



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA


ETSI Aeroespacial y Diseño Industrial

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Aeroespacial
y Diseño Industrial

Desarrollo de modelos de riesgo para la determinación de
la frecuencia máxima de colisión entre aeronaves no
tripuladas

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Aeroespacial

AUTOR/A: Arrebola Casañas, Pablo

Tutor/a: Balbastre Tejedor, Juan Vicente

Cotutor/a externo: Claramunt Puchol, Cecilia

CURSO ACADÉMICO: 2024/2025

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA (UPV)



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

DESARROLLO DE MODELOS DE RIESGO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA FRECUENCIA MÁXIMA DE COLISIÓN ENTRE AERONAVES NO TRIPULADAS

Autor: Arrebola Casañas, Pablo

Tutor: Balbastre Tejedor, Juan Vicente

Grado en Ingeniería Aeroespacial

Curso Académico 2024/2025

24 de julio de 2025

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Aeroespacial y Diseño Industrial



ETSI Aeroespacial y Diseño Industrial

Resumen

La regulación de distintas zonas del espacio aéreo para la inclusión de aeronaves no tripuladas (UAVs) requiere de la aplicación de unos límites de seguridad para determinar la capacidad máxima segura que acepta el espacio aéreo.

Para ello, en el proyecto se desarrolló una herramienta para estimar esta capacidad máxima a partir de parámetros operacionales definidos y considerando diferentes escenarios.

Se realizó un estudio normativo de los marcos regulatorios para operaciones con UAVs para asentar las bases y la metodología del proyecto.

El diseño de un sistema de simulación para diferentes trayectorias definidas, clases de aeronaves y proporciones de estas en el total de aeronaves sobre el espacio aéreo de Benidorm, permitió, implementando los modelos propuestos, el cálculo de la frecuencia de colisiones en aire (MAC) en diferentes escenarios y la capacidad máxima de UAVs que garantice el cumplimiento de los mínimos de seguridad.

Como conclusión, se determinó que, con el aumento de la proporción del número de aeronaves de mayores dimensiones sobre el total, la frecuencia máxima de MAC total y entre UAVs y aeronaves tripuladas crece y, sumado a la densidad poblacional de Benidorm, no fue posible cumplir los requisitos de seguridad impuestos para los escenarios propuestos.

Palabras Clave: Aeronaves no tripuladas (UAS); modelos de riesgo; frecuencia de colisión; espacio U-space

Abstract

The regulation of different airspace zones for the inclusion of unmanned aerial vehicles (UAVs) requires the application of safety limits to determine the maximum safe capacity that the airspace can accommodate.

To address this, the project developed a tool to estimate this maximum capacity based on defined operational parameters and considering different scenarios.

A regulatory study of the frameworks governing UAV operations was conducted to establish the foundations and methodology of the project.

The design of a simulation system for different predefined trajectories, classes of aircraft, and their proportions within the total number of aircraft in the airspace over Benidorm enabled, through the implementation of the proposed models, the calculation of the maximum mid-air collisions (MAC) frequency in various scenarios and the maximum number of UAVs that ensures compliance with minimum safety requirements.

As a conclusion, it was determined that, with the increase in the proportion of the number of larger aircraft over the total, the total MAC frequency—and particularly those between UAVs and manned aircraft—also increases. Combined with the population density of Benidorm, this made it impossible to meet the safety requirements established for the proposed scenarios.

Key Words: Unmanned air system (UAS); risk models; collision frequency; U-space

Nomenclatura

A_C	Área crítica.
A	Superficie horizontal del espacio aéreo.
C	Frecuencia de MACs por hora.
D_{pop}	Densidad de población.
$E[v_{i,j}]$	Esperanza de la velocidad relativa entre dos aeronaves.
F_H	Frecuencia de solapamiento de cilindros de protección de las aeronaves en el plano horizontal.
H	Diferencia entre el límite inferior y superior del volumen aéreo.
$N_{\text{fatality} GA_{\text{accident}}}$	Decesos de terceros por MAC para aviación general.
N	Número de aeronaves.
P_V	Probabilidad de solapamiento entre cilindros de protección de las aeronaves en el plano vertical.
P	Porcentaje de un tipo de aeronave en el mix.
R	Decesos por impacto tras MAC.
$\delta_{i,j}$	Delta de Kroneker: 1 si $i = j$, 0 si $i \neq j$.
λ_{MAC}^0	Frecuencia no mitigada de MACs por hora de vuelo.
λ^{max}	Frecuencia de MAC máxima permitida para cumplir TLOS.
$\lambda_{GA_{\text{accident}}}$	Frecuencia de accidentes de vuelo para aviación general.
$\overline{FAT}_{MAC}$	Número de decesos por MAC medio para un mix.
$\overline{N}_{FAT}$	Número de decesos por MAC medio para una aeronave.
g	Diámetro del cilindro de protección de la aeronave.
h	Altura del cilindro de protección de la aeronave.

Acrónimos

ANSP	Air navigation service provide.
ARC	Air Risk Class.
BLOS	Beyond Line of Sight.
CSP	Comprehensive Safety Portfolio.
EASA	European Union Aviation Safety Agency.
EDA	European Defence Agency.
EUROCAE	European Organization for Civil Aviation Equipment.
EVLOS	Extended Visual Line of Sight.
FAA	Federal Aviation Administration.
FH	Flight Hour.
GHSL	Global Human Settlement Laye.
iGRC	intrinsic Ground Risk Class.
JARUS	Joint Authorities for Rulemaking on Unmanned Systems.
MAC	Mid Air Collision.
MTOM	Maximum Take Off Mass.
NASA	National Aeronautics and Space Administration.
OSO	Operational Safety Objectives.
SAIL	Specific Assurance and Integrity Level.
SORA	Specific Operation Risk Assessment.
TLOS	Target Level of Safety.
TMPR	Tactical Mitigation Perfomance Requirements.
UA	Unmanned Aircraft.
UAS	Unmanned Aircraft System.
UAV	Unmanned Aerial Vehicle.
UE	Unión Europea.
UTM	Unmanned Traffic Management.
VLL	Very Low Level.
VLOS	Visual Line of Sight.

Índice de contenidos

1. Introducción	1
2. Objetivos y relación con los ODS	2
2.1. Objetivos	2
2.2. Relación con los ODS	3
3. Contexto	6
3.1. UAV: definición	6
3.2. Normativa para la regulación de los UAVs	6
3.3. Categorización de UAVs	7
3.3.1. Categoría abierta	7
3.3.2. Categoría específica	7
3.3.3. Categoría certificada	8
4. SORA: metodología para la evaluación de riesgos	9
4.1. Paso #1: Documentación de operaciones propuestas	10
4.2. Paso #2: Determinación del iGRC	10
4.2.1. Determinación de dimensión y velocidad máximas del Unmanned Aerial Vehicle (UAV)	10
4.2.2. Determinación de la densidad de población máxima	10
4.3. Paso #3: GRC final	11
4.4. Paso #4: Riesgo en aire (ARC)	12
4.5. Paso #5: Mitigaciones estratégicas al ARC	13
4.6. Paso #6: Mitigaciones tácticas al ARC	15
4.7. Paso #7: Determinación de los SAILS	16
4.8. Paso #8: Requerimientos de contención	17
4.9. Paso #9: Identificación de OSOs	17
4.10. Paso #10: Portfolio de medidas de seguridad (CSP)	18

5. Modelo de riesgo en tierra	20
5.1. Área crítica	20
5.1.1. Reducción del área crítica por la presencia de obstáculos	21
5.2. Densidad de población	23
5.2.1. Proceso de selección y modificación del mapa intrinsic Ground Risk Class (iGRC)	23
5.2.2. Selección de la densidad de población en la huella del iGRC	24
5.2.3. Métodos de generación de mapas de densidad de población	24
5.2.4. Precisión temporal de la densidad de población	25
5.2.5. Comprensión de la intención original y la resolución del mapa	25
5.2.6. Productos de mapeo híbridos	26
5.3. CasEx: Toolbox para evaluación del riesgo en tierra	26
5.3.1. Funcionalidades principales	26
5.4. Modelo propuesto de riesgo en tierra	27
5.4.1. Generación de trayectorias	27
5.4.2. Definición de parámetros iniciales para el cálculo de riesgo en tierra	28
5.4.3. Cálculo de área crítica promedio y número de decesos promedio por MAC	30
6. Modelos de riesgo de colisión	33
6.1. Modelos deterministas	33
6.2. Simulaciones de Montecarlo	33
6.3. Modelo de gas extendido	34
6.4. Modelo propuesto de riesgo de colisión	36
6.4.1. Escenario genérico propuesto	36
7. Determinación de la capacidad máxima de un volumen aéreo	38
7.1. Target Level of Safety (TLOS): definición	38
7.1.1. TLOS para el riesgo en tierra	38
7.1.2. TLOS para el riesgo en aire	39
7.2. Capacidad máxima para el riesgo en tierra (N_{ground}^{max}) en espacio aéreo no controlado . .	39

7.2.1.	Frecuencia de colisión por hora de vuelo máxima para el riesgo en tierra en espacio aéreo no controlado	40
7.2.2.	Frecuencia de colisión por hora de vuelo normalizada por el número de aeronaves (P_{MAC}^{ground})	40
7.3.	Capacidad máxima para el riesgo en aire (N_{air}^{max})	41
8.	Caso de uso: Benidorm	42
8.1.	Determinación del riesgo en tierra para Benidorm	42
8.2.	Determinación del riesgo de colisión	45
8.3.	Determinación de la capacidad máxima permitida	46
8.3.1.	Capacidad máxima permitida para el riesgo en tierra	46
8.3.2.	Capacidad máxima permitida para el riesgo en aire	46
8.3.3.	Capacidad máxima permitida para el riesgo en aire	47
8.4.	Discusión de resultados	47
8.4.1.	Discusión de los resultado de la aplicación del modelo de riesgo en tierra	47
8.4.2.	Discusión de los resultado de la aplicación del modelo de riesgo en aire	47
8.4.3.	Discusión de los resultado de la aplicación de la determinación de la capacidad máxima	48
9.	Conclusiones	50
A.	Pliego de Condiciones	51
A.1.	Introducción	51
A.2.	Alcance del proyecto	51
A.3.	Disposiciones generales	51
A.4.	Condiciones económicas	52
A.5.	Condiciones particulares	52
A.6.	Condiciones del entorno	52
A.7.	Pruebas y ajustes finales o de servicio	53
A.8.	Resumen final	53
B.	Código fuente	54

B.1. Software para el cálculo de áreas críticas y número medio de decesos	54
B.1.1. Funciones de apoyo al software de cálculo de decesos medios	58
B.2. Software de cálculo de frecuencia de colisión y determinación de capacidad	59
B.2.1. Funciones de apoyo al software de cálculo de colisiones y capacidad máxima . . .	61
C. Manual de usuario	64
C.1. Introducción al software	64
C.1.1. Objetivo del software	64
C.1.2. Requisitos	64
C.2. Descripción del funcionamiento	65
C.2.1. Software para el cálculo de decesos por MAC	65
C.2.2. Software para el cálculo de la frecuencia de MAC y la capacidad máxima permitida	65
C.3. Ejemplo completo de uso	66
C.3.1. Ejemplo de uso para el software para el cálculo de decesos por MAC	66
C.3.2. Ejemplo de uso para software para el cálculo de la frecuencia de MAC y la capacidad máxima permitida	69
C.4. Errores comunes	71
D. Presupuesto	72
D.1. Clasificación de costes	72
D.2. Presupuesto detallado	72
D.3. Consideraciones finales	72

Índice de figuras

1.	Cumplimiento Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)	4
2.	Composición de la huella del iGRC [1].	11
3.	Determinación del iGRC [1].	12
4.	Mitigaciones iGRC [1]	13
5.	Diagrama de asignación del Air Risk Class (ARC) [1].	14
6.	Tactical Mitigation Performance Requirements (TMPR) y su robustez para el ARC [1]. .	15
7.	Proceso de mitigación de ARC [2].	16
8.	Determinación del Specific Assurance and Integrity Level (SAIL) [1]	17
9.	Robustez de cada Operational Safety Objectives (OSO) en función del SAIL [1].	18
10.	Resumen de la metodología SORA [1].	19
11.	Composición general del área crítica [3].	21
12.	Reducción de áreas críticas y obtención de área crítica reducida promedio [3].	22
13.	Generación de trayectorias aleatorias mediante una simulación de Montecarlo [4].	34
14.	Cilindros de protección [4].	35
15.	Situación del área de estudio [5].	42
16.	Mapa de calor representando la densidad poblacional en Benidorm.	43
17.	Mapa de calor representando la superficie construida en Benidorm.	44

Índice de cuadros

1.	Coordenadas de estudio	42
2.	Características de las aeronave estudiadas.	43
3.	Características de las aeronave estudiadas.	43
4.	Áreas Críticas Promedio para cada tipo de aeronave sobre Benidorm.	44
5.	Número de decesos promedio por cada Mid Air Collision (MAC).	45
6.	Características del volumen aéreo estudiado.	45
7.	Escenarios para diferentes composiciones.	45
8.	Frecuencia de MAC por hora de vuelo total en función de la densidad de aeronaves y la composición aplicada.	45
9.	Frecuencia de MAC por hora de vuelo entre UAVs y aeronaves tripuladas en función de la densidad de aeronaves y la composición utilizado.	46
10.	Media de decesos por MAC, frecuencia límite de MACs por hora de vuelo, frecuencia de MAC normalizada por el número de aeronaves presentes y la capacidad máxima permitida para el riesgo en tierra para cada composición.	46
11.	frecuencia de MAC normalizada por el número de aeronaves presentes (P_{MAC}^{air}) y capacidad máxima permitida para el riesgo en aire (N_{air}^{max}) para cada composición.	47
12.	Capacidad máxima permitida para cada composición.	47
13.	Librerías necesarias para la ejecución del software	64
14.	Resumen del presupuesto estimado del proyecto	72

1. Introducción

El desarrollo exponencial en la tecnología referida a las aeronaves no tripuladas (UAV) y la reducción de los costes de diseño, fabricación y distribución han influido enormemente en el aumento del número de UAVs que vuelan diariamente por los espacios aéreos. Cuando este número es tan grande que las probabilidades de colisiones son suficientes como para provocar un impacto considerable sobre el suelo y los bienes y personas sobre él, surge la necesidad de elaborar regulaciones en el uso de UAVs.

Estas regulaciones deben tener en cuenta no solo los fines de uso de estas aeronaves (lúdico, profesional, transporte...), sino también sus características geométricas, aerodinámicas, de masa y las características del terreno y de la densidad de población sobre el que vuela, además de las regulaciones previas para imponer límites de daños aceptables, ya que el impacto sobre el suelo depende de todo ello.

Es por tanto fundamental para la elaboración de dichas regulaciones, el cálculo de la capacidad máxima que permite un espacio aéreo que cumpla los límites establecidos. Para ello es necesario conocer tanto el número de decesos ocurridos por cada colisión, como la cantidad de colisiones en un tiempo determinado. Cada uno de estos parámetros va a depender del tipo de aeronaves que conformen el total de aeronaves en vuelo y la zona sobre las que estas vuelen. De esta manera, al aplicar un límite máximo de decesos por hora de vuelo sobre este espacio, se limitará el tipo de aeronaves que pueden volar sobre él para asegurar un riesgo asumible.

Para este fin, se deben tener en cuenta las regulaciones vigentes, sobre las que se pretende construir nuevas. Entre estas normativas, se puede destacar la clasificación de las diferentes clases de UAVs, los modelos para el cálculo del modelo de riesgo en tierra y para el cálculo del modelo de riesgo de colisión en aire (MAC) descritos por Joint Authorities for Rulemaking on Unmanned Systems (JARUS) y aceptados por las entidades oficiales a nivel europeo como la European Union Aviation Safety Agency (EASA), que se describen en mayor profundidad en este proyecto.

2. Objetivos y relación con los ODS

2.1. Objetivos

En este documento se busca analizar diferentes casos de densidades de aeronaves, composiciones del número total de estas en función de la proporción de cada clase de aeronaves sobre el total y características de UAVs para un volumen definido situado en un espacio aéreo y calcular para cada uno de estos casos la capacidad máxima de UAVs que el espacio aéreo es capaz de admitir para garantizar el cumplimiento de los límites impuestos y la seguridad de terceros. Para ello, debe hacerse un estudio de la normativa de seguridad aérea aplicable a UAVs y el cálculo de un modelo de riesgo en tierra que analiza los decesos que provoca cada MAC y de un modelo de riesgo de colisión que analiza el número de estas colisiones que ocurren. Estos dos modelos se determinan para diferentes valores de los parámetros descritos. En esta investigación se incluye cómo afecta a la seguridad de las aeronaves pilotadas los diferentes escenarios propuestos y cuál es su impacto en tierra.

Con este fin, por una parte, se simulan un elevado número de vuelos sobre un elevado número de trayectorias sobre el área definida para diferentes configuraciones de UAVs en las que se supone que, en un punto aleatorio de la trayectoria, ocurre una colisión entre aeronaves provocando la pérdida del control y el impacto contra el suelo. Para cada tipo de aeronave se obtiene un área crítica, siendo esta aquella en la que cualquier persona que se encuentre en su interior fallece o recibe heridas muy graves. Teniendo en cuenta la densidad de población en el punto de impacto donde se sitúa el área crítica y el tamaño de esta, se puede conocer el número de decesos por impacto para esa aeronave, que es lo mismo que el número de decesos por MAC. Teniendo en cuenta este resultado en conjunto con el porcentaje de aeronaves que representa en la composición, se puede calcular el número medio de decesos que cada aeronave provocará para una composición concreta. Sumando los valores de cada aeronave, se obtiene una media ponderada del número de decesos que provocará esta flota por cada colisión. Esto representa el riesgo en tierra.

Paralelamente, se calcula, para unas condiciones de densidad de UAVs y de composiciones de las diferentes categorías de aeronaves definidas previamente sobre un volumen aéreo también definido, la frecuencia de MACs por hora de vuelo utilizando una extensión del modelo de gas [6], que simula el comportamiento de las aeronaves como partículas que se mueven en direcciones aleatorias. Esto representa el riesgo de colisión.

