó a cabo un proceso de aceleración que culmina con la selección de dos startups ganadoras. La primera, *Birdstop*, una empresa con sede en California propuso una tecnología de vigilancia del espacio aéreo de baja altitud. Su solución se basa en una red de balizas equipadas con sensores visuales y de sonido, y un sistema de rastreo que utiliza inteligencia artificial para detectar objetos no equipados con transpondedores, como drones o aves, mejorando así la seguridad en la aviación general. El caso piloto se llevó a cabo en el aeroclub de Sabadell demostrando la capacidad de detección de pájaros en las cercanías de la pista recibiendo una destacable aceptación por parte de los principales actores de la aviación general.

La segunda startup seleccionada fue *Applied Innovation Methods*, una spin-off de la Universidad Carlos III de Madrid. Su propuesta se centra en la predicción meteorológica de fenómenos de rápida evolución, como tormentas convectivas, utilizando modelos predictivos avanzados y observaciones satelitales. Esta tecnología ofrece predicciones precisas con hasta 72 horas de antelación, lo que permite una mejor planificación y respuesta en la gestión del tráfico aéreo. La herramienta accesible a través de la web, demostró las ventajas de disponer de información de tormentas integrada en los sectores del espacio aéreo operativos en el momento del análisis.

El *Demo Day*, celebrado el 17 de abril de 2024, fue el evento culminante donde se presentaron todas las actividades realizadas

desde que comenzó el programa en mayo de 2022. Este evento reunió a participantes de las diferentes ediciones de los concursos, inversores, y representantes del sector aeronáutico. Durante la jornada, se exhibieron las soluciones desarrolladas, y los equipos tuvieron la oportunidad de demostrar en vivo el impacto de sus innovaciones. El Demo Day no solo destacó los logros alcanzados, sino que también consolidó la posición del programa de innovación abierta como un referente en el sector, fomentando la colaboración continua entre la academia, las startups y las instituciones.

En agosto de 2024, CRIDA lanza una nueva llamada abierta para obtener apoyo externo en la gestión del programa de innovación abierta para los dos próximos años. Esta vez gana la UTE formada por dos empresas SILO y Active Development, con experiencia y conocimiento en las iniciativas incluidas en el programa.



*Jornada de presentación de actividades de Innovación Abierta en 2024*

## 10 Vigilancia y transferencia tecnológica a sus socios

Promovemos la transferencia tecnológica para llevar la I+D al terreno operativo.

Los mecanismos de transferencia tecnológica entre CRIDA y sus socios son esenciales para la comercialización de prototipos con potencial de mercado. El plan estratégico de CRIDA contempla la transferencia en respuesta a la necesidad de ENAIRE de acelerar el despliegue de I+D, tradicionalmente complejo en el sector ATM.

El principal mecanismo de transferencia es la *diseminación de resultados hacia sus socios*. Esta se articula en torno a dos eventos principales: las jornadas divulgativas para ENAIRE y las jornadas para INECO. Complementariamente, los productos desarrollados se presentan a los socios cuando alcanzan un nivel adecuado de madurez a través de sesiones informativas o de formación.

CRIDA ha realizado en este periodo diversas *sesiones de transferencia tecnológica* sobre el uso de nuevas tecnologías de gestión de información masiva en ATM, así como metodologías para la validación de nuevas soluciones basados en simulaciones, incluyendo formación en el uso de simuladores de vuelo. Con ello, se ha transferido conocimiento técnico y se han mostrado aplicaciones prácticas de dichas tecnologías en el entorno ATM.

Por otro lado, CRIDA *representa a ENAIRE en diversos foros tecnológicos y grupos de trabajo de I+D+i*, garantizando el seguimiento de tecnologías emergentes y sus aplicaciones en áreas tales como la realidad virtual, automatización, Inteligencia Artificial, Movilidad Aérea Urbana o Big Data, tanto fuera como dentro del sector. Por ello, CRIDA asistió junto con ENAIRE a las sesiones del grupo de trabajo de I+D+i del Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible. También representó a ENAIRE en foros como ASDA (*Association for the Scientific Development of ATM in Europe*), el polo de innovación de Eurocontrol (*Eurocontrol Innovation Hub*) o la Comisión de Revisión de Rendimiento en Europa (*Performance Review Commission*).