Con ambas informaciones se puede obtener la frecuencia de decesos por hora de vuelo. Se introduce ahora una nueva categoría de aeronave que incluya las características medias de las aeronaves tripuladas que vuelan por esta zona, de manera que se pueda estudiar no solo las MACs entre UAVs, sino también entre aeronaves tripuladas y no tripuladas, observándose la influencia del aumento del número de UAVs y de su tamaño, masa y velocidad sobre el tráfico aéreo tripulado. Es importante destacar que no es objetivo de este proyecto calcular MACs entre aeronaves tripuladas, ya que está fuera del alcance de los modelos utilizados en este proyecto.

Para representar todo este proceso, se explican las normativas que rodean a los UAVs y la seguridad aérea de estos, los modelos de riesgo existentes y los estudios previos relevantes. Se presenta el

procedimiento realizado para la obtención de los objetivos, como la descripción de la generación de trayectorias, el modelado de MACs entre UAVs, la simulación de los impactos y el cálculo de las consecuencias. Se muestran los datos obtenidos de las simulaciones para los diferentes escenarios propuestos y se expone su implicación.

Por lo tanto, los objetivos son el cálculo de:

- Número de decesos medio por colisión para cada tipo de aeronave.
- Número de decesos medio por colisión para cada mezcla.
- Frecuencia de colisión máxima permitida para un Target Level of Safety (TLOS) definido y para cada mezcla de aeronaves.
- Frecuencia de colisión para una composición de aeronaves y cada densidad de aeronaves definidas.
- Número de aeronaves que pueden operar sin técnicas de mitigación en el espacio definido para cada una de las variables definidas.

2.2. Relación con los ODS

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) constituyen un conjunto de 17 metas globales adoptadas por la Asamblea General de las Naciones Unidas en septiembre de 2015, como parte de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. Este marco global busca erradicar la pobreza, proteger el planeta y garantizar que todas las personas gocen de paz y prosperidad para el año 2030.

A diferencia de los anteriores Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM), los ODS representan un enfoque más integral, transversal e inclusivo, con el objetivo de abordar de manera simultánea los retos sociales, económicos y ambientales que enfrenta la humanidad. Cada uno de los 17 objetivos está acompañado de metas específicas y medibles, y su cumplimiento requiere de la colaboración activa de gobiernos, sector privado, sociedad civil, instituciones académicas y ciudadanos.

El seguimiento del progreso hacia los ODS se realiza a través de indicadores cuantificables, recogidos a nivel nacional e internacional, lo que permite evaluar el impacto de políticas, proyectos y tecnologías. En este contexto, las investigaciones científicas y los desarrollos técnicos juegan un papel fundamental al ofrecer soluciones innovadoras y evaluaciones rigurosas que contribuyen directa o indirectamente al cumplimiento de los ODS.

En la tabla de la Figura 1, se analiza cómo este trabajo contribuye, en distinta medida, al cumplimiento de determinados objetivos, valorando su impacto de acuerdo con los criterios establecidos por la Agenda 2030. Además, se justificará la aportación de los ODS que se considera que se cumplen en alguna medida en este documento.

- **ODS 3 - Salud y bienestar (Impacto alto):** El estudio de las frecuencias de colisiones y los decesos que provocan ayudan a aumentar las regulaciones sobre las zonas en las que se pueden

Objetivos de Desarrollo Sostenibles	Alto	Medio	Bajo	No Procede
ODS 1. Fin de la pobreza.				X
ODS 2. Hambre cero.				X
ODS 3. Salud y bienestar.	X			
ODS 4. Educación de calidad.				X
ODS 5. Igualdad de género.				X
ODS 6. Agua limpia y saneamiento.				X
ODS 7. Energía asequible y no contaminante.				X
ODS 8. Trabajo decente y crecimiento económico.		X		
ODS 9. Industria, innovación e infraestructuras.	X			
ODS 10. Reducción de las desigualdades.				X
ODS 11. Ciudades y comunidades sostenibles.		X		
ODS 12. Producción y consumo responsables.				X
ODS 13. Acción por el clima.				X
ODS 14. Vida submarina.				X
ODS 15. Vida de ecosistemas terrestres.		X		
ODS 16. Paz, justicia e instituciones sólidas.				X
ODS 17. Alianzas para lograr objetivos.				X

Figura 1: Cumplimiento Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)

volar ciertos tipos de UAVs sin que supongan un riesgo para los habitantes de la zona. Sin estas regulaciones, los habitantes estarían exponiéndose a grandes riesgos cada vez que salieran a la calle, e incluso permaneciendo en sus propios domicilios. Este tipo de proyectos que ayudan a las regulaciones ayudan en gran medida a este ODS.

- **ODS 8 - Trabajo decente y crecimiento económico (Impacto medio):** La integración de UAVs en sectores estratégicos (logística, inspección, agricultura de precisión) permite la generación nuevas oportunidades laborales e impulsar la economía digital, aunque este trabajo no aborda directamente políticas laborales.
- **ODS 9 - Industria, innovación e infraestructuras (Impacto alto):** La investigación fomenta la innovación tecnológica en el ámbito de la aviación no tripulada, proponiendo soluciones técnicas para mejorar la seguridad operacional y facilitar la integración de UAVs en entornos urbanos complejos. Esta integración favorece en gran medida el florecimiento de nuevas líneas de industria en zonas donde antes no estaban tan desarrolladas y ayuda a acercar empresas y personas de lugares distantes a bajo precio.

- **ODS 11 - Ciudades y comunidades sostenibles (Impacto medio):** El uso eficiente de UAVs para monitoreo, movilidad aérea urbana o inspección de infraestructuras urbanas contribuye a una gestión más sostenible de las ciudades. La evaluación de riesgo es clave para garantizar la seguridad de estas operaciones.
- **ODS 15 - Vida de ecosistemas terrestres (Impacto bajo):** La planificación precisa de trayectorias y zonas de operación permite minimizar el impacto de UAVs sobre entornos naturales, fauna protegida y áreas sensibles. Además, aunque este documento se centra sobre una zona urbana, es extrapolable a zonas protegidas donde el riesgo de fatalidades también debe ser muy bajo, ayudando a la preservación de estos ecosistemas.

La tabla de evaluación de impacto sobre los ODS refleja, por tanto, una vinculación moderada pero significativa con metas asociadas al desarrollo urbano sostenible, la innovación tecnológica y la mejora de la seguridad operacional en entornos densamente poblados. Aunque no se trata de un proyecto de impacto social directo, contribuye al avance de tecnologías habilitadoras para aplicaciones futuras que sí podrán tener repercusiones más amplias sobre varios de los ODS prioritarios.

3. Contexto

3.1. UAV: definición

Tal y como lo define la EASA,

“Un vehículo aéreo no tripulado (UAV) se refiere a cualquier aeronave operando o designada para operar de manera autónoma o ser pilotada de manera remota sin un piloto a bordo. Esta definición incluye todo tipo de aeronaves sin un piloto a bordo, incluyendo los modelos radiocontrolados que tengan una cámara a bordo o no” [7].

Para hacer referencia no solo al vehículo sino a todo el sistema necesario para su uso, incluyendo la unidad de comando, catapulta, etc., se utiliza el término sistema aéreo no tripulado (UAS).

3.2. Normativa para la regulación de los UAVs

Los UAVs son utilizados con diversos fines, como agricultura, búsqueda y rescate, entretenimiento, fines medioambientales, etc. Pero, debido a su peligrosidad para las personas al sobrevolarlas a altas velocidades y alturas, necesitan de regulaciones para asegurar que no provoquen accidentes de manera recurrente. Para regularlos, existen numerosas entidades que se enfocan en aspectos concretos de sus normativas. Estas normativas abarcan desde certificaciones y estándares (EASA y EUROCAE) hasta gestión del espacio aéreo (EUROCONTROL) y regulaciones para la integración de operaciones de UAVs con fines militares en el espacio aéreo civil (EDA).

El principal marco normativo aplicable en Europa es el Reglamento de Ejecución (UE) 2019/947 [8], que regula la utilización de sistemas de aeronaves no tripuladas en el espacio aéreo europeo. Este documento constituye uno de los pilares fundamentales de la regulación europea para operaciones con UAVs, configurando el marco regulador que garantiza que estas operaciones se realicen con un nivel adecuado de seguridad, proporcional al riesgo que conllevan.

Este reglamento utiliza un enfoque basado en el riesgo, lo cual supone un cambio significativo respecto a enfoques anteriores más restrictivos o tecnológicos. En lugar de categorizar las operaciones únicamente por el tipo de UAV, introduce una clasificación de las operaciones en tres categorías (abierta, específica y certificada), determinadas por el nivel de riesgo que presentan para terceros tanto en tierra como en el aire y establece las responsabilidades de los operadores de UAS y de los pilotos a distancia, los requisitos para el registro de operadores y para la competencia del personal involucrado, la necesidad de identificación a distancia y geoconsciencia en determinadas situaciones y las condiciones bajo las cuales se requiere una autorización operacional o una declaración previa por parte del operador.

3.3. Categorización de UAVs

3.3.1. Categoría abierta

Destinada a operaciones de bajo riesgo, no requiere autorización previa de la autoridad competente ni declaración por parte del operador, siempre que se respeten una serie de limitaciones operacionales. Entre estas, destacan: altura máxima de 120 m, peso del UAS inferior a 25 kg, no sobrevolar concentraciones de personas, y mantenimiento del UAS dentro del alcance visual, VLOS. Esta categoría se divide a su vez en tres subcategorías:

- A1: se caracterizan principalmente, según [8], por su limitación en Maximum Take Off Mass (MTOM) en 250 g y velocidad máxima de 19 m/s y llevar marcado C0 o C1 con sistemas activos y actualizados de identificación a distancia directa y de geoconsciencia.
- A2: aeronaves con marcado C2 con sistemas activos y actualizados de identificación a distancia directa y de geoconsciencia según [8].
- A3 : aeronaves de MTOM inferior a 25 kg y que lleven marcado C2 y sea utilizada con sistemas activos y actualizados de identificación a distancia directa y de geoconsciencia, C3 y sea utilizada con sistemas activos y actualizados de identificación a distancia directa y de geoconsciencia o C4.

Los marcados C0 a C4 hacen referencia a las clases de productos definidas en el Reglamento Delegado (UE) 2019/945 [9]. Estos marcados establecen requisitos técnicos que deben cumplir los Unmanned Aircraft System (UAS) para poder ser utilizados en operaciones de categoría abierta, incluyendo limitaciones de peso, velocidad, sistemas de geoconsciencia, sistemas de identificación a distancia y otros mecanismos de seguridad como limitadores de energía o sistemas de terminación de vuelo.

3.3.2. Categoría específica

Aplicable a operaciones que no cumplen todos los requisitos de la categoría abierta y, por tanto, presentan un nivel de riesgo moderado.

“Cuando no se cumpla uno de los requisitos establecidos en el artículo 4 (categoría abierta), el operador de UAS deberá solicitar una autorización operacional, de conformidad con el artículo 12 que corrobora que los objetivos de seguridad operacional tienen en cuenta los riesgos de la operación [...]” [8].

Para obtener esta autorización operacional, el operador debe presentar a la autoridad competente una evaluación del riesgo operacional. Una de las metodologías estandarizadas por la EASA para llevar a cabo esta evaluación es la Specific Operation Risk Assessment (SORA), desarrollada por JARUS. SORA permite identificar los riesgos de la operación tanto en tierra como en el aire, definir medidas de mitigación y los límites de riesgo, y establecer el nivel de robustez necesario para que la operación

se considere segura. Esta será la categoría de operación que se considera en este proyecto, ya que no entra en ninguna de las otras categorías.

3.3.3. Categoría certificada

Reservada para operaciones de alto riesgo. Entran en esta categoría aquellas operaciones que “impliquen volar sobre concentraciones de personas, conlleven el transporte de personas, conlleven el transporte de mercancías peligrosas [...]” [8].

4. SORA: metodología para la evaluación de riesgos

Para la elaboración de la evaluación de riesgos, especialmente en la categoría específica, se necesita una metodología oficial a seguir. Es para esto que la EASA propone de manera oficial la metodología SORA desarrollada por JARUS.

“La evaluación del riesgo operacional requerida por el artículo 11 de la regulación de UAS se realizará siguiendo la metodología descrita en AMC1 para el Artículo 11. Esta metodología es básicamente la evaluación del riesgo de operaciones específicas (SORA) desarrollada por JARUS. Otras metodologías pueden ser utilizadas por el operador del UAS como métodos de cumplimiento” [10].

La metodología SORA

“recomienda una metodología de evaluación de riesgos para establecer un nivel suficiente de confianza en que una operación específica pueda llevarse a cabo de forma segura. Permite evaluar el concepto de operación previsto y categorizarlo en seis SAIL diferentes. Posteriormente, recomienda los objetivos de seguridad operacional que deben cumplirse para cada SAIL” [1].

Es fundamental verificar, previo a la evaluación, si la operación está cubierta por un escenario estándar o si existen criterios de “no-go” específicos de la autoridad competente. Si ninguna de estas condiciones aplica y el tipo de aeronave es de categoría específica, se debe proceder con la metodología SORA.

El proceso se divide en dos fases principales:

Fase 1: Derivación de requisitos. Se enfoca en la identificación de todos los requisitos de seguridad relevantes basándose en la operación propuesta. El objetivo es documentar la operación, las declaraciones de seguridad y los requisitos derivados de los Pasos 1 al 9 de SORA, preparando el terreno para una posible evaluación previa por parte de la autoridad competente.

Fase 2: Cumplimiento de los requisitos. Se centra en la demostración del cumplimiento de los requisitos de seguridad establecidos en la Fase 1.

Esta estructuración en fases permite un punto de revisión después del Paso #9 para realizar ajustes antes de pasar a la Fase 2, lo que minimiza las repeticiones innecesarias en los procedimientos operativos y el diseño del sistema. Además, facilita un punto de interacción con la autoridad competente para alcanzar un acuerdo preliminar sobre los resultados de la Fase 1.

El procedimiento está compuesto por 10 pasos a seguir:

4.1. Paso #1: Documentación de operaciones propuestas

Tiene como objetivo la “recolección y presentación de información del contexto de la operación y de las afirmaciones realizadas sobre seguridad en la Fase 1” [1] y elaborar “un concepto operacional suficientemente detallado que permita al solicitante continuar con el proceso SORA” [1].

Para ello, se deben incluir información operacional, técnica y de organización, incluyendo figuras, mapas y diagramas para detallar el volumen del espacio aéreo, los márgenes del riesgo en tierra y área adyacente para determinar el riesgo en tierra intrínseco, el riesgo en aire intrínseco y las áreas adyacentes.

4.2. Paso #2: Determinación del iGRC

El operador debe determinar el iGRC del volumen operacional y del margen de riesgo en tierra, sin aplicar mitigaciones a este.

El procedimiento para determinar el iGRC se compone de:

4.2.1. Determinación de dimensión y velocidad máximas del UAV

Máxima dimensión del UAV: envergadura para ala fija, diámetro de palas para ala rotatoria, máxima distancia entre puntas de pala para multicopteros.

Velocidad máxima del UAV: definida por el diseñador. No es la máxima velocidad utilizada en la operación.

4.2.2. Determinación de la densidad de población máxima

Para ello, primero se debe obtener la huella del iGRC. Esta se compone de:

Volumen operacional: “Volumen en el que se pretende realizar la operación con seguridad” [1]. Para determinar el volumen operacional se debe tener en cuenta las capacidades de mantenerse en un punto en espacio y tiempo y la precisión en la navegación y latencias. A su vez, el volumen operacional se compone de:

- Geografía de vuelo: “corredor de vuelo para cada trayectoria planificada, un volumen mayor para permitir una multitud de vuelos similares con rutas de vuelo cambiantes o un conjunto de volúmenes de vuelo diferentes que cumplan algunas condiciones específicas” [1].

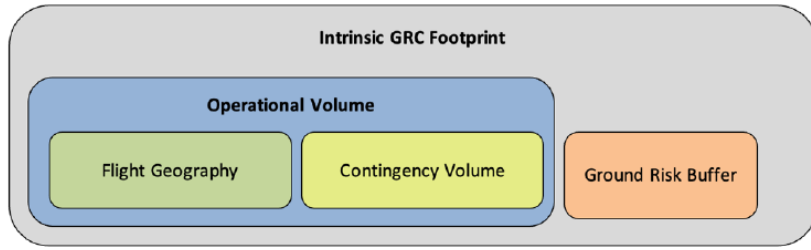


Figura 2: Composición de la huella del iGRC [1].

- Volumen de contingencia: volumen alrededor del de la geografía de vuelo en el que entrar se consideraría algo no habitual y “requiere la ejecución de procedimientos de contingencia apropiados para devolver la UA a la geografía de vuelo” [1].

Margen de riesgo en tierra: volumen en el cual debe acabar el vuelo el UAV en el caso de entrar en el volumen de contingencia. Es decir, si el UAV entra en el volumen de contingencia, se deben aplicar las acciones necesarias para que su vuelo finalice. Esta finalización llevará asociado un desplazamiento que no puede sobrepasar el límite marcado por el margen de riesgo en tierra. Es obvio que las dimensiones de este margen dependerán significativamente de las características de vuelo del UAV.

Obtenida la huella del iGRC, esta cubrirá zonas de diferentes densidades de población, por lo que se deberá tomar el segmento con mayor densidad de población como la densidad de población de referencia para determinar el iGRC.

Así, con la densidad de población tomada como referencia y los valores de dimensión y velocidad máximas, usando la tabla de la Figura 3, se puede determinar el iGRC para esa operación.

4.3. Paso #3: GRC final

Se busca identificar las posibles mitigaciones al riesgo en tierra, lo que reduciría el valor final de este.

Para ello se estudia la aplicabilidad de las mitigaciones de la tabla de la Figura 4, se estudia en [11] si se cumplen los requerimientos y se aplican al iGRC inicial, estudiando previamente cómo afecta la nueva mitigación a las características de descenso del UAV.

“La orientación sobre el nivel de garantía se proporciona a continuación:

- Un nivel bajo de garantía es aquel en el que el solicitante declara que se ha alcanzado el nivel requerido de integridad, tras haber realizado, producido u obtenido cualquier evidencia necesaria. La autoridad competente validará la declaración de conformidad y podrá solicitar pruebas que respalden dicha declaración. Estas pruebas no deben proporcionarse salvo que se soliciten expresamente.