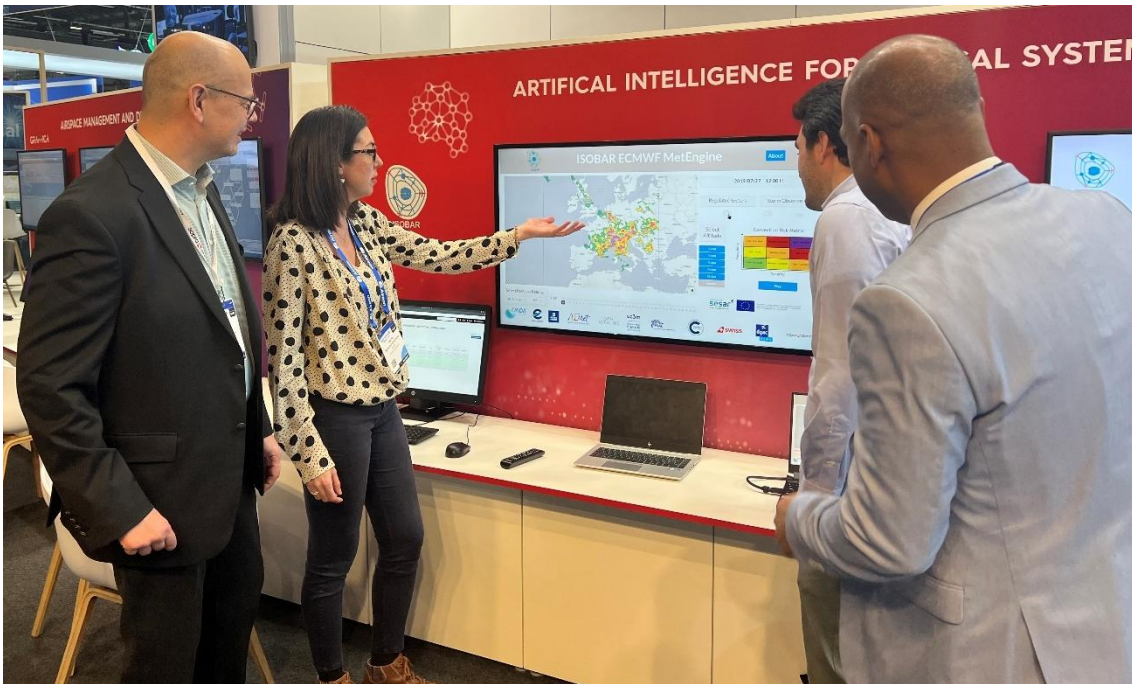


Reunión en Sevilla del Grupo de I+D+i del Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible

## CRIDA, puente entre la investigación y la operación.

Entre las numerosas iniciativas en las que CRIDA ha participado para transferir el conocimiento adquirido en proyectos de I+D a sus socios, o para apoyar en el despliegue de los mismos en ENAIRE, cabe destacar:

- Desarrollo de una nueva metodología para analizar la complejidad introducida por nuevas rutas directas en España como soporte al proyecto de implantación *HISPAFRA* de ENAIRE.
- Transferencia de conocimiento en Inteligencia Artificial (IA) aplicada al ATM a través del proyecto *PISA* de ENAIRE, que permitió la integración de algoritmos de IA en el sistema ATC para la estimación de millas a toma de aeronaves en su entrada al TMA de Barcelona.
- Transferencia de prototipos funcionales tales como el optimizador de configuraciones de espacio aéreo *SECTORIA* y el calculador de complejidad *eCOMMET*, para su potencial incorporación en la nueva herramienta de gestión de afluencia de ENAIRE (IMPACT). eCOMMET se ha integrado en las posiciones de gestión de afluencia de Madrid, Sevilla, Barcelona, Canarias y Palma para su validación.
- Transferencia a ENAIRE y Eurocontrol de conocimientos y tecnología procedentes del proyecto *ISOBAR* para la gestión de capacidad y demanda (DCB) en condiciones meteorológicas adversas por medio de IA. Ello ha permitido la progresiva integración en los sistemas del Gestor de Red (Network Manager) de Eurocontrol y su uso por los proveedores de servicios de navegación aérea, entre ellos ENAIRE.



Presentación del prototipo ISOBAR en el tour técnico de SESAR del Airspace World 2023, Ginebra.

Extendemos el conocimiento y las soluciones innovadoras para generar impacto dentro y fuera de ENAIRE.