Intrinsic UAS Ground Risk Class						
Maximum UA characteristic dimension		1 m / approx. 3 ft	3 m / approx. 10 ft	8 m / approx. 25 ft	20 m / approx. 65 ft	40 m / approx. 130 ft
Maximum speed		25 m/s	35 m/s	75 m/s	120 m/s	200 m/s
Maximum iGRC population density (people/km ²)	Controlled Ground Area	1	1	2	3	3
	< 5	2	3	4	5	6
	< 50	3	4	5	6	7
	< 500	4	5	6	7	8
	< 5,000	5	6	7	8	9
	< 50,000	6	7	8	9	10
	> 50,000	7	8	Not part of SORA		

- A UA weighing less than or equal to 250 g and having a maximum speed less than or equal to 25 m/s is considered to have an iGRC of 1 regardless of population density.
- A UA expected to not penetrate a standard dwelling will get a -1 GRC reduction in Step 3 from the M1(A) sheltering mitigation when not overflying large open assemblies of people, see Annex B for additional details.

Figura 3: Determinación del iGRC [1].

- Un nivel medio de garantía es aquel en el que el solicitante proporciona pruebas que respaldan que se ha alcanzado el nivel requerido de integridad. Normalmente, esto se logra mediante ensayos o datos operacionales. La autoridad competente validará la declaración de conformidad y la existencia de dicha evidencia.
- Un nivel alto de garantía es aquel en el que la integridad alcanzada ha sido verificada como aceptable por una tercera parte competente. La autoridad competente considerará el informe de conformidad proporcionado por dicha tercera parte, que puede ser la misma autoridad competente que recibe y evalúa la solicitud [...] [11].

4.4. Paso #4: Riesgo en aire (ARC)

“SORA utiliza el espacio aéreo operacional definido en el Paso 1 como base para evaluar el riesgo intrínseco de colisión en el aire con aeronaves tripuladas y para determinar el ARC” [1].

Se pueden aplicar mitigaciones estratégicas, como volar a ciertas horas o en volúmenes delimitados, y mitigaciones tácticas, que favorecen la visibilidad electrónica del UAV (ADS-B, procedimientos

	Level of Robustness		
Mitigations for ground risk	Low	Medium	High
M1(A) - Strategic mitigations - Sheltering	-1	-2	N/A
M1(B) - Strategic mitigations - Operational restrictions	N/A	-1	-2
M1(C) - Tactical mitigations - Ground observation	-1	N/A	N/A
M2 - Effects of UA impact dynamics are reduced	N/A	-1	-2

Figura 4: Mitigaciones iGRC [1]

operacionales...).

El procedimiento a seguir es:

- Determinar el límite vertical, determinado por el límite vertical de la geografía de vuelo, que es la altitud máxima a la que el UAV puede operar en condiciones normales, y la altitud por encima de este límite a la que llegará el UAV hasta que se apliquen los procedimientos de contingencia que se pretenden aplicar.
- Buscar si existen mapas de riesgo de colisión aérea proporcionados por Air navigation service provide (ANSP) o Unmanned Traffic Management (UTM)/U-space que determinan el ARC inicial para ese espacio aéreo específico.
- Si el apartado anterior no da resultado, se utiliza el diagrama de la Figura 5 para determinar el ARC inicial. En este diagrama, se clasifican los 12 tipos de riesgos en aire en función de parámetros como la altitud, el tipo de espacio aéreo (controlado o no controlado), la cercanía de aeropuertos o helipuertos, si sobrevuela zonas urbanas o rurales o si el espacio aéreo es típico o atípico (espacios donde ese considera que los vuelos tripulados no operan).

Como se puede observar en el diagrama, para operaciones con el menor riesgo, se utiliza la ‘a’, mientras que para el mayor riesgo se utiliza la ‘d’.

4.5. Paso #5: Mitigaciones estratégicas al ARC

Se busca identificar las mitigaciones estratégicas aplicables según [2] mediante la identificación del ARC residual.

Las mitigaciones estratégicas pueden ser:

Restricciones Operacionales: dependen del operador, mediante la limitación de volumen geográfico o del período de tiempo de operación del UAV.

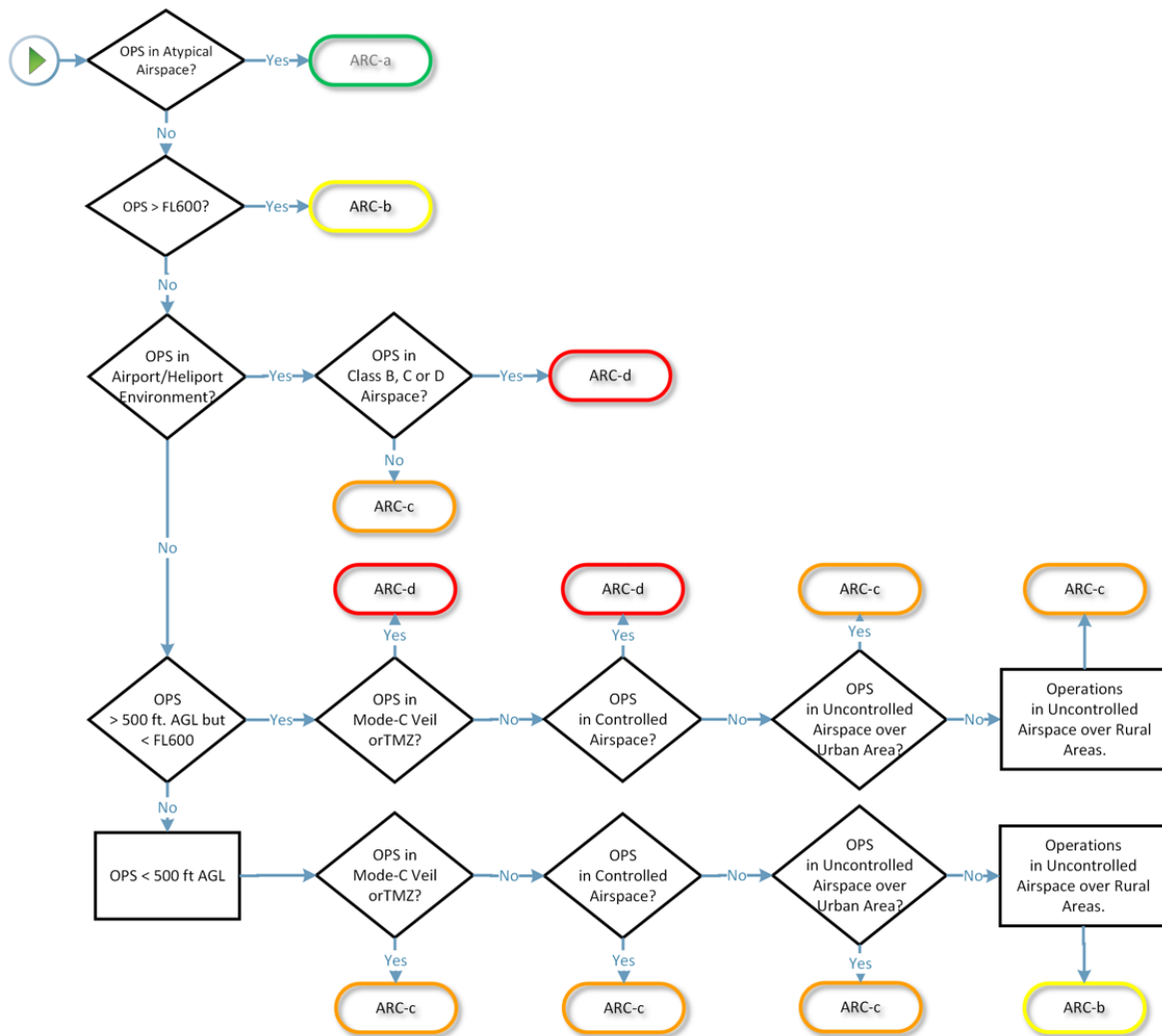


Figura 5: Diagrama de asignación del ARC [1].

Estructuras Comunes y Normas: señalan a todos las aeronaves de un espacio aéreo que sigan las mismas estructuras y normas para reducir el riesgo de impacto.

“El operador del UAS no tiene control sobre la existencia ni el nivel de participación de la estructura del espacio aéreo ni sobre la aplicación de las reglas de vuelo. Por lo tanto, la Mitigación Estratégica mediante Estructuras y Reglas Comunes es aplicada únicamente por las autoridades competentes o los proveedores de servicios de navegación aérea (ANSP). Está disponible para el operador del UAS o no” [2].

El ARC residual es el ARC tras la aplicación de las mitigaciones. Este siempre será menor que el ARC inicial, ya que si no se pueden aplicar mitigaciones, el ARC tomado será el inicial.

Para determinar el ARC residual se consideran los siguientes casos:

Disminución de ARC inicial a ARC-a ARC-a está destinado a espacio aéreo segregado (atípico). Para disminuir el riesgo aéreo a este nivel, el operador debe demostrar que el espacio aéreo es tipo segregado o atípico según los requerimientos del anexo G de SORA y cualquier otro requerimiento de la autoridad competente.

Disminución de ARC mediante Restricciones Operacionales Para esto, SORA no dicta qué medidas se pueden tomar para reducir el ARC, sino que será el propio operador trabajando en conjunto con las autoridades competentes, el que proponga y demuestre la efectividad de las estrategias para la mitigación tomadas.

Disminución de ARC mediante estructuras comunes y normas Para disminuir el ARC mediante estructuras comunes y normas, las operaciones se deben ejecutar para altitudes menores de 500 ft, en espacio aéreo Very Low Level (VLL) y solo se puede disminuir el ARC en un nivel. Además, para esta reducción, se necesitan una serie de permisos, procedimientos y equipos especificados en [2].

4.6. Paso #6: Mitigaciones tácticas al ARC

Se pretende identificar las TMPR aplicables y su correspondiente nivel de robustez. “El TMPR es la cantidad de Mitigación Táctica requerida para mitigar aún más los riesgos que no se pudieron mitigar mediante la Mitigación Estratégica (riesgo residual)” [12].

Para vuelos Visual Line of Sight (VLOS) y Extended Visual Line of Sight (EVLOS) se diseña un esquema de evitación de conflictos, se especifican los métodos de detección de tráfico entrante y se definen los criterios de decisión que activan la maniobra de evasión.

Para vuelos Beyond Line of Sight (BLOS), se determinan las TMPR a través del ARC residual mediante la tabla de la Figura 6 y a través de [12].

Residual ARC	Tactical Mitigation Performance Requirements (TMPR)	TMPR Level of Robustness
ARC-d	High	High
ARC-c	Medium	Medium
ARC-b	Low	Low
ARC-a	No requirement	No requirement

Figura 6: TMPR y su robustez para el ARC [1].

TMPR alto: alta probabilidad de encuentro con aeronaves tripuladas y/o mitigaciones estratégicas poco robustas y debe cumplir con las reglas y procedimientos del espacio aéreo integrado, no afectar negativamente la seguridad, capacidad ni operaciones actuales y requiere alto rendimiento de mitigaciones tácticas, comparable a nuevas tecnologías en aviación tripulada.

TMPR medio: moderada probabilidad de encuentro con aeronaves tripuladas y/o mitigaciones estratégicas de robustez media. Requiere de apoyo mediante sistemas actuales de detección empleados en aviación, nivel medio de robustez técnica y maniobras de evasión más avanzadas que en TMPR bajo.

TMPR bajo: baja probabilidad de encuentro con aeronaves tripuladas, aunque no nula, y mitigaciones estratégicas efectivas. Debe poseer tecnología de ayuda al piloto remoto menos exigente.

TMPR no requerido: riesgo de colisión extremadamente bajo. No requiere mitigación táctica.

En la Figura 7 se describe resumido el proceso de mitigación del ARC, por todos los pasos descritos en este texto.

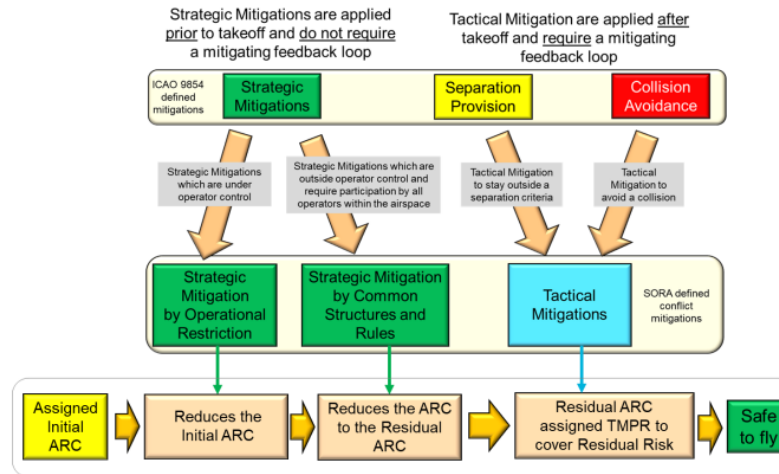


Figura 7: Proceso de mitigación de ARC [2].

4.7. Paso #7: Determinación de los SAILS

Los SAIL “representan el nivel de confianza de que la operación del UAS se mantendrá bajo control” [1]. Tomando el iGRC y el ARC, determina las actividades requeridas.

El procedimiento se basa simplemente en determinar el valor de la tabla de la Figura 8 dependiendo del iGRC y ARC residual.

Residual ARC	Tactical Mitigation Performance Requirements (TMPR)	TMPR Level of Robustness
ARC-d	High	High
ARC-c	Medium	Medium
ARC-b	Low	Low
ARC-a	No requirement	No requirement

Figura 8: Determinación del SAIL [1]

El valor del SAIL no es cuantitativo, sino que corresponde al nivel de robustez del OSO que se debe cumplir, las actividades que podrían apoyar este cumplimiento y los documentos que evidencien que estos OSO han sido cumplidos.

4.8. Paso #8: Requerimientos de contención

Los requisitos de contención aseguran que se mantenga un nivel de seguridad adecuado tanto para el riesgo en tierra como en el aire en zonas cercanas a la operación. Estos requisitos se basan en la diferencia entre el GRC dentro del área de operación y el riesgo en el área adyacente. Se definen tres niveles de robustez (bajo, medio y alto), y el resultado es un conjunto de límites operacionales y un nivel de robustez necesario para la contención.

Si la aeronave tiene una masa inferior a 250 g, el nivel de robustez a aplicar es ‘bajo’. Si no, se debe:

Determinar el tamaño y población del área adyacente: se calcula el área adyacente al vuelo como la distancia que recorre el UAS en 3 min a su velocidad máxima (mínimo 5 km y máximo 35 km). Luego, se estima la densidad poblacional promedio en esa área y se analiza si hay concentraciones de personas a menos de 1 km del volumen operacional. Esta información se usa para definir límites operacionales adecuados y el nivel de robustez necesario para la contención.

Determinar límites operacionales de densidad de población aceptable: se elige una densidad poblacional máxima permitida en el área adyacente y una densidad máxima aceptable de concentraciones de personas en un radio de 1 km del volumen operacional.

4.9. Paso #9: Identificación de OSOs

Ahora se conecta el SAIL con el nivel de robustez de los OSO mediante la tabla de la Figura 9.

OSO ID	Operational Safety Objective	SAIL						Dependencies (Crit. references as per Annex E)		
		I	II	III	IV	V	VI	Operator	Training org	Designer
OSO#01	Ensure the Operator is competent and/or proven	NR	L	M	H	H	H	x		
OSO#02	UAS manufactured by competent and/or proven entity	NR	NR	L	M	H	H			x
OSO#03	UAS maintained by competent and/or proven entity	L	L	M	M	H	H	Crit. 1 Crit. 2		Crit. 1
OSO#04	UAS components essential to safe operations are designed to an Airworthiness Design Standard (ADS)	NR	NR	NR	L	M	H			x
OSO#05	UAS is designed considering system safety and reliability	NR	NR ^(K)	L	M	H	H			x
OSO#06	C3 link characteristics are appropriate for the operation	NR	L	L	M	H	H	x		x
OSO#07	Conformity check of the UAS configuration	L	L	M	M	H	H	Crit. 1 Crit. 2		Crit. 1
OSO#08	Operational procedures are defined, validated and adhered to	L	M	H	H	H	H	x		Crit. 1
OSO#09	Remote crew trained and current	L	L	M	M	H	H	x	x	
OSO#13	External services supporting UAS operations are adequate to the operation	L	L	M	H	H	H	x		
OSO#16	Multi crew coordination	L	L	M	M	H	H	Crit. 1 Crit. 3	Crit. 2	
OSO#17	Remote crew is fit to operate	L	L	M	M	H	H	x		
OSO#18	Automatic protection of the flight envelope from human errors	NR	NR	L	M	H	H			x
OSO#19	Safe recovery from human error	NR	NR	L	M	M	H			x
OSO#20	A Human Factors evaluation has been performed and the HMI found appropriate for the mission	NR	L	L	M	M	H	x		x
OSO#23	Environmental conditions for safe operations defined, measurable and adhered to	L	L	M	M	H	H	x		x
OSO#24	UAS designed and qualified for adverse environmental conditions	NR	NR	M	H	H	H			x

Figura 9: Robustez de cada OSO en función del SAIL [1].

A través del [13] se pueden identificar los requerimientos para procedimientos y los requerimientos técnicos para la integridad y garantía de cada OSO en función de su robustez, además de los requerimientos de entrenamiento del personal para la seguridad de la operación.

4.10. Paso #10: Portfolio de medidas de seguridad (CSP)

“Argumento estructurado que utiliza el proceso SORA, que está respaldado por un conjunto de evidencia que proporciona un caso de seguridad sólido” [1].

Para este paso se pide una descripción detallada de la operación, todas las afirmaciones de seguridad y sus requisitos derivados, y la evidencia que justifica el cumplimiento. Además, debe establecerse un caso de seguridad justificado con enlaces entre documentos, y una matriz de cumplimiento final que relacione afirmaciones, requisitos y evidencia. Para guiar la estructuración del Comprehensive Safety

Portfolio (CSP), se recomienda consultar [14].

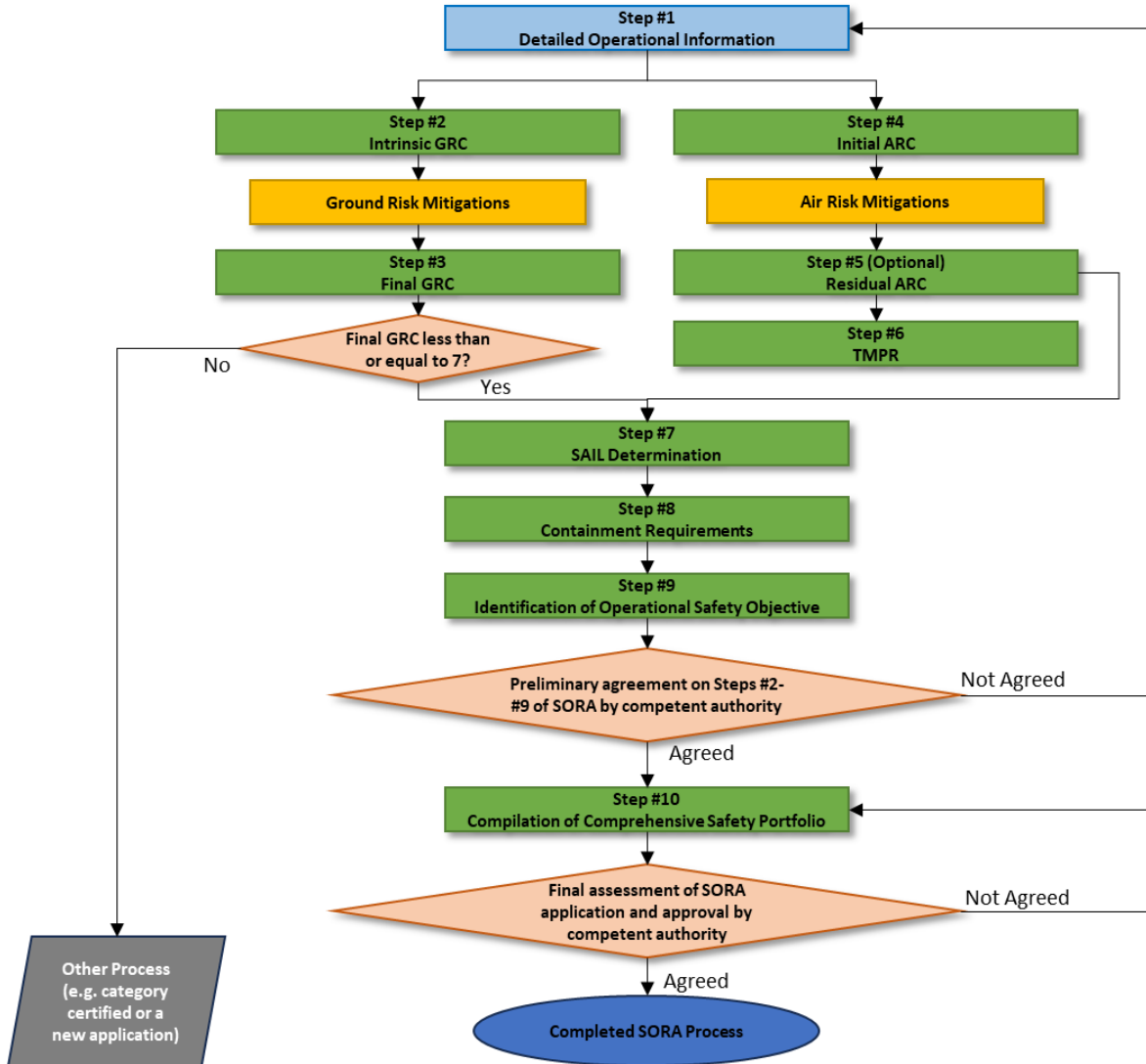


Figura 10: Resumen de la metodología SORA [1].

5. Modelo de riesgo en tierra

El riesgo en tierra a terceros representa la probabilidad de que una persona en tierra sufra consecuencias fatales como resultado de una pérdida de control o colisión (MAC) de una aeronave. Es necesario el conocimiento de esta información para determinar si una operación aérea cumple con los límites de seguridad mínimos exigidos.

El cálculo del riesgo de deceso de terceros causado por una colisión según [3] se calcula mediante la Ecuación 1. Este resultado es la probabilidad de que, dada una colisión, se produzca un deceso, es decir, $P(FAT|MAC)$.

$$R = A_C \cdot D_{\text{pop}} \quad [1] \tag{1}$$

De la Ecuación 1 se puede observar que esta probabilidad depende del área crítica y de la densidad poblacional del área en el que cae.

5.1. Área crítica

El área crítica es la superficie sobre el suelo en la que una colisión de una aeronave causa con un alto grado de probabilidad, la muerte de personas en caso de impacto, es decir, “el área alrededor del punto de impacto dentro del cual se supone que cualquier persona puede resultar mortalmente herida” [3]. Se trata de una simplificación conservadora que asume que cualquier persona dentro del área crítica resultará fatalmente herida.

Para su cálculo, JARUS utiliza una combinación de los métodos expuestos en [15] y [16] para los que se divide el total del área crítica en planeo, deslizamiento, rebote, fragmentación y explosión o deflagración.

Estas partes del área crítica dependerán de:

- Masa
- Velocidad de impacto (componente vertical y horizontal).
- Ángulo de impacto.
- Coeficiente de fricción entre materiales (suelo y UAV).
- Área frontal
- Coeficiente de resistencia aerodinámica.
- Tipo de suelo y tipo de combustible.

Estos parámetros permiten modelar la energía del impacto y la dispersión del daño sobre el terreno, de manera que se puede mostrar en qué zonas la presencia de una persona resultaría mortal.

Según el modelo presentado por JARUS en [3], la forma del área crítica, como se muestra en la Figura 11, consiste en un rectángulo con dos semicírculos con centro en el punto de impacto y en el punto de frenado y el posible círculo provocado por la explosión, que se asume que ocurre al final del trayecto. Para el ancho del área crítica se toma la envergadura de la aeronave más un margen de valor igual a la anchura de una persona. En este modelo se asume que los restos de la aeronave viajan en la misma dirección que la aeronave previo impacto.

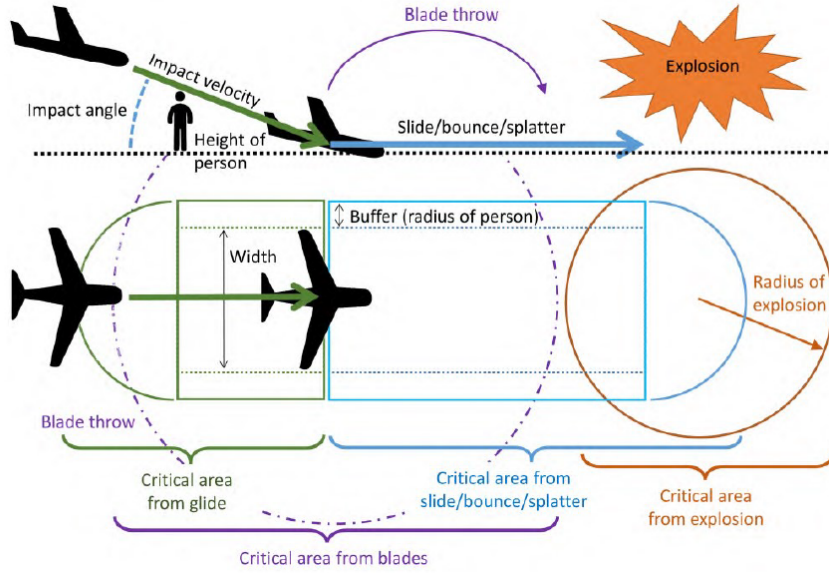


Figura 11: Composición general del área crítica [3].

5.1.1. Reducción del área crítica por la presencia de obstáculos

En el modelo propuesto por JARUS para la estimación del área crítica, se parte de la hipótesis conservadora de que la aeronave, tras el impacto, continúa su desplazamiento sobre el terreno sin encontrar oposición, deteniéndose únicamente por la fricción con el suelo y la disipación de energía cinética a través de la deformación del propio UAV y del terreno. Sin embargo, este supuesto rara vez se cumple en escenarios operacionales reales, especialmente en entornos urbanos donde abundan elementos estructurales que pueden alterar significativamente la trayectoria descrita tras el impacto.

En [3], se introduce la consideración explícita de los obstáculos físicos como mitigadores naturales del área crítica. Se entiende por obstáculo cualquier objeto físico que, debido a su masa, resistencia y geometría, tiene la capacidad de detener o desviar a la aeronave en su trayectoria tras el impacto contra el suelo. Esto incluye vehículos estacionados, árboles, mobiliario urbano, vallas, postes eléctricos o edificaciones, entre otros.

El efecto de estos obstáculos se modela como una reducción del área efectiva donde podrían producirse decesos, ya que el UAV detiene su desplazamiento antes de completar el recorrido potencial que podría haber alcanzado ante la ausencia de obstáculos. La metodología propuesta en [1] para cuantificar esta reducción se basa en simulaciones en las que se proyecta un número elevado de trayectorias de caída sobre superficies que contienen obstáculos. En cada simulación, si la trayectoria impacta con un obstáculo, se considera que el área crítica se detiene en ese punto. La agregación estadística de múltiples simulaciones permite obtener un área crítica reducida promedio.

La Figura 12 muestra gráficamente este proceso. En ella se representa un conjunto de trayectorias sobre un área con obstáculos. La superposición de las áreas cubiertas por los restos de la aeronave se ajusta a las zonas libres de obstáculos, y el promedio de todas las áreas generadas proporciona una estimación conservadora del área crítica modificada.

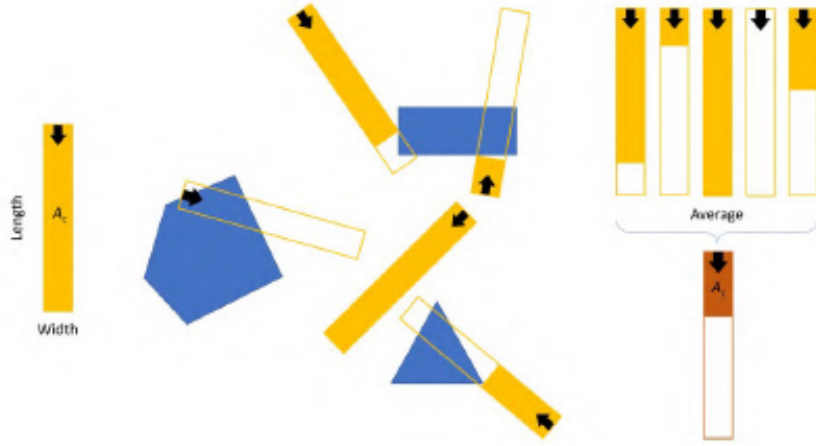


Figura 12: Reducción de áreas críticas y obtención de área crítica reducida promedio [3].

Cabe destacar que, para evitar un doble cómputo de mitigaciones, este ajuste se traduce en una disminución directa de $P(FAT|MAC)$. No debe aplicarse simultáneamente como un ajuste a la densidad de población, es decir, esta reducción se aplica a las dimensiones del área crítica sin alterar el valor de la densidad de población.

‘Sheltering’ como mitigación complementaria: Adicionalmente, el modelo introduce el concepto de ‘sheltering’, definido como la protección que ofrecen determinadas estructuras que alojan a personas en su interior, reduciendo su exposición directa al impacto, por las capacidades de resistencia que ofrecen estas estructuras frente a la energía cinética de la aeronave impactada. Este concepto es relevante para el cálculo de la población efectiva expuesta al riesgo.

En términos prácticos, se reduce la densidad de población efectiva en función del porcentaje estimado de personas que se encuentran en el interior de dichas estructuras. Se considera razonable suponer, por ejemplo, que, si se supone una densidad poblacional variable con la hora del día, durante la noche un porcentaje elevado de la población se encuentra bajo techo, y por tanto con menor probabilidad de

verse afectada directamente por una caída de UAV.

Influencia de la densidad de obstáculos: La densidad de obstáculos, entendida como el número de objetos capaces de detener o desviar al UAV por unidad de superficie, es un factor crítico en la cuantificación del grado de reducción del área crítica. A mayor densidad, mayor probabilidad de que la aeronave colisione prematuramente con alguno de ellos y, por tanto, menor tamaño del área crítica efectiva.

Consideraciones operativas: La validez de esta mitigación depende de justificar razonablemente que en el entorno de operación exista una densidad y distribución de obstáculos suficiente. Aunque se trata de una medida conservadora, su aplicación debe ir acompañada de evidencia documental o cartográfica que permita sustentar su utilización en el proceso de evaluación del riesgo.

Influencia de la masa del UAV en la reducción de áreas críticas por la presencia de obstáculos: La masa del UAV tiene gran influencia en la determinación de la reducción del área crítica ya que resistir el impacto de un UAV de 1 kg de masa o de un UAV de masa mayor a 100 kg tiene requerimientos estructurales muy distintos. Para el primero, prácticamente cualquier obstáculo será capaz de soportarlo, mientras que para el segundo se requerirán características estructurales mucho más complejas, lo cual no entra en consideración para esta metodología. Esto se debe a que cada uno llevará energías cinéticas muy diferentes y no todos los edificios son capaces de soportar la energía cinética del segundo.

Para tener esta información en consideración, JARUS sostiene que el límite para la consideración de obstáculos en la reducción de áreas críticas se sitúa en 25 kg, a partir de la cual, los obstáculos no producen efectos de protección sobre las personas en su interior.

5.2. Densidad de población

La cuantificación de la densidad de población en el punto donde se produce el área crítica por el impacto de una aeronave es uno de los parámetros necesarios para la evaluación del riesgo terrestre según la Ecuación 1. Esta sección detalla el marco metodológico para determinar con precisión la exposición de las personas en tierra.

El proceso de obtención de la densidad de población se cimienta en una serie de consideraciones y metodologías exhaustivas:

5.2.1. Proceso de selección y modificación del mapa iGRC

Según [3], el primer paso consiste en la selección o desarrollo de un mapa de densidad de población que sirva de base para el cálculo del iGRC. Es imperativo asegurar la fiabilidad de los datos utilizados.

Esto implica un tratamiento riguroso de posibles errores inherentes a los mapas de densidad de población designados. La detección y corrección de inconsistencias o imprecisiones en los datos geográficos de población son cruciales para evitar la propagación de errores en la evaluación del riesgo.

5.2.2. Selección de la densidad de población en la huella del iGRC

‘Determinar una densidad de población representativa presenta ciertas complejidades’ [3], especialmente en áreas heterogéneas.

Determinación para vuelos sobre huellas heterogéneas: En escenarios donde la huella de impacto del UAV abarca regiones con variaciones significativas en la densidad de población (zonas residenciales, comerciales, parques...), se requiere una metodología robusta para establecer una densidad de población promedio o ponderada que sea fiel a la exposición real al riesgo en toda el área de operación.

Vuelo de corta exposición sobre segmentos de mayor población: Es importante la evaluación del impacto de vuelos de corta duración sobre áreas de alta densidad de población. Aunque la huella general pueda ser de baja densidad, una exposición momentánea a una zona concurrida aumenta sustancialmente el riesgo. Se debe analizar si esta exposición temporal justifica una asignación de densidad de población más elevada para el cálculo del riesgo instantáneo.

Densidades mayores en la zona de amortiguamiento del riesgo terrestre: La metodología SORA también insta a considerar la inclusión de densidades de población elevadas en las zonas de amortiguamiento adyacentes al área crítica de impacto. Esto se debe a la posibilidad de que individuos fuera de la huella directa del impacto puedan verse afectados por fragmentos, escombros o efectos secundarios de una colisión o caída del UAV.

5.2.3. Métodos de generación de mapas de densidad de población

En [3], se detallan diversas metodologías para la creación de mapas de densidad de población, subrayando la importancia de la precisión del método:

Datos censales y el Problema de la Unidad Areal Modificable (MAUP): Los datos censales son la base, pero su uso debe considerar el MAUP, un artefacto estadístico donde la agregación de datos a diferentes escalas o delimitaciones geográficas (zonas censales, distritos) puede alterar las estadísticas de densidad. Es fundamental comprender cómo se construyen estas unidades para interpretar correctamente la densidad.

Interpolación picnofiláctica: Este método es de particular relevancia ya que busca suavizar la distribución de la población, generando un mapa más continuo y real. A diferencia de una simple agregación por unidades censales, la interpolación picnofiláctica reduce las transiciones abruptas y poco realistas entre límites administrativos.

Mapeo dasimétrico: Considerado uno de los métodos más avanzados, el mapeo dasimétrico utiliza datos auxiliares de alta resolución (como el uso del suelo, la huella de edificios, redes de transporte) para refinar la distribución de la población dentro de unidades censales más grandes. Este enfoque permite identificar y excluir áreas deshabitadas o con baja densidad, resultando en estimaciones de densidad mucho más precisas y geográficamente específicas para el área de interés.

Interpolación inteligente: Se refiere a la aplicación de algoritmos avanzados y la integración de múltiples conjuntos de datos para mejorar la precisión de las estimaciones de densidad poblacional, aprovechando la capacidad de los sistemas de información geográfica (SIG) modernos.

5.2.4. Precisión temporal de la densidad de población

La densidad de población no es estática; varía significativamente con el tiempo. Por ello, es importante considerar la incorporación de la dimensión temporal en la evaluación.

Movimiento humano: Se debe considerar la dinámica de la población, como los desplazamientos diarios entre zonas residenciales (mayor densidad nocturna) y áreas comerciales/laborales (mayor densidad diurna). Asimismo, eventos especiales (festivales, conciertos, eventos deportivos) pueden generar concentraciones temporales masivas de personas en ubicaciones específicas, lo que requiere ajustes puntuales en la densidad de población para la planificación de operaciones de UAV.

Datos de teléfonos móviles: El uso de datos anonimizados de teléfonos móviles como una fuente valiosa para obtener estimaciones de densidad de población en tiempo casi real puede ser una posibilidad importante a tener en cuenta. Esta fuente permite capturar la fluctuación dinámica de la presencia humana, ofreciendo una representación más precisa de la población expuesta en un momento dado.

5.2.5. Comprensión de la intención original y la resolución del mapa

Para garantizar la validez de los datos de densidad de población, comprender el propósito inicial para el cual fue creado un mapa de densidad de población es fundamental. Los datos censales y los supuestos de datos auxiliares deben ser examinados para asegurar que son adecuados para el cálculo del riesgo de UAV. Además, la resolución espacial (tamaño de la celda de la cuadrícula) del mapa de densidad de población debe ser congruente con la escala de la operación del UAV y la posible huella de impacto. Se establece que una resolución adecuada previene la subestimación o sobreestimación del

riesgo al proporcionar una granularidad de datos apropiada para la altitud de operación y la extensión de la zona de impacto.