En 2023-2024, CRIDA ha reforzado su papel como *agente divulgador de conocimiento técnico y científico*, participando activamente en eventos de diseminación, conferencias internacionales y actividades de difusión de resultados. Además, CRIDA ha mantenido una *destacada actividad científica y técnica*, con *más de una docena de publicaciones* en congresos y revistas internacionales del ámbito ATM y U-space. Destacan las contribuciones presentadas en el *ATM Seminar 2023*, los *SESAR Innovation Days (SIDs)*, la *International Conference on Research in Air Transportation (ICRAT)*, el *Airspace World*, la *Digital Avionics Systems Conference (DASC)* y la revista especializada *Aerospace*.

Las publicaciones tratan temas clave como la predicción de trayectorias mediante IA, la evaluación del impacto ambiental de procedimientos ATM, la colaboración hombre-máquina en la gestión del tráfico aéreo, la transformación digital del ATM, y el desarrollo de nuevos servicios para U-space.

Cabe destacar que dos proyectos liderados por CRIDA —TAPAS e ISOBAR— fueron nominados a los *Digital Sky Awards de SESAR 3* en marzo de 2023, resultando galardonado *ISOBAR* por su contribución a la gestión de la demanda y capacidad mediante IA.

# 11 Actividades 2025

2025 marcará la culminación de una nueva generación de soluciones ATM y U-space.

Durante el año 2025 se alcanzará la fase culminante de las soluciones para ATM y U-space desarrolladas en el marco de los proyectos de la primera llamada de SESAR 3, con la *realización de validaciones en tiempo real y vuelos reales* que abarcan un amplio espectro de ámbitos operativos. Entre ellas destacan la gestión dinámica de áreas militares, gestión de tráfico centrada en trayectorias, la introducción de algoritmos de inteligencia artificial en el sistema ATM, la automatización en la resolución táctica de conflictos, la gestión de operaciones con un solo piloto, las soluciones digitales para la gestión de la demanda y la capacidad, la flexibilización de habilitaciones de control, así como la integración de drones en espacio aéreo controlado a baja altitud y de operaciones de Movilidad Aérea Urbana para el transporte de pasajeros.

Por otro lado, se realizarán simulaciones en tiempo acelerado y real de soluciones de menor madurez, pero más disruptivas en proyectos de investigación exploratoria en los que CRIDA analiza alternativas para reducir el impacto de la fatiga en los controladores aéreos, proporcionar capacidades para el diseño dinámico de sectores, o desarrollar componentes de inteligencia artificial para un interfaz de control que se adapte dinámicamente a las situaciones de control.



Validaciones en tiempo real en el laboratorio de CRIDA. Sala de controladores.

A lo largo de 2025 está previsto llevar a cabo cerca de 15 ejercicios de simulación en tiempo real en los laboratorios de CRIDA, tanto en sus oficinas centrales como en la ETSIAE, utilizando hasta cuatro simuladores diferentes (SACTA, iTEC, GammaSIM y ESCAPE). Estas simulaciones se apoyarán en herramientas propias como VOCALIST o TESEO, que permiten sistematizar el diseño de los ejercicios, la explotación de resultados y el análisis de prestaciones, incluyendo métricas medioambientales, de eficiencia y de seguridad.

Cabe destacar también la previsión de participar en la *pruebas en vuelo* para validar la provisión de servicios a drones a través del sistema U-space. Estas pruebas incluyen el análisis de los servicios U-space a implementar a corto plazo como parte de la certificación de Enaire como proveedor de servicio en España, así como pruebas de servicios U-space más avanzados como los servicios de separación táctica, de gestión de la capacidad y la demanda de drones o de gestión dinámica del espacio aéreo. Las pruebas se realizarán en diversos entornos, incluyendo el aeropuerto de Málaga, el espacio U-space de A Coruña o el aeródromo de Loring en Madrid.

En cuanto a la *predicción de beneficios*, este periodo se caracteriza por la consolidación de los resultados de validación de los distintos proyectos, que se materializan en la cuantificación de beneficios esperados conforme al marco de prestaciones de SESAR 3. Como líder del proyecto PEARL, CRIDA consolidará las prestaciones de todos los proyectos para identificar los beneficios esperados a nivel europeo.