5.2.6. Productos de mapeo híbridos

Finalmente, se reconoce que, en ausencia de un único producto de mapeo que satisfaga todas las necesidades, puede ser necesario que el solicitante cree productos de mapeo híbridos. Esto implica la integración y combinación de diferentes fuentes de datos y metodologías (por ejemplo, datos censales con información de uso del suelo y datos de movilidad) para obtener la estimación más precisa y específica posible de la densidad de población para el área crítica de impacto.

5.3. CasEx: Toolbox para evaluación del riesgo en tierra

CasEx [17] es una librería desarrollada en Python que implementa los modelos matemáticos descritos en [3] de la metodología SORA, elaborada por el grupo JARUS. Su objetivo principal es permitir la evaluación cuantitativa del riesgo en tierra (iGRC) derivado de la operación de aeronaves no tripuladas (UAS), mediante cálculos estandarizados, trazables y reproducibles, en conformidad con los criterios regulatorios europeos.

5.3.1. Funcionalidades principales

CasEx permite aplicar los modelos y parámetros establecidos en [3]. Entre sus funcionalidades más relevantes se encuentran:

Modelado del comportamiento post-colisión: En [3], se establecen tres modelos fundamentales de descenso. La selección del modelo apropiado depende intrínsecamente de las características aerodinámicas de la aeronave, el tipo de colisión y la altitud de la operación.

Descenso aleatorio: Se asume la pérdida total de control y sustentación posterior al esta. Se calcula mediante un enfoque probabilístico tomando como valores de entrada la velocidad y dirección de la aeronave y el viento. Se determina típicamente mediante una simulación de Montecarlo, para estimar la dispersión de los puntos de impacto.

Planeo: Este modelo se aplica a aeronaves que conservan una capacidad aerodinámica residual tras una falla, lo que les permite realizar un descenso hasta cierto punto controlado por la ligera sustentación que son capaces de mantener. La aeronave sigue una trayectoria descendente más predecible que la aleatoria, caracterizada por una relación entre la distancia horizontal recorrida y la pérdida de altitud. La trayectoria de planeo está dictada por las características aerodinámicas de la aeronave.

Descenso balístico: el modelo balístico se emplea cuando la aeronave o sus componentes se comportan como proyectiles en caída parabólica, sin sustentación aerodinámica significativa, con una trayectoria determinada principalmente por la gravedad, la velocidad de la aeronave y la resistencia del aire. A diferencia del planeo, en la caída balística el objeto no genera sustentación. Este es el modelo que CasEx incorpora en su toolbox para el cálculo del riesgo en tierra por el realismo que ofrecen sus resultados y la sencillez de su cálculo. El uso de este descenso proporciona la distancia de impacto desde el punto de colisión, la velocidad y ángulo de impacto contra el suelo, necesarios para el cálculo del área crítica, y el tiempo que transcurre entre colisión e impacto con el suelo.

Cálculo de áreas críticas: A partir de variables como trayectoria, masa del UAV, ángulo y velocidad de impacto, CasEx ofrece funciones para el cálculo del área crítica. Se calculan las partes que componen el área crítica: rebote, deslizamiento, fragmentación, explosión y deflagración, y como resultados ofrece tanto el área crítica total como cada uno de estos componentes.

Evaluación del efecto de obstáculos: Permite importar geometrías que simulen los obstáculos presentes en el área de estudio para comprobar si algún obstáculo intersecta con las áreas críticas generadas, provocando la reducción de la extensión efectiva del área crítica. Esta función es clave en entornos urbanos densos.

Uso de parámetros estandarizados: CasEx incorpora los valores de referencia y supuestos presentes en [3], como tipos de suelo, coeficientes aerodinámicos, fricción, combustible, etc. El usuario puede ajustar estos parámetros en función de la operación concreta.

5.4. Modelo propuesto de riesgo en tierra

En esta sección se pretende mostrar el procedimiento propuesto para el cálculo de riesgo en tierra para una serie de aeronaves con características (velocidad, masa y velocidad de crucero) definidas, sobre un área de estudio también definida, por encima de la cual volarán estas aeronaves. Este procedimiento debe tener como objetivo final el cálculo del área crítica generada, la definición de la densidad de población en el área en la que se sitúa el área crítica y, finalmente, el cálculo de $P(FAT|MAC)$.

5.4.1. Generación de trayectorias

Para calcular el riesgo en tierra a terceros, primero hay que definir por dónde vuelan las aeronaves. A continuación, se define el procedimiento para generar las trayectorias simuladas que se van a utilizar para la determinación de los puntos de colisión.

La generación de trayectorias en entornos simulados se basa en diseñar perfiles de vuelo representativos y someterlos a perturbaciones que emulan condiciones reales del entorno, sensores y dinámica de vuelo. Este proceso consta de dos elementos principales: el generador de trayectorias nominales y los

modelos de error posicional aplicados a las trayectorias. Sin embargo, para el caso propuesto en este proyecto, se asume que el seguimiento de la trayectoria es ideal, por lo que no se va a tener en cuenta el error de posicionamiento y se propone para trabajos futuros comparar los resultados obtenidos en este caso ideal con los obtenidos en un caso en el que sí se tenga en cuenta el error posicional (caso no ideal).

Utilizando el entorno simulado PX4 SITL junto con Gazebo, se diseñan rutas de vuelo donde los puntos de inicio y final de la ruta son aleatorios, dentro de unos puntos de inicio y final posibles, es decir, se eligen todos los posibles puntos de inicio y de fin y se seleccionan dos de ellos aleatoriamente. Después se genera una trayectoria aleatoria que tenga inicio y fin en cada uno de estos puntos. Esto se hace tantas veces como trayectorias se pretenda generar.

Al limitar los puntos de inicio y fin se fuerza hasta cierto punto el paso de las aeronaves por las zonas de interés, donde realmente se realizarían los vuelos. De esta forma, se evitan zonas como mares y zonas protegidas donde, en la mayoría de las aplicaciones, no es realista considerar que existan trayectorias que los sobrevuelen.

Estas trayectorias son exportadas en formato .csv (hojas de cálculo) que permiten la extracción de datos de forma sencilla.

5.4.2. Definición de parámetros iniciales para el cálculo de riesgo en tierra

Es necesario para el cálculo de riesgo en tierra conocer las características de las aeronaves que se consideran. Estas características incluyen masa, velocidad de crucero, dimensiones, área frontal y tipo de superficies de sustentación (ala fija, ala rotatoria, multirrotor, etc.). Se recuerda que el objetivo final es el cálculo de $P(FAT|MAC)$ para cada aeronave y este valor depende del área crítica que, a su vez, depende de las características de cada aeronave, como se ha descrito previamente.

Se definen también valores como el coeficiente de fricción entre el material del suelo y el del UAV. Se proponen desde CasEx materiales como fibra de carbono, goma o hierro, mientras que para el suelo se proponen cemento, césped o arena. Para seguir con los modelos propuestos por JARUS y debido a su cercanía de material con los que podrían estar presentes en la realidad en un UAV y en el suelo de las calles, se utilizarán cemento y goma como los materiales en contacto.

Se especifica el tipo de gasolina y la cantidad de esta en la aeronave por sus efectos en el proceso de deflagración. Para este caso se utiliza un depósito vacío para seguir los ejemplos propuestos por JARUS. Un depósito con mayor cantidad de combustible provocará un área crítica mayor.

Finalmente, se define la resistencia aerodinámica en la caída, que viene dada por el área frontal del UAV. Esto provocará un descenso en la velocidad de descenso de la aeronave, provocando un área crítica menor cuanto mayor sea el coeficiente de resistencia. Para este caso se estima un valor de 0.8 según los ejemplos de JARUS.

Por otra parte, se especifica el valor del solape entre área crítica y las áreas de planeo y deslizamiento, que define el ratio entre el área de explosión y el área de deslizamiento, que para este caso es nulo, y

el área crítica por deflagración, que se refiere al umbral a partir del cual un impacto entre un UAV y una persona se considera potencialmente fatal.

No todos los impactos generan decesos, por lo que el modelo de JARUS introduce el concepto de energía cinética no letal para delimitar con mayor precisión el área crítica donde el impacto puede causar una fatalidad. Se pone este límite en 290 J, valor por defecto usado en JARUS basándose en [18].

Se define también el área de estudio. Conocido este área, se utilizan los recursos proporcionados por Global Human Settlement Layer (GHSL) para obtener la distribución de la densidad de población y la superficie construida en todo el área de estudio.

Mapas de densidad de población y superficie construida: Definida el área de estudio, se importan los mapas de densidad poblacional y superficie construida para esta área concreta.

Estos mapas serán extraídos de la página [19] cuya información está proporcionada por Copernicus y que contiene información relativa a los datos de civilización humana en todo el mundo. GHSL proporciona datos geospaciales abiertos de cobertura global que cuantifican la presencia humana mediante la integración de imágenes satelitales, registros censales y modelos de redistribución espacial.

Entre esta información, se puede encontrar la densidad poblacional, el área construida, la altura construida, el volumen construido y el grado de urbanización entre otros, aunque para este proyecto son únicamente importantes las dos primeras.

Ambos mapas se encuentran en formato vectorial, es decir, es una matriz donde cada celda representa una parte del área de estudio. Cada celda tiene un valor que hace referencia a la finalidad del mapa. Es decir, para el mapa de densidad de población, el valor de una celda representa el número de personas en el área que representa dicha celda.

El mapa de superficie construida es necesario para la determinación de la posición de los obstáculos. En este mapa, cada celda tiene como valor la superficie construida en esa celda. Suponiendo, entonces, un área media en planta por edificio de 200 m^2 , es simple obtener el número de edificios por celda. Cada celda se divide en subceldas de área igual a la de un edificio y cada subcelda tendrá valor o no en función de si hay un edificio en ella o no, respectivamente. Para determinar en qué subceldas hay edificios, se realiza una distribución normal del número de edificios en la celda. Cada edificio es representado con una celda con un valor cualquiera.

Para conseguir que se comporte como un obstáculo, se debe transformar en una geometría, con área igual a la asumida de cada edificio (200 m^2) y cada uno de los vértices que lo delimitan, con posición igual a los vértices de la subcelda. De esta manera, el archivo vectorial se convierte en un archivo de geometrías con posiciones definidas, cuyo centroide es situado en el centro del área de estudio para que coincida con la zona de colisiones de las aeronaves.

Hay que destacar que, para este proyecto, únicamente se han considerado como obstáculos los edificios y no los árboles, vallas, etc. que pueda encontrarse por el camino, ya que los edificios proporcionan

el peso más representativo dentro de la contribución de los obstáculos a la reducción del área crítica.

5.4.3. Cálculo de área crítica promedio y número de decesos promedio por MAC

Como el objetivo es mostrar las consecuencias de una colisión aérea entre aeronaves o MAC, primero se debe definir lo que se entiende por ello.

Un MAC ocurre cuando dos aeronaves tienen un accidente al entrar en contacto mientras se encuentran en vuelo. Para determinar cuándo se ha entrado en contacto, en lugar de definir exactamente la geometría de cada aeronave, lo cual sería muy costoso computacionalmente, complejo y poco escalable, se establece una envolvente cilíndrica alrededor de cada aeronave, de manera que todo el fuselaje de esta quede en el interior de la envolvente. Cuando estos dos cilindros se intersecten, ha ocurrido un MAC.

Para este proyecto se asume que tras el MAC, el fallo es total, es decir, la aeronave deja de funcionar completamente, por lo que resulta imposible evitar su colisión contra el suelo. Por otra parte, se asume también que el choque provoca la pérdida de las superficies sustentadoras, eliminando la posibilidad de una caída en forma de planeo. Estas asunciones no son demasiado ambiciosas ya que el contacto entre dos aeronaves a las velocidades a las que estas están programadas, en la mayoría de los escenarios va a resultar en una caída parabólica. Si se pretendiera una mayor precisión se podría reducir el tamaño del volumen de protección para asegurar el fallo catastrófico, perdiendo, eso sí, cierto algo de conservadurismo en los resultados.

El procedimiento a seguir se basa en la simulación de una MAC en un punto aleatorio de una trayectoria generada aleatoriamente. Este punto se seleccionará aleatoriamente, pero teniendo en cuenta que no sea muy cercano al aterrizaje ni al despegue para evitar datos con información que no se busca, pues el proyecto está enfocado a MACs producidas durante el vuelo de crucero. Para ese punto, se asume que la velocidad no se ve afectada por la MAC. Se utilizarán un número a definir de trayectorias y en cada una de ellas se simularán tantos MACs como se pretenda. A mayor número de trayectorias y MACs mayor precisión, pero mayor tiempo de cómputo, lo cual es especialmente importante cuando la comprobación de las intersecciones entre áreas críticas y obstáculos aplique.

Para analizar cada trayectoria, se accede a las hojas de cálculo que contienen la información correspondiente a la latitud, longitud y altitud del UAV en cada instante del vuelo, la velocidad en cada uno de sus tres ejes, así como la velocidad rotacional en cada uno de ellos.

Tras la colisión, comienza un descenso parabólico que se simulará siguiendo un modelo balístico para calcular la posición de choque contra el suelo, así como la velocidad y ángulo en el impacto, a partir de parámetros como la posición, altitud, velocidad horizontal (módulo de la velocidad en los dos ejes paralelos al suelo) y vertical (velocidad en el eje perpendicular al suelo). Para ello se utiliza la función `compute_ballistic_distance` [17] que devuelve los dos valores especificados.

Cabe destacar que esta función tiene algunas restricciones dignas de mención, como que la velocidad vertical no puede ser mayor que la horizontal o que la velocidad horizontal no puede ser negativa. En

lo que a la primera se refiere, para evitar que se vulnere esta restricción, se establecerá un bucle de control previo a la ejecución de la función con el fin de que la velocidad horizontal siempre sea mayor que la vertical. Para el segundo caso, no habrá problema, ya que en las trayectorias proporcionadas, la aeronave siempre avanza, por lo que la velocidad horizontal no será negativa en ningún caso.

Como se ha descrito previamente, el MAC provocará la pérdida de las superficies sustentadoras y provocará una caída balística, modelo que es consistente con la metodología de SORA [1] propuesta por JARUS que estima el riesgo para terceros en tierra suponiendo que cualquier pérdida de control implica un impacto dentro de un área crítica derivada de una trayectoria balística del UAV desde la altitud de operación. Según el modelo propuesto, cada colisión genera una caída sin control con trayectoria parabólica bajo el efecto de la gravedad, lo cual permite cuantificar la población potencialmente afectada en función del punto de impacto y del área crítica de cada aeronave.

Se obtienen así tantos puntos diferentes de choque contra el suelo por parte de los UAVs tras los MACs como se hayan especificado, cada uno con una velocidad y ángulo de choque propios dados por los parámetros explicados. Cada uno de estos puntos de choque va a generar un área crítica.

Son estos dos parámetros, aparte de los dados por las características de la aeronave, los necesarios para generar el área crítica de interés mediante la función `critical_area` [17] que dibujará un polígono en la posición indicada, con la orientación propia de la trayectoria de la aeronave. Se sacarán las áreas críticas de todos los choques contra el suelo y se calculará la media de áreas críticas.

Se analiza ahora la influencia de los obstáculos o edificios sobre estas áreas críticas. Como se ha explicado previamente, el límite máximo de peso para tener en cuenta los obstáculos es de 25 kg. Para todas las aeronaves por debajo de este peso, los obstáculos provocarán una reducción en el área crítica. A partir de ahora, a las áreas críticas que se vean influenciadas por los obstáculos, es decir, áreas críticas cuando la aeronave analizada es de una masa menor a 25 kg, se las llamará área crítica reducida.

Para estimar la reducción de las áreas críticas debido a la presencia de obstáculos, se hará uso del mapa de obstáculos previamente construido. Como se ha explicado con anterioridad, el mapa representa una serie de polígonos con posición estipulada, al igual que las áreas críticas. Solapando los dos mapas, se pueden observar algunas intersecciones entre polígonos, lo que se solucionará eliminando la parte solapada del polígono del área crítica. Esto resultará en una reducción del área crítica. Cabe destacar que los UAV de masa menor a 25 kg son de pequeño tamaño y no pueden alcanzar velocidades muy grandes, por lo que sus áreas críticas no serán tampoco muy significativas. Es por esto, que muy pocas de ellas intersectarán con los obstáculos, resultando probablemente en una reducción de área crítica poco significativa.

Conocida el área crítica final (reducida o no según el caso) de cada colisión, se superponen cada una de estas áreas al mapa de densidad poblacional que se encuentra en formato vectorial (como ya lo estaba previamente el de superficie construida). En este caso, cada una de las celdas representará el número de personas que habitan en ella. Para que esta superposición tenga sentido, primeramente se debe calcular el área de cada celda y, posteriormente, analizar en qué celda se encuentra cada área crítica final. Haciendo un simple cálculo proporcional, se obtiene el número de personas que habitan dentro

de cada área crítica, que será el número de decesos si ocurriera una colisión con esas características.

Finalmente, se guarda para todos los vuelos en todas las trayectorias el número de decesos para, posteriormente, calcular el número medio de decesos ocurridos cuando hay un MAC sobre la zona de estudio para esta aeronave en concreto.

Aplicando este proceso a los distintos tipos de UAVs que se pretenden analizar, se obtiene una lista con el resultado para cada una de las aeronaves consideradas.

6. Modelos de riesgo de colisión

La operación segura de aeronaves no tripuladas (UAVs) en entornos compartidos con otras aeronaves requiere de herramientas de evaluación de riesgo que permitan anticipar el impacto de MACs. Una vez se ha estimado el modelo de riesgo a terceros por una colisión, se requiere de un modelo para el cálculo de riesgo de que un MAC ocurra.

La elección del modelo adecuado depende del tipo de operación, el entorno, la disponibilidad de datos y el nivel de precisión requerido. Por lo general, para esta finalidad se usan modelos deterministas, simulaciones de Montecarlo o el modelo de gas. Todos ellos se describen a continuación.