Por otro lado, CRIDA continuará con el desarrollo de *nuevas capacidades de PERSEO* como herramienta clave para el análisis masivo de datos del sistema de navegación aérea (SNA), incluyendo la integración de nuevas fuentes de datos meteorológicos, económicos y operacionales, así como la implementación de modelos predictivos y causales para la evaluación de indicadores como el consumo de combustible, emisiones, eficiencia y riesgo de colisión.

La inteligencia artificial se integra en el corazón del sistema ATM.



*Presentación del proyecto CODA en el Foro Eurocontrol FLY AI 2025. Fotos de François de Ribaucourt*

Además, se avanzará en el desarrollo *de herramientas basadas en inteligencia artificial* como DELFOS (predicción de demanda futura) y PISA (predicción de tiempos de llegada en TMA), así como en el área de análisis de la *carga mental y la fatiga del controlador*. En 2025, se entregará un prototipo para el cálculo del riesgo preliminar asociado a reportes de fatiga y estrés, y se avanzará en el desarrollo de modelos basados en redes bayesianas y parámetros psicofisiológicos, en colaboración con universidades como la UPM, UGR y UAM.

Como parte del impulso a la *innovación abierta*, se lanzarán nuevas ediciones de los concursos de Retos Tecnológicos, Ideas de Negocio y Startups, y se continuará con el programa de becas del Clúster ATM de Universidades, fomentando la transferencia de conocimiento y la captación de talento.

Finalmente, CRIDA divulgará los resultados obtenidos en foros nacionales e internacionales, y mediante publicaciones científicas, contribuyendo a la *difusión del conocimiento* generado en el marco de los proyectos SESAR 3 y otras iniciativas estratégicas.

## 12 Entidades colaboradoras

La colaboración con otras empresas asegura el posicionamiento estratégico de CRIDA en el sector de la investigación y fortalece su capacidad de impacto en la mejora de la gestión del tráfico aéreo. A través de su participación en SESAR, CRIDA trabaja estrechamente con las principales entidades del contexto internacional de navegación aérea. Adicionalmente, CRIDA tiene acuerdos bilaterales con otros centros de investigación, empresas tecnológicas y universidades para la ejecución de proyectos conjuntos.

A continuación, se incluye un listado de las empresas con las que CRIDA ha trabajado en el periodo 2023-2024.

### Organización Intergubernamental

- ACI Europe
- Alliance for New Mobility Europe
- European Satellite Services Provider (ESSP)
- Eurocontrol

### Proveedores de servicios

- AirNav Ireland (Irlanda)
- Austro Control (Austria)
- Avinor (Noruega)
- BULATSA (Bulgaria)
- Croatia Control (Croacia)
- DFS (Alemania)
- DSNA (Francia)
- *ENAIRE (España)*
- ENAV (Italia)
- HungaroControl (Hungría)
- LGS (Letonia)
- LVNL (Países Bajos)
- Luftfartsverket – LFV (Suecia)
- NATS (Reino Unido)
- NAVIAIR (Dinamarca)
- Nav Portugal
- Oro Navigacija (Lituania)
- PANSA (Polonia)
- ROMATSA (Rumanía)
- Saerco (España)
- Skyguide (Suiza)
- skeyes (Bélgica)

- UkSATSE (Ucrania)

### Industria aeronaves tripuladas y no tripuladas

- Airbus
- ATR (Avions de Transport Régional)
- Boeing
- EHang
- Leonardo
- Lilium
- Pipistrel Vertical Solutions
- SAAB
- SABCA (Societe Anonyme Belge de Constructions Aeronautiques)
- UMILES Technologies
- Vertical Aerospace
- Volocopter

### Industria sistemas ATM y UTM

- Airtel ATN
- Collins Aerospace (Rockwell Collins)
- D-Flight
- Frequentis
- Honeywell
- IDS Airnav
- Indra
- Innov'ATM
- Ng Aviation
- Nextant
- Safran Electronics & Defense

- Sopra Steria Group
- Telespazio
- Techno Sky
- Thales
- Unify

### Aeropuertos

- AENA
- Aeroports de Catalunya
- Aeroporti di Roma
- Athens International Airport
- Brussels Airport
- Flughafen München
- Flughafen Zürich
- Groupe ADP (París)
- IGA (Estambul)
- Riga Airport
- Schiphol Nederland
- SEA – Società per Azioni Esercizi Aeroportuali
- Swedavia

### Aerolíneas y otros usuarios de espacio aéreo

- Air France
- EasyJet
- KLM
- Lufthansa
- Skyports
- Swiss International Air Lines
- Transavia
- Air Europa