6.1. Modelos deterministas

Los modelos deterministas calculan el riesgo utilizando fórmulas predefinidas, con variables físicas conocidas o estimadas (masa del UAV, altura de vuelo, densidad de población, área crítica, etc.). No introducen aleatoriedad ni variabilidad en los escenarios: asumen condiciones fijas y producen un único resultado para un conjunto dado de entradas.

Su uso es indicado cuando se dispone de datos fiables y fijos, para operaciones sencillas donde no se requiera análisis de incertidumbre, en entornos regulados donde se exijan modelos estandarizados.

Un ejemplo claro de modelo determinista en la gestión del espacio aéreo es el modelo de capacidad de sectores aéreos utilizado por proveedores de servicios de navegación aérea como EUROCONTROL [20] o la Federal Aviation Administration (FAA) [21]. Este modelo define, a partir de parámetros operacionales fijos como el tiempo medio de atención por aeronave y la carga máxima de trabajo del controlador, un límite máximo de aeronaves que pueden estar simultáneamente en un sector sin comprometer la seguridad. Así, establece una relación directa entre estos parámetros, sin considerar variabilidad estocástica ni incertidumbre en el comportamiento del tráfico. Al igual que en los modelos deterministas aplicados al cálculo del riesgo para UAVs, este enfoque proporciona un único resultado para un conjunto fijo de condiciones, siendo especialmente útil en contextos operativos donde se requiere planificación precisa y cumplimiento de estándares establecidos.

6.2. Simulaciones de Montecarlo

Las simulaciones de Montecarlo utilizan números muy elevados de escenarios posibles introduciendo variabilidad aleatoria en las condiciones de vuelo, trayectorias, posiciones de impacto, condiciones meteorológicas o respuesta del sistema. Así, se obtiene una distribución estadística del riesgo, en lugar de un valor único.

Es utilizado en situaciones en las que se desea capturar la incertidumbre o variabilidad operativa, en entornos dinámicos o complejos (urbano, U-space), cuando se requiere validación estadística del modelo. Por contrapartida, requiere mayor capacidad computacional por el número de simulaciones

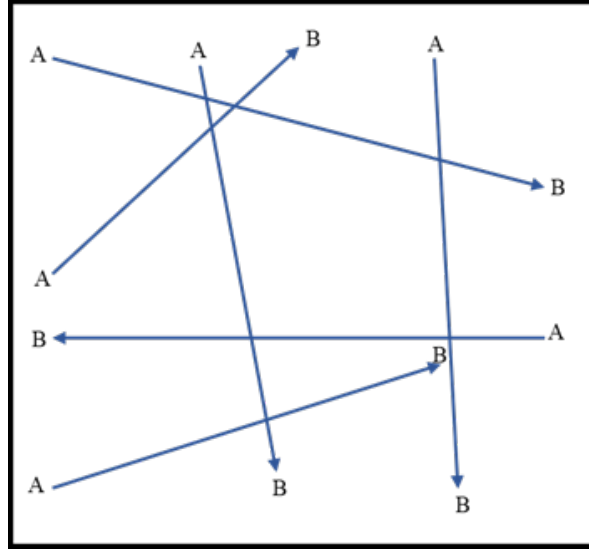


Figura 13: Generación de trayectorias aleatorias mediante una simulación de Montecarlo [4].

con gran cantidad de operaciones que se deben realizar, y depende de la calidad y representatividad de las distribuciones de entrada, ya que si los datos que alimentan el modelo no reflejan fielmente la realidad operacional, los resultados de la simulación no serán representativos del riesgo real.

Un ejemplo representativo de este enfoque es el estudio realizado por la National Aeronautics and Space Administration (NASA) en el marco del programa Safety Performance of Airborne Separation [22], que evalúa la seguridad de sistemas autónomos de separación aérea mediante simulaciones Montecarlo. En este trabajo se generaron cientos de miles de escenarios aleatorios con variabilidad en la densidad de tráfico, errores de sensores y tiempos de reacción, permitiendo estimar métricas como la probabilidad de colisión o el tiempo medio entre colisiones.

6.3. Modelo de gas extendido

Basado en la teoría cinética de gases [6], trata a las aeronaves como partículas que se mueven aleatoriamente en un volumen. Las colisiones se estiman analíticamente a partir de la densidad, velocidad relativa y el tamaño de los volúmenes de protección de cada aeronave. Se diferencia de los modelos deterministas en que cuando al menos uno de sus parámetros de entrada se modela como una variable aleatoria, es decir, cuando el modelo incorpora incertidumbre explícitamente mediante probabilidades o distribuciones estadísticas. En estos casos, el modelo se vuelve estocástico.

Para deducir la ecuación analítica que muestre el número de colisiones por hora, se parte de [6]. En él, se define la Ecuación 2, que determina el número de colisiones para un número de aeronaves, del mismo tipo, en un volumen específico. Para representar a las aeronaves, se hace uso de cilindros de protección.

$$C = \frac{2 \cdot N^2 \cdot g \cdot h \cdot E[v_r]}{A \cdot H} \quad [6] \quad (2)$$

Los cilindros de protección hacen referencia a los volúmenes de seguridad que representan a las aeronaves en vuelo, en vez de usar puntos o cuerpos físicos realistas. Estos cilindros, mostrados en la Figura 14 envuelven a las aeronaves con mayor o menor holgura en función del margen de seguridad buscado. De esta manera, cuando dos cilindros se solapan parcialmente, ocurre una MAC. Cada cilindro está conformado por su diámetro (g_i), que determina el doble de la distancia lateral de seguridad, y la altura (h_i), que determina el doble de la separación mínima vertical.

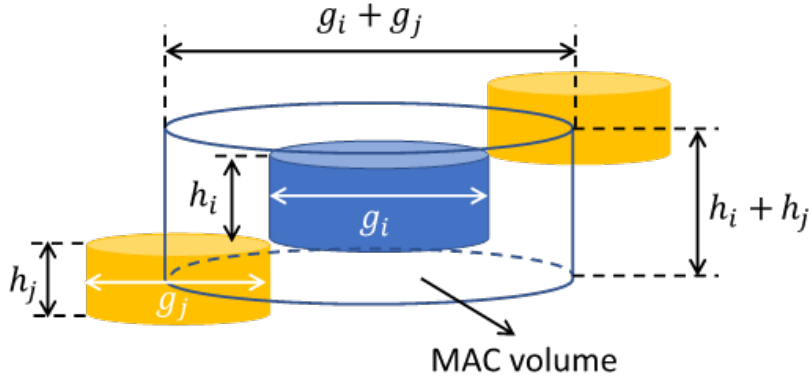


Figura 14: Cilindros de protección [4].

El uso del cilindro es muy útil por su simplicidad matemática, ya que solo necesita de dos variables para su definición, por su simetría y por que permite el desacoplamiento entre separación lateral y vertical, lo que permite reflejar tolerancias distintas en el plano horizontal y vertical.

A partir de la Ecuación 2, U-AGREE desarrolla un modelo extendido del modelo gas que permite aplicar el modelo a una flota de aeronaves, asumiendo que estas se pueden clasificar en M clases de aeronaves con características definidas con N_i aeronaves de ese tipo y que estas tienen trayectorias rectas horizontales en dirección aleatorias. A continuación se definen la frecuencia de solape horizontal (Ecuación 3) y la probabilidad de solape vertical con una aeronave de categoría i (Ecuación 4).

$$F_{Hi} = \frac{1}{A} N_i \sum_{j=1}^M (g_i + g_j) E[v_{i,j}] N_j \quad [6] \quad (3)$$

$$P_{Vi} = \frac{1}{NH} \sum_{j=1}^M N_j (h_i + h_j) \quad [6] \quad (4)$$

Así, el número de colisiones por hora se define en la Ecuación 5.

$$C = \sum_{i=1}^M F_{Hi} \cdot P_{Vi} = \frac{1}{2ANH} \sum_{i=1}^M N_i \left\{ \sum_{j=1}^M [(g_i + g_j)E[v_{i,j}]N_j] \sum_{j=1}^M [N_j(h_i + h_j)] \right\} \quad [6] \quad (5)$$

Debe tenerse en cuenta que la Ecuación 5 calcula el número de MACs por hora, algo que no es muy común a la hora de expresar los niveles de seguridad, por lo que se debe hacer una conversión a MACs por hora de vuelo. Para ello, simplemente se divide la expresión deducida por el número de aeronaves, resultando en:

$$\lambda_{MAC}^0(N) = \frac{1}{2AN^2H} \sum_{i=1}^M N_i \left(\sum_{j=1}^M (g_i + g_j)E[v_{i,j}](N_j - \delta_{i,j}) \right) \cdot \sum_{l=1}^M N_j(h_i + h_j) \quad [4] \quad (6)$$

La velocidad relativa esperada $E[v_i, v_j]$ se puede calcular como se muestra en la Ecuación 7.

$$E[v_{ij}] = \frac{1}{\Delta v_i \Delta v_j} \cdot \frac{1}{2\pi} \int_{v_{i,\min}}^{v_{i,\max}} \int_{v_{j,\min}}^{v_{j,\max}} \int_0^{2\pi} [v_i^2 + v_j^2 - 2v_i v_j \cos \theta_{ij}]^{1/2} d\theta dv_j dv_i \quad [4] \quad (7)$$

El modelo de gas es utilizado para estimar de forma analítica y rápida el número de colisiones entre aeronaves en vuelo en entornos de alta densidad, como U-space o simulaciones a gran escala. Se debe tener en cuenta que asume movimiento aleatorio e independiente, lo cual no siempre refleja la realidad y que no considera evasión de colisiones ni lógica de tráfico.

6.4. Modelo propuesto de riesgo de colisión

El objetivo de esta sección ha sido demostrar el cálculo del número de colisiones por hora de vuelo para un grupo de aeronaves (λ_{MAC}^0).

Ahora, se propone una metodología para solucionar un escenario genérico en el que una flota de distintos tipos de UAVs se encuentran en movimiento dentro de un volumen aéreo con una densidad de aeronaves por km^2 definida.

Se plantea la resolución de este escenario mediante el modelo de gas o modelo cinético de colisiones descrito previamente. Como se ha indicado previamente, este caso considera un movimiento totalmente aleatorio de las aeronaves por todo el volumen, en una dirección constante, sin considerar técnicas para evitar colisiones. Se presenta a continuación el escenario propuesto.

6.4.1. Escenario genérico propuesto

Se propone, por tanto, una serie de aeronaves que sobrevuelan un volumen delimitado de espacio aéreo continuamente en vuelo crucero y sin alterar su trayectoria por el acercamiento de otras aeronaves.

Cabe destacar que estas son limitaciones considerables, ya que el clima puede afectar a la velocidad y la trayectoria de la aeronave, aunque esta posea autopiloto. Por otra parte, el que no haya modificaciones a la trayectoria para evitar choques es algo poco realista, pero necesario para esta simulación, ya que no se puede tener en cuenta todos los programas de evasión de colisión.

Se asume también que las aeronaves están continuamente presentes en el espacio aéreo, no entran y salen ni se intercambian por otras. Esta asunción es importante ya que se considera el número de aeronaves no variable, lo cual tampoco se traduce con precisión en la realidad, pero es aceptable ya que en la realidad la variación media en el número de aeronaves es pequeña.

Como uno de los objetivos de este proyecto es observar la influencia de las aeronaves no tripuladas sobre la frecuencia de colisión por aeronave y, por tanto, el riesgo en tierra y en aire, el grupo de aeronaves debe estar mayoritariamente compuesto por UAVs, aunque con un pequeño porcentaje también de aeronaves tripuladas, ya que el riesgo en aire depende de las colisiones entre UAVs y aeronaves tripuladas.

Esta distribución no es más que una representación bastante realista de lo que será la realidad una vez que el uso de UAVs esté regulado y sea común para los fines de cada tipo de UAV.

A estas aeronaves situadas dentro del volumen se les aplicará la Ecuación 6, para determinar la frecuencia de ocurrencia de MACs por hora de vuelo entre todas las aeronaves y entre UAVs y aeronaves tripuladas.

Como se puede observar, la frecuencia de colisión depende directamente del tamaño de los volúmenes de protección y de la velocidad relativa entre aeronaves. Por lo tanto, es intuitivo estimar que cuantas más aeronaves grandes y veloces haya, más probabilidad de MACs habrá.

La Ecuación 6 depende del número de aeronaves volando en el volumen de estudio en ese momento. Para estudiar la variación de la probabilidad de MAC según el número de aeronaves en vuelo se proponen diferentes escenarios de densidad de aeronaves en el área. Estos escenarios presentarán diferentes densidades de aeronaves. Conocida el área de estudio y la densidad de aeronaves, es fácil conocer el número de aeronaves a estudiar.

Sin embargo, como se ha explicado previamente, se pretende que haya diferentes tipos de aeronaves con diferentes pesos en la composición. Por tanto, se presentan otros tres escenarios con diferente cantidad de cada tipo de aeronave en la composición.

Para el análisis del riesgo en tierra y en aire de cada composición, se van a analizar la frecuencia total de colisiones y la frecuencia de colisiones entre UAVs y UAVs y aeronaves tripuladas.

Con el fin de estudiar las colisiones entre UAVs, para cada escenario con una densidad y unas proporciones específicas, se implementa la Ecuación 6, donde, especificando las características de los diferentes tipos de aeronaves a estudiar, mediante un bucle que enfrenta todos los tipos de aeronaves, se pueden obtener la frecuencia de MAC total y entre UAVs y aeronaves tripuladas por hora de vuelo.

7. Determinación de la capacidad máxima de un volumen aéreo

La capacidad máxima (N_{max}) que un volumen aéreo tiene para aceptar más aeronaves no tripuladas sin aplicar mitigaciones viene determinada por el valor mínimo entre dos capacidades máximas. Una de ellas (N_{ground}^{max}) está definida por el riesgo en tierra para un espacio aéreo no controlado, riesgo que depende, a su vez, del número de decesos por MAC y de la frecuencia de colisión por aeronave total considerando las aeronaves presentes en el volumen considerado. Por otra parte, (N_{air}^{max}) está definida por el riesgo en aire para un espacio aéreo no controlado, riesgo que depende de la frecuencia de colisión por aeronave entre UAVs y aeronaves no tripuladas.

$$N_{max} = \min(N_{ground}^{max}, N_{air}^{max}) \quad [23] \quad (8)$$

Estas capacidades determinan la cantidad de aeronaves que pueden volar en un espacio aéreo con una composición de clases de aeronaves y una densidad de estas definidas y sobre una zona concreta sin representar un riesgo, bien a las personas en esta zona o bien a las que se encuentran en una de las aeronaves tripuladas, superior al que se propone mediante el TLOS, según evalúe el riesgo en tierra o en aire, respectivamente.

7.1. Target Level of Safety (TLOS): definición

La metodología SORA está diseñada para garantizar que las operaciones con UAVs se realicen de forma segura y controlada y para determinar el cumplimiento o no del TLOS, es decir, un nivel objetivo de seguridad que establece un umbral aceptable de riesgo para terceros.

Para determinar este nivel de seguridad, SORA lo define de manera diferente para cada tipo de riesgo, pero en ambos se debe tener en cuenta que el proyecto se centra sobre espacios aéreos no controlados.

7.1.1. TLOS para el riesgo en tierra

Se define como el número máximo aceptable de decesos de terceros por hora de vuelo. Este criterio se basa en datos históricos de aviación tripulada obtenidos de [24] para frecuencia de accidentes aéreos y decesos de terceros como consecuencia, ajustando el enfoque hacia el impacto que un accidente tendría sobre personas ajenas a la operación, en lugar de centrarse en los ocupantes de la aeronave.

Según [3], el TLOS adoptado para operaciones con UAS se calcula mediante la aplicación de la Ecuación 9

$$TLOS = \lambda_{GA_{Accident}} \cdot N_{fatality|GA_{accident}} \quad [3] \quad (9)$$

Según [24], para el caso que ocupa este proyecto, que un espacio aéreo no controlado en el que se pretende establecer el riesgo en tierra, el valor de $\lambda_{GA_{Accident}}$ es del orden de 10^{-4} y el de $N_{fatality|GA_{accident}}$ es del orden de 10^{-2}

“La multiplicación de ambos valores resulta en 10^{-6} decesos por hora de vuelo, lo que equivale a una muerte cada millón de horas operativas. Esta métrica permite cuantificar el riesgo esperado para terceros de manera coherente con los estándares de aviación tripulada, pero adaptada a la singularidad de las operaciones no tripuladas.” [3]

El TLOS para riesgo en tierra es, por tanto, un valor impuesto por las normativas de seguridad, que imponen un máximo de decesos por hora de vuelo para establecer unos límites aceptables de seguridad para terceros. Todos los escenarios que se contemplen deben tener como resultado un valor de decesos por hora de vuelo menor al establecido por el TLOS para que sean factibles.

Para este proyecto, en lugar de tomar el valor propuesto por SORA para el TLOS de 10^{-6} , se va a hacer uso del que se propone en el marco de U-AGREE para el riesgo en tierra sobre un espacio aéreo no controlado de 10^{-7} , es decir, un orden de magnitud mayor de seguridad.

7.1.2. TLOS para el riesgo en aire

El TLOS para el riesgo en aire viene determinado por la frecuencia de colisión por hora de vuelo máxima aceptable. Las unidades son diferentes en este caso frente al riesgo en tierra, ya que se asume que un accidente para una aeronave tripulada mientras que esta se encuentra en el aire, que provoque la pérdida del control de la misma, va a resultar en el deceso de todos los ocupantes de la aeronave tripulada. A diferencia del riesgo en tierra, el TLOS para el riesgo en aire se impone para asegurar un riesgo aceptable para los integrantes de la aeronave, sin tener en cuenta a las personas en tierra.

De manera similar a como se calcula el TLOS para el riesgo en tierra, se aplica para el riesgo en aire, de manera que SORA determina el TLOS para riesgo en aire en 10^{-7} .

7.2. Capacidad máxima para el riesgo en tierra (N_{ground}^{max}) en espacio aéreo no controlado

Como se ha explicado previamente, es el riesgo en tierra el que limita esta capacidad máxima. Viene determinada por la cantidad de aeronaves que pueden sobrevolar una zona sin representar un riesgo a las personas de esta superior al que se propone mediante el TLOS para el riesgo en tierra en espacio aéreo no controlado.