### Centros de investigación

- Barcelona Supercomputing Center (BSC)
- Centro Italiano Ricerche Aerospaziali (CIRA)
- Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)
- Fundación Andaluza para el Desarrollo Aeroespacial (FADA)
- Instituto Tecnológico de Galicia (ITG)
- Mobility and Mechatronics Technology Center (NAITEC)

- Office National d'Études et de Recherches Aéropatiales (ONERA)
- NLR
- Sintef

### Empresas tecnológicas y de ingeniería

- AERTEC Solutions
- AgentFly Technologies
- ANRA Technologies
- ASLOGIC
- Deep Blue
- Dronica Valley
- Gbalvia
- *INECO*
- Integra Aerial Services
- ISA Software
- Metron Aviation
- Mitiga Solutions
- Nommon Solutions and Technologies
- Soul Software
- Startical
- Tern Systems
- Unisphere

### Meteorología

- Institut Royal d'Aéronomie Spatiale de Belgique
- Intelmet Solutions
- Meteomatics
- Metsafe
- The Finnish Meteorological Institute

### Universidades

- Danmarks Tekniske Universitet (DTU)
- Ecole Nationale de l'Aviation Civile (ENAC)
- Johannes Kepler Universität Linz (JKU)
- Linköpings Universitet (LiU)
- The Ruhr University Bochum
- The Technical University of Braunschweig
- Universidad Autónoma de Barcelona
- Universidad Autónoma de Madrid
- Universidad Carlos III de Madrid (UC3M)
- Universidad de Granada
- Universidad de Nápoles

- Universidad de Sevilla
- Universidad de Vigo
- Universidad Europea de Madrid
- Universidad Politécnica de Madrid (UPM)
- Universidad Pública de Navarra
- Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)
- Universitat Politècnica de València (UPV)
- University of Bristol
- University of Lancaster
- University of Strathclyde
- University of Westminster
- Uniwersytet Warszawski (UW)
- VTT (Technical Research Centre of Finland)
- Fundación SSG
- FuVex
- Gobierno de Navarra
- Hologarde
- International Federation of Air Traffic Controllers Associations (IFATCA)
- Parque Tecnológico de Fuerteventura
- TopView
- UrbanV
- ASLAM
- GSW
- VAADIN
- EML
- Applied Innovation Methods
- Birdstop

#### Otros colaboradores

- EuroUSC

## Lista de acrónimos

ACC	Area Control Centre
ADS-C	Automatic Dependent Surveillance - Contract
AI	Artificial Intelligence
ASDA	Association for the Scientific Development of ATM
ASM	Airspace Management
ASMA	Arrival Sequencing and Metering Area
ATC	Air Traffic Control
ATCO	Air Traffic Control Officer
ATFCM	Air Traffic Flow and Capacity Management
ATM	Air Traffic Management
CNS	Communication Navigation and Surveillance
COVID	Coronavirus Disease
CPDLC	Controller–Pilot Data Link Communications
CWP	Controller Working Position
DAC	Dynamic Airspace Configuration
DASC	Digital Avionics Systems Conference
DCB	Demand Capacity Balancing
DMA	Dynamic Mobile Area
EEG	ElectroEncephaloGram
ETSIAE	Escuela Técnica Superior de Ingeniería Aeronáutica y del Espacio
EU	European Union
FAA	Federal Aviation Administration
FCA	Flight Centric ATC
FFHH	Factores Humanos
FMP	Flow Management Position
IA	Inteligencia Artificial
INAP	Integrated Network ATM Planning
LLM	Large Language Model
METAR	METeorological Aerodrome / Aeronautical Report
ML	Machine Learning
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
PIB	Producto Interior Bruto
PJ	Project
PRTR	Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia
PRU	Performance Review Unit
RL	Reinforcement Learning
ROT	Runway Occupancy Time
SACTA	Sistema Automatizado de Control de Tránsito Aéreo
SESAR	Single European Sky ATM Research Programme
SID	Standard Instrument Departure
STAR	Standard Instrument Arrival
TBO	Trajectory Based Operations
TMA	Terminal Manoeuvre Area
UTM	UAS Traffic Management
VFR	Visual Flight Rules
VHF	Very High Frequency
WG	Working Group
WOC	Wing Operations Centre
XAI	eXplainable Artificial Intelligence