Para el cálculo de esta capacidad se aplica la Ecuación 10, que depende de la frecuencia de colisiones por hora de vuelo máxima para el riesgo en tierra en espacio aéreo no controlado ($\lambda_{ground,non-controlled}^{max}$) y de la frecuencia de colisión por hora de vuelo para la composición del espacio aéreo definida, normalizada por el número de aeronaves (P_{MAC}^{ground}).

$$N_{ground}^{max} = \lfloor \frac{\lambda_{ground,non-controlled}^{max}}{P_{MAC}^{ground}} \rfloor \quad [23] \quad (10)$$

7.2.1. Frecuencia de colisión por hora de vuelo máxima para el riesgo en tierra en espacio aéreo no controlado

Como se determina en la Ecuación 11, para obtener la máxima frecuencia de colisiones por hora de vuelo permitida ($\lambda_{ground,non-controlled}^{max}$) para cumplir las restricciones de seguridad dadas por TLOS, se necesita conocer tanto el número de decesos promedio para la composición de aeronaves en la situación definida ($\overline{FAT}_{MAC}$), como el TLOS para riesgo en tierra en espacio aéreo no controlado ($TLOS_{ground,non-controlled}$), cuyo valor se ha definido previamente.

$$\lambda^{max} = \frac{TLOS_{ground,non-controlled}}{\overline{FAT}_{MAC}} \quad [23] \quad (11)$$

Número de decesos promedio para la composición de aeronaves Para determinar este valor ($\overline{FAT}_{MAC}$), como se muestra en la Ecuación 12 se parte del valor medio de los decesos por impacto de todas las clases de aeronaves consideradas ($\overline{FAT}_{MAC}$) y se pondera en función de la proporción de cada clase de aeronave en la composición del espacio aéreo considerado. $\overline{FAT}_{MAC}$ se obtiene del modelo de riesgo en tierra y la proporción con la que se pondera este valor dependerá de la composición propuesta.

$$\overline{FAT}_{MAC} = 2 \sum_i P_i \overline{N}_{FATi} \quad [23] \quad (12)$$

7.2.2. Frecuencia de colisión por hora de vuelo normalizada por el número de aeronaves (P_{MAC}^{ground})

Este valor viene definido por (Ecuación 13) el cociente entre $\lambda_{MACTOTAL}^0$, calculada en la Ecuación 6, que define la frecuencia de colisión por hora de vuelo y que depende de la composición del espacio aéreo, y el número total de aeronaves en este espacio aéreo N_{TOTAL} , para obtener un valor que solo viene influenciado por la proporción y las características de las clases de aeronaves en el espacio aéreo definido. Es decir, no depende del número de aeronaves que haya.

$$P_{MAC}^{ground} = \frac{\lambda_{MACTOTAL}^0}{N_{TOTAL}} \quad [23] \quad (13)$$

7.3. Capacidad máxima para el riesgo en aire (N_{air}^{max})

Como se ha descrito previamente, para analizar el riesgo en aire, la capacidad máxima de un espacio aéreo no controlado está definida por el número de aeronaves máximo que puede albergar sin superar los límites de seguridad establecidos ($TLOS_{air,non-controlled}$). Por tanto, para poder calcular este valor, se aplicará la Ecuación 14 que depende del valor del $TLOS_{air,non-controlled}$, ya definido, y del valor de la frecuencia de colisión entre UAVs y aeronaves tripuladas (porque se está analizando el riesgo en aire) normalizado por el número de aeronaves total (P_{MAC}^{air}).

$$N_{air}^{max} = \lfloor \frac{TLOS_{air,non-controlled}}{P_{MAC}^{air}} \rfloor \quad [23] \quad (14)$$

El valor de la frecuencia de colisión entre UAVs y aeronaves tripuladas (porque se está analizando el riesgo en aire) normalizado por el número de aeronaves total (P_{MAC}^{air}) se calcula en Ecuación 15 de manera similar a como se hizo con el equivalente para el riesgo en tierra, pero para este caso se toma como frecuencia de MAC el valor correspondiente a esta entre UAVs y aeronaves tripuladas. Este, al igual que P_{MAC}^{ground} solo viene influenciado por la proporción y las características de las clases de aeronaves en el espacio aéreo definido. Es decir, no depende del número de aeronaves que haya.

$$P_{MAC}^{ground} = \frac{\lambda_{MACUAV-tripuladas}^0}{N_{TOTAL}} \quad [23] \quad (15)$$

8. Caso de uso: Benidorm

Como se ha descrito previamente, el objetivo principal de este proyecto es el de obtener el número de UAVs máximo que puede albergar el espacio aéreo definido para diferentes mezclas de tipos de aeronaves y diferentes densidades, de manera que se respete el número máximo de decesos por hora de vuelo.

Para este proceso es necesario realizar una serie de simulaciones con ciertos requerimientos de procesamiento por su complejidad matemática. Por esta razón, no es realista pretender realizar los cálculos a mano, sino utilizar un ordenador para procesar toda esta información y proporcionar resultados y gráficas que faciliten la visualización y entendimiento de estos.

Para este caso, se va a proceder a un cálculo de la capacidad máxima permitida sobre la ciudad de Benidorm. Para ello, se va a seguir el modelo que se ha propuesto en este proyecto.

8.1. Determinación del riesgo en tierra para Benidorm

Como se ha explicado en la sección 5.4, en primer lugar se debe establecer el área de estudio, como se describe en la Tabla 1 y se visualiza en la Figura 15, para poder generar las trayectorias aleatorias.

Coordenadas Benidorm	Máxima	Mínima
Longitud [deg]	38.55	38.51
Latitud [deg]	-0.95	-0.175

Tabla 1: Coordenadas de estudio



Figura 15: Situación del área de estudio [5].

Definidas las trayectorias, se proponen los tipos de aeronaves, definidas por sus características, sobre los que se va a estudiar el riesgo en tierra. Para el caso propuesto, se establecen las características de cada tipo de aeronave en las Tabla 2 y Tabla 3.

	UAV Tipo 1	UAV Tipo 2	UAV Tipo 3	Tripulada Tipo 1
Tipo de ala	Fija	Fija	Fija	Fija
Diámetro de protección [m]	1	2	3	15
Altura de protección [m]	0.3	0.5	1	8
Velocidad máxima [m/s]	25	30	35	40
Velocidad mínima [m/s]	20	25	30	33
Masa [kg]	3	25	50	5000

Tabla 2: Características de las aeronave estudiadas.

	UAV Tipo 4	UAV Tipo 5	UAV Tipo 6	Tripulada Tipo 2
Tipo de ala	Rotatoria	Rotatoria	Rotatoria	Rotatoria
Diámetro de protección [m]	1	2	3	15
Altura de protección [m]	0.3	0.5	1	8
Velocidad máxima [m/s]	25	30	35	40
Velocidad mínima [m/s]	20	25	30	33
Masa [kg]	3	25	50	5000

Tabla 3: Características de las aeronave estudiadas.

Se procede a continuación con la extracción de GHSL [19] de los mapas de distribución de densidad poblacional y de superficie construida para Benidorm. Estos mapas se muestran en las Figura 16 y Figura 17 en forma de mapa de calor donde, a más oscuro es el color, un valor más alto tiene esa celda.

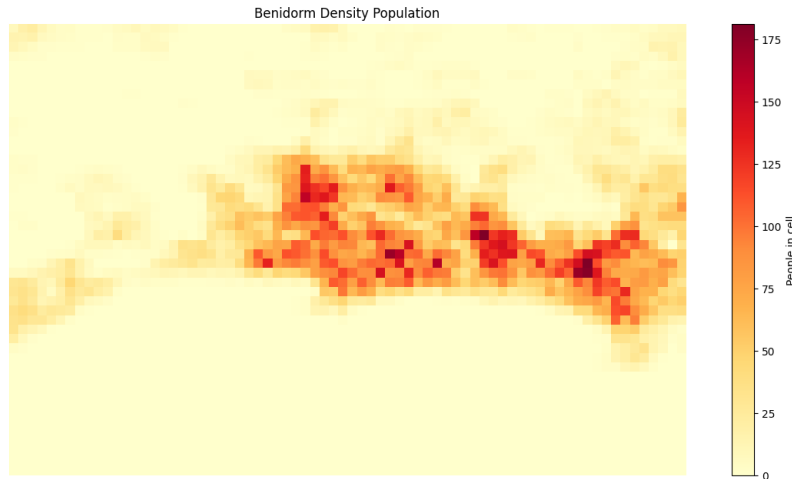


Figura 16: Mapa de calor representando la densidad poblacional en Benidorm.

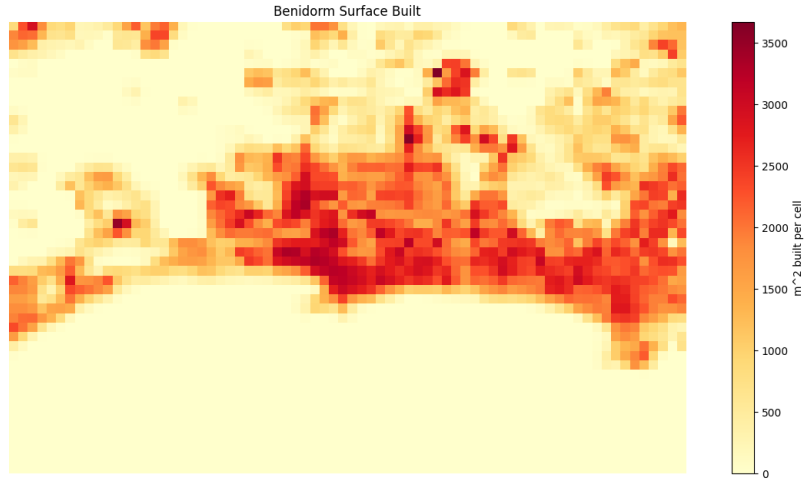


Figura 17: Mapa de calor representando la superficie construida en Benidorm.

Partiendo de estos valores y mapas y siguiendo con el procedimiento de la sección 5.4, se calcula el área crítica promedio para cada aeronave con la distribución de población expuesta, como se muestra en la Tabla 4. Es importante tener en cuenta que se ha aplicado la reducción de área crítica a las aeronaves que correspondía según la normativa de SORA.

Tipo de Aeronave	Área Crítica Generada [m^2]
UAV Tipo 1	1.33
UAV Tipo 2	3.07
UAV Tipo 3	6.13
UAV Tipo 4	0.99
UAV Tipo 5	3.1
UAV Tipo 6	6.69
Aeronave tripulada Tipo 1	136.73
Aeronave tripulada Tipo 2	136.65

Tabla 4: Áreas Críticas Promedio para cada tipo de aeronave sobre Benidorm.

Se calcula también el número de decesos por MAC para cada tipo de aeronave en el área establecida. Se muestran los resultados en la Tabla 5.

Tipo de Aeronave	Promedio de decesos provocados por MAC
UAV Tipo 1	$1,29 \cdot 10^{-3}$
UAV Tipo 2	$2,91 \cdot 10^{-3}$
UAV Tipo 3	$5,52 \cdot 10^{-3}$
UAV Tipo 4	$9,42 \cdot 10^{-4}$
UAV Tipo 5	$3,24 \cdot 10^{-3}$
UAV Tipo 6	$5,76 \cdot 10^{-3}$
Aeronave tripulada Tipo 1	$1,196 \cdot 10^{-1}$
Aeronave tripulada Tipo 2	$1,04 \cdot 10^{-1}$

Tabla 5: Número de decesos promedio por cada MAC.

8.2. Determinación del riesgo de colisión

Se sigue ahora el procedimiento expuesto en la sección 6.4. En primer lugar se definen en la Tabla 6 las dimensiones del volumen aéreo considerado.

Área [km^2]	25
Rango de alturas [m]	20-120

Tabla 6: Características del volumen aéreo estudiado.

A continuación, se definen en la Tabla 7 las mezclas establecidas para los distintos tipos de aeronaves. Se recuerda que las características de cada tipo de aeronave se definían en Tabla 2 y Tabla 3.

	UAV Tipo 1	UAV Tipo 2	UAV Tipo 3	Aeronave tripulada
Composición 1 [%]	80	15	4.9	0.1
Composición 2 [%]	70	20	9.5	0.5
Composición 3 [%]	50	30	19	1

Tabla 7: Escenarios para diferentes composiciones.

Conocida toda la información y aplicando la Ecuación 6, se obtiene la Tabla 8 para la frecuencia de MAC total por hora de vuelo y la Tabla 9 para la frecuencia de MAC entre UAVs y aeronaves tripuladas.

[MAC/Flight Hour (FH)]	Composición 1	Composición 2	Composición 3
1 aeronave/ km^2	$5,35 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$2,36 \cdot 10^{-3}$
2 aeronave/ km^2	$1,07 \cdot 10^{-3}$	$2,4 \cdot 10^{-3}$	$4,72 \cdot 10^{-3}$
3 aeronave/ km^2	$1,61 \cdot 10^{-3}$	$3,59 \cdot 10^{-3}$	$7,08 \cdot 10^{-3}$
4 aeronave/ km^2	$2,14 \cdot 10^{-3}$	$4,79 \cdot 10^{-3}$	$9,44 \cdot 10^{-3}$
5 aeronave/ km^2	$2,68 \cdot 10^{-3}$	$5,99 \cdot 10^{-3}$	$1,18 \cdot 10^{-2}$

Tabla 8: Frecuencia de MAC por hora de vuelo total en función de la densidad de aeronaves y la composición aplicada.

[MAC/FH]	Composición 1	Composición 2	Composición 3
1 aeronave/ km^2	$9,45 \cdot 10^{-8}$	$2,40 \cdot 10^{-6}$	$9,94 \cdot 10^{-6}$
2 aeronave/ km^2	$1,89 \cdot 10^{-7}$	$4,80 \cdot 10^{-6}$	$1,99 \cdot 10^{-5}$
3 aeronave/ km^2	$2,83 \cdot 10^{-7}$	$7,20 \cdot 10^{-6}$	$2,98 \cdot 10^{-5}$
4 aeronave/ km^2	$3,78 \cdot 10^{-7}$	$9,60 \cdot 10^{-6}$	$3,97 \cdot 10^{-5}$
5 aeronave/ km^2	$4,72 \cdot 10^{-7}$	$1,20 \cdot 10^{-5}$	$4,97 \cdot 10^{-5}$

Tabla 9: Frecuencia de MAC por hora de vuelo entre UAVs y aeronaves tripuladas en función de la densidad de aeronaves y la composición utilizado.

8.3. Determinación de la capacidad máxima permitida

Se busca ahora determinar la capacidad máxima permitida para el volumen aéreo que se ha descrito y para cada una de estas composiciones de aeronaves. Para ello, se recuerda, se debe calcular la capacidad máxima permitida para el riesgo en tierra (N_{ground}^{max}) y para el riesgo en aire (N_{air}^{max}) y utilizar la menor de ellas (Ecuación 8) como capacidad máxima permitida para el caso de Benidorm.

8.3.1. Capacidad máxima permitida para el riesgo en tierra

Siguiendo el procedimiento expuesto en sección 7, se calculan la media de decesos por MAC ($\overline{FAT}_{MAC}$), la frecuencia máxima permitida de MACs por hora de vuelo ($\lambda_{ground,non-controlled}^{max}$) y la frecuencia de MAC total por hora de vuelo normalizada con el número total de aeronaves (P_{MAC}^{ground}), todo ello para el caso de riesgo en tierra y espacio aéreo no controlado. Con todos estos datos, se calcula la capacidad máxima permitida. Todos estos datos se hacen tomando el área de estudio definida (Benidorm) y las mezclas especificadas en la Tabla 7. Toda esta información se refleja en la Tabla 10.

	Composición 1	Composición 2	Composición 3
$\overline{FAT}_{MAC}$ [decesos/MAC]	$3,70 \cdot 10^{-3}$	$5,12 \cdot 10^{-3}$	$7,33 \cdot 10^{-3}$
$\lambda_{ground,non-controlled}^{max}$ [decesos/FH]	$2,70 \cdot 10^{-5}$	$1,95 \cdot 10^{-5}$	$1,36 \cdot 10^{-5}$
P_{MAC}^{ground} [MAC/FH·Aeronave]	$9,44 \cdot 10^{-5}$	$4,79 \cdot 10^{-5}$	$2,14 \cdot 10^{-5}$
N_{ground}^{max} [Aeronaves]	1	0	0

Tabla 10: Media de decesos por MAC, frecuencia límite de MACs por hora de vuelo, frecuencia de MAC normalizada por el número de aeronaves presentes y la capacidad máxima permitida para el riesgo en tierra para cada composición.

8.3.2. Capacidad máxima permitida para el riesgo en aire

Por otra parte, la capacidad máxima permitida de riesgo en aire se calcula siguiendo la sección 7.3 para la que solo es necesario calcular la frecuencia de MAC entre UAVs y aeronaves tripuladas por hora de vuelo normalizada con el número total de aeronaves (P_{MAC}^{air}), ya que el $TLOS_{air,non-controlled}$ se ha definido previamente. En la Tabla 11 se describe el resultado de estos valores para cada una de las composiciones propuestas.

	Composición 1	Composición 2	Composición 3
P_{MAC}^{air} [MAC/FH·Aeronave]	$3,77 \cdot 10^{-9}$	$9,59 \cdot 10^{-8}$	$3,97 \cdot 10^{-7}$
N_{air}^{max} [Aeronaves]	2	1	0

Tabla 11: frecuencia de MAC normalizada por el número de aeronaves presentes (P_{MAC}^{air}) y capacidad máxima permitida para el riesgo en aire (N_{air}^{max}) para cada composición.

8.3.3. Capacidad máxima permitida para el riesgo en aire

Como se explica en la Ecuación 8, la capacidad máxima de un espacio aéreo vendrá definida por el valor más pequeño entre la capacidad máxima para el riesgo en tierra y la capacidad máxima para el riesgo en aire.

	Composición 1	Composición 2	Composición 3
N^{max} [Aeronaves]	1	0	0

Tabla 12: Capacidad máxima permitida para cada composición.

8.4. Discusión de resultados

8.4.1. Discusión de los resultado de la aplicación del modelo de riesgo en tierra

Es inmediato de la observación de los resultados obtenidos en la Tabla 4 que las aeronaves de tipo ala fija y de tipo ala rotatoria generan áreas críticas muy similares. Esto es debido a la asunción de caída balística en lugar de planeo. Dos cuerpos de iguales dimensiones y peso van a caer igual, para la misma velocidad inicial, siempre que las superficies sustentadoras no entren en la ecuación.

Por otra parte, es también inmediato que las aeronaves de mayores dimensiones y mayores masas van a generar áreas críticas más grandes, sobre todo teniendo en cuenta que para aeronaves con masa superior a 25 kg, los obstáculos no van a reducir las áreas críticas.

Como se puede apreciar en la Tabla 5, mayores áreas críticas generan mayor número de decesos cada vez que ocurre un MAC. Una mayor área cubierta por el área crítica abarca la posibilidad de que haya más personas en su interior.

8.4.2. Discusión de los resultado de la aplicación del modelo de riesgo en aire

De las Tabla 8 y Tabla 9 se puede deducir que una mayor densidad de aeronaves provoca un crecimiento proporcional de la frecuencia de MAC por hora de vuelo. Además, un aumento en la proporción de aeronaves de dimensiones superiores respecto a las más pequeñas provocará un aumento en esta frecuencia. Esto es lógico cuando se observa los factores que influyen sobre la Ecuación 6 (diámetro y altura del cilindro de protección). Además, estas aeronaves suelen tener mayores velocidades de crucero, aumentando el valor de la esperanza de la velocidad relativa.

8.4.3. Discusión de los resultado de la aplicación de la determinación de la capacidad máxima

Capacidad máxima para el riesgo en tierra: Como se puede observar en la Tabla 10, las composiciones con aeronaves más grandes y veloces tienen una mayor mortalidad media, debido al aumento de las áreas críticas generadas. Especialmente influyente es el aumento proporcional de aeronaves tripuladas, que tienen una mortalidad especialmente alta, aunque también influye y mucho el aumento del UAV de Tipo 3. Este alto grado de mortalidad va a obligar a reducir la frecuencia máxima de MACs por hora de vuelo para espacios no controlados, algo que solo es posible reduciendo la probabilidad de que ocurra un MAC. Para esto, se debe disminuir el número de aeronaves presentes en el espacio aéreo. Esta reducción es tan grande que, para cumplir con el TLOS impuesto de 10^{-7} , solo en la primera composición se puede introducir alguna aeronave en el medio.

Para este caso, los parámetros más influyen sobre $\lambda_{ground,non-controlled}^{max}$ son, sobre todo, la densidad de población y las características de las aeronaves (dimensiones, masa y velocidad máxima) que forman la composición. El hecho de sobrevolar una ciudad con la densidad de población que tiene Benidorm, provoca que el riesgo de causar un fallecimiento por la caída de un UAV sea más alto que en ciudades o pueblos menos densamente poblados. Es por esto que la densidad poblacional es, posiblemente, el factor más importante a considerar. Por otra parte, las dimensiones de las aeronaves también tendrán un gran peso, sobre todo, cuando las aeronaves representan un mayor porcentaje en la composición, por el aumento en la mortalidad de este que suponen, al aumentar el área crítica media ponderada de este.

Capacidad máxima para el riesgo en aire: En la Tabla 11 se observa que, de nuevo, composiciones con más aeronaves más grandes y más veloces provocan mayor número de colisiones. Para esta situación, el factor que más se debe tener en cuenta para la determinación de la capacidad máxima del espacio aéreo para riesgo en aire son las características de las aeronaves.

Por otra parte, se observa un ligero aumento de la capacidad máxima en esta situación respecto a la capacidad máxima para el riesgo en tierra. Sin embargo, sigue siendo muy pequeña en comparación con la amplitud del espacio aéreo.

Capacidad máxima final: Como se denota en la Tabla 12, la capacidad máxima final viene dada por la capacidad máxima para el riesgo en tierra, cuyo valor es casi nulo (solo una aeronave permitida) para la primera composición y nulo para las otras dos. Esto lleva a la siguiente conclusión:

El aumento del límite de la frecuencia de MACs (λ^{max}) y la alta densidad poblacional de la ciudad hacen inviable la posibilidad de un espacio aéreo donde las aeronaves (tripuladas y UAVs) se muevan en direcciones aleatorias, como se ha supuesto en este proyecto, siguiendo las asunciones del modelo de gas extendido si no se aplican mitigaciones. Es por tanto, necesario que se establezca algún tipo de mitigación al riesgo de colisión como designar la zona estudiada como espacio aéreo y aplicar servicios U-space de mitigación como el servicio de información de tráfico, que informa de la presencia de otras aeronaves en las proximidades o en la ruta del vuelo del UAV, el servicio de autorización de vuelo de

UAS, que autoriza el vuelo de UAS para cada vuelo basándose en todos los requerimientos de vuelo que puedan causar conflicto en el mismo espacio U-space, o el servicio de geoconsciencia para proveer información sobre restricciones del espacio aéreo y de condiciones operacionales, sobre restricciones temporales y sobre zonas geográficas UAS, entre otros servicios [25].

9. Conclusiones

El desarrollo de la herramienta de simulación ha permitido estimar la capacidad máxima de un espacio aéreo definido, teniendo en cuenta los múltiples escenarios operacionales, combinaciones de tipos de aeronaves no tripuladas y la dependencia o no entre UAVs y aeronaves tripuladas. A través de un análisis normativo y contextual, se han establecido las bases metodológicas que sustentan el modelo, incluidas la metodología de SORA para la determinación de decesos por MAC, el modelo de gas extendido para el cálculo de la frecuencia de MAC o la generación de trayectorias. En este análisis también se han definido parámetros técnicos como volúmenes de protección, densidad poblacional y áreas críticas.

El modelo ha evidenciado cómo el aumento en el número de aeronaves de mayor tamaño incrementa significativamente la frecuencia de colisiones en el aire y cómo este fenómeno, combinado con la densidad de población de la zona evaluada (Benidorm), impide cumplir los requisitos de seguridad establecidos, conformados por el TLOS.

En definitiva, la herramienta desarrollada permite evaluar de manera efectiva el impacto operativo de distintas configuraciones de tráfico aéreo, facilitando la toma de decisiones informadas en la planificación y gestión del espacio aéreo urbano para UAVs.

Líneas de trabajo futuro

Como continuación de este trabajo, se proponen distintas líneas de investigación y desarrollo que incluyen:

- La validación con datos reales al aplicar la herramienta a escenarios donde existan registros operacionales históricos, con el fin de contrastar los resultados obtenidos y calibrar el modelo con mayor precisión.
- El modelado dinámico de trayectorias incorporando modelos de comportamiento más complejos que permitan simular trayectorias adaptativas ante conflictos, considerando algoritmos de evitación y prioridades de vuelo.
- La integración con sistemas U-space vinculando la herramienta con plataformas de gestión del tráfico U-space y explorar su utilidad como módulo de apoyo a la toma de decisiones en tiempo real.

Estas líneas permitirían evolucionar el prototipo hacia una herramienta más robusta y aplicable en contextos reales de despliegue de aeronaves no tripuladas en entornos urbanos complejos.

A. Pliego de Condiciones

A.1. Introducción

El presente Pliego de Condiciones tiene como finalidad establecer los criterios técnicos, metodológicos, económicos y legales bajo los que se ha desarrollado este proyecto, en el contexto de un Trabajo de Fin de Grado (TFG) en la Universitat Politècnica de València. A pesar de que el proyecto no contempla obra civil ni tiene como objetivo intervención de contratistas, resulta pertinente definir este documento para garantizar la trazabilidad, claridad y rigor técnico del desarrollo.

A.2. Alcance del proyecto

- **Identificación del proyecto:** Desarrollo de una herramienta software para el análisis de la capacidad máxima de espacio aéreo bajo condiciones específicas de operación asegurando los límites de seguridad aceptables, además de el cálculo para observar la variación de esta en diferentes escenarios.
- **Objetivo:** Simular y calcular de manera fiable la capacidad máxima en volúmenes de espacio aéreo definidos y con diferentes escenarios para operaciones de aeronaves no tripuladas (UAS), en conformidad con normativas como SORA y documentos JARUS.
- **Ámbito de aplicación:** Entorno académico, aplicable a estudios de gestión de tráfico aéreo, análisis de seguridad y diseño de procedimientos de operación UAS.
- **Partes del proyecto:** Algoritmo de simulación, carga de escenarios y generación de informes.

A.3. Disposiciones generales

- **Normativa aplicada:** Metodología SORA, directrices JARUS, EUROCAE y normativa europea relacionada con UAS y UTM, definidas por EASA y EUROCONTROL.
- **Propiedad intelectual:** El software es de autoría original y está protegido bajo licencia académica. Su uso está limitado al ámbito de la evaluación del TFG.
- **Confidencialidad:** No se manejan datos personales ni información clasificada.
- **Control de calidad:** El software ha sido verificado mediante pruebas internas, revisión de resultados esperados y validación cruzada con referencias bibliográficas.
- **Requisitos técnicos:** Python 3.10, bibliotecas científicas (NumPy, Matplotlib, SciPy), ejecución en entorno de escritorio con mínimo 8GB de RAM.

A.4. Condiciones económicas

- **Coste Directo:** Licencia de MATLAB y horas dedicadas al trabajo y su traducción en salario, expuestas en la sección de Presupuesto
- **Herramientas Utilizadas:** Software de código abierto (Python, MATLAB).

A.5. Condiciones particulares

- **Lenguajes de programación:** Python, MATLAB.
- **Estructura del código:** Modular, con funciones independientes para simulación, gestión de parámetros y exportación de resultados.
- **Compatibilidad:** Archivos exportables en formatos comunes (CSV, PNG).
- **Documentación técnica:** Disponible en el informe del TFG y como anotaciones en el código.
- **Posibles extensiones:** Integración con herramientas GIS, mayor variedad de escenarios de tráfico, interfaz web.

A.6. Condiciones del entorno

El entorno en el que se ha desarrollado el presente proyecto de software ha sido cuidadosamente seleccionado para garantizar unas condiciones óptimas de ergonomía, confort y seguridad, de acuerdo con lo estipulado en la normativa vigente, como el Real Decreto 486/97 sobre disposiciones mínimas de seguridad y salud en los lugares de trabajo.

El puesto de trabajo ha ofrecido el espacio suficiente para una correcta movilidad, permitiendo el acceso cómodo a todos los dispositivos necesarios para la programación, como el ordenador portátil, periféricos y documentación técnica. Asimismo, se ha procurado mantener una correcta organización del entorno para evitar distracciones y favorecer la concentración.

Las condiciones ambientales han sido adecuadas, manteniéndose una temperatura estable en torno a los 20 °C, con niveles de humedad relativa comprendidos entre el 30 % y el 70 %, lo cual ha contribuido al confort térmico durante las jornadas de trabajo prolongadas.

La iluminación ha sido otro factor clave. Se ha trabajado en un espacio con luz natural indirecta y refuerzo de iluminación artificial mediante luz blanca neutra, con el fin de evitar fatiga visual. También se ha respetado una distancia adecuada entre los ojos y la pantalla del ordenador, así como una inclinación y altura correctas, reduciendo la tensión postural.

En conjunto, las condiciones del entorno han favorecido una ejecución eficiente y saludable del proyecto, minimizando riesgos laborales asociados a tareas ofimáticas prolongadas.

A.7. Pruebas y ajustes finales o de servicio

En este apartado se describen las pruebas realizadas para garantizar que el software desarrollado cumple con los requisitos establecidos y se comporta correctamente bajo distintos escenarios de uso.

Durante el desarrollo, se han llevado a cabo pruebas de integración de manera progresiva, con el objetivo de comprobar que los distintos módulos del sistema (como el cálculo de capacidad, el procesamiento de datos de entrada y la visualización de resultados) se comunican de forma adecuada y sin errores en el intercambio de información.

Una vez completada la integración, se han ejecutado pruebas funcionales que verifican que el sistema responde correctamente ante los casos de uso definidos. Estas pruebas aseguran que las funcionalidades clave, como el análisis de rutas, la gestión de escenarios y la generación de salidas gráficas, se comportan según lo previsto.

Posteriormente, se han realizado pruebas de rendimiento con conjuntos de datos de distinta magnitud para evaluar la eficiencia del software, el consumo de recursos y escalabilidad. El objetivo ha sido comprobar que la herramienta puede utilizarse en condiciones reales sin comprometer la usabilidad.

En caso de que durante las pruebas se haya detectado algún error o comportamiento inesperado, se han corregido las incidencias y repetido las pruebas correspondientes para asegurar su resolución completa.

Finalmente, una vez validado el correcto funcionamiento del software, se han aplicado mejoras orientadas a optimizar la experiencia del usuario y el rendimiento general de la aplicación, maximizando así el aprovechamiento de las funcionalidades desarrolladas.

A.8. Resumen final

Este Pliego de Condiciones establece el marco de desarrollo del software presentado en el TFG. Define su finalidad académica, estructura, normativa aplicada, condiciones técnicas, económicas y de entorno, garantizando así una comprensión clara y completa de los criterios bajo los que ha sido diseñado y ejecutado el proyecto.

B. Código fuente

B.1. Software para el cálculo de áreas críticas y número medio de decesos

```
1
2
3 import casex
4 import math
5 from matplotlib.lines import Line2D
6 import pandas as pd
7 import random
8 import numpy as np
9 import os
10 from descartes.patch import PolygonPatch
11 from shapely.ops import unary_union
12 from shapely.geometry import Polygon, MultiPolygon, MultiPoint, LineString
13 from shapely.strtree import STRtree
14 import matplotlib.pyplot as plt
15 import rasterio
16 from rasterio.windows import from_bounds
17 from shapely.geometry import shape
18 import geopandas as gpd
19 from rasterio.features import shapes
20 import pyproj
21 from shapely.ops import transform
22 import operaciones_shapefile
23 from shapely.affinity import translate
24 from shapely.validation import explain_validity
25 from rasterio.plot import show
26 import operaciones_raster
27 import matplotlib.patches as mpatches
28
29
30
31 # rea ocupada por personas
32 person_radius = 0.3
33 person_height = 1.8
34
35 #Valores de aeronave
36
37 while(True):
38     aircraft_type=input('Inserta tipo de aeronave (fixed o rotory): ')
39     if aircraft_type=='fixed':
40         aircraft_type = casex.enums.AircraftType.FIXED_WING
41         break
42     elif aircraft_type == 'rotory':
43         aircraft_type = casex.enums.AircraftType.ROTORY_WING
44     else:
45         continue
46
47 aircraft_width = input('Inserta anchura de la aeronave: ')
48 aircraft_mass = input('Inserta masa de la aeronave: ')
49 aircraft_frontal_area = input('Inserta rea frontal de la aeronave: ')
50
51 weight_limit_consider_obs = 25 #Given by SORA
52
53 #Obst culos
54 CA_width = aircraft_width
55 trials_count = 1000
56
57
58
59
```

```

60 ## Coordenadas a Evaluar (WGS84)
61 # lat_min = 38.54
62 # lat_max = 38.55
63 # lon_min = -0.14
64 # lon_max = -0.10
65 lat_min = input('Inserta la latitud minima: ')
66 lat_max = input('Inserta la latitud maxima: ')
67 lon_min = input('Inserta la longitud minima: ')
68 lon_max = input('Inserta la longitud maxima: ')
69
70 #Poblacion
71 raster_population_density_path=input('Inserta la URL al mapa de poblacion: ')
72 with rasterio.open(raster_population_density_path) as src:
73     people_in_cell = src.read(1)
74     transform = src.transform
75     nodata = src.nodata if src.nodata is not None else -9999
76     crs_raster = src.crs
77
78 pixel_area = operaciones_raster.pixel_area(raster_population_density_path,
79     central_lat=(lat_min+lat_max)/2)
80
81 # ----- LISTA DE EDIFICIOS (=OBSTACULOS) -----
82 # Cargar edificios vectoriales
83 vectorial_building_path=input('Inserta la URL al mapa de superficie construida: ')
84 gdf_buildings = gpd.read_file(vectorial_building_path)
85 gdf_buildings_utm = gdf_buildings.to_crs("EPSG:32630") # Reproyectar a UTM zona 30N (EPSG:32630)
86 obstacles_utm = operaciones_shapefile.gdf2obstacle_list(gdf_buildings_utm) # Convertir a lista de
87     obstaculos con geometria en metros
88
89 obstacles_junction_utm = unary_union(obstacles_utm)
90 minx, miny, maxx, maxy = obstacles_junction_utm.bounds
91 trial_area_sidelength = max(maxx - minx, maxy - miny)*0.6
92
93 #Instancia FC (clase que provee coeficientes de friccion),
94 #CA (clase con modelos de computo de reactividad),
95 #BDM (modelo de descenso balistico)
96 FC = casex.FrictionCoefficients()
97 CA = casex.CriticalAreaModels(person_radius, person_height)
98 BDM = casex.BallisticDescent2ndOrderDragApproximation()
99
100
101 #Definimos aeronave con sus atributos
102 aircraft = casex.AircraftSpecs(aircraft_type, aircraft_width, aircraft_mass)
103 friction_coefficient = FC.get_coefficient(casex.enums.AircraftMaterial.RUBBER,
104     casex.enums.GroundMaterial.CONCRETE) #Coeficiente de friccion entre aeronave y suelo
105 aircraft.set_friction_coefficient(friction_coefficient)
106 aircraft.set_fuel_type(casex.enums.FuelType.GASOLINE)
107 aircraft.set_fuel_quantity(0)
108 #aircraft.set_coefficient_of_restitution(casex.AnnexFPParams.CoR_from_impact_angle(impact_angle))
109 aircraft.set_ballistic_frontal_area(aircraft_frontal_area)
110 aircraft.set_ballistic_drag_coefficient(0.8)
111
112 #Solape entre reactividad de planeo y deslizamiento y el reactividad por deflagracion
113     (aumento de temperatura por velocidad)
114 critical_areas_overlap = 0
115 lethal_kinetic_energy = -1
116
117 # ----- RESUMEN PAR METROS INICIALES -----
118 print('----- UAV Parametres -----')
119 print(f'UAV mass: {aircraft_mass} kg')
120 print(f'UAV wingspan: {aircraft_width} m')

```

```

120 print(f'UAV frontal area: {aircraft_frontal_area} m^2')
121 print(f'UAV friction coefficient: {friction_coefficient}')
122 print('----- AREA OF STUDY -----')
123 print(f'Max Latitude: {lat_max}')
124 print(f'Min Latitude: {lat_min}')
125 print(f'Max Longitude: {lon_max}')
126 print(f'Min Longitude: {lon_min}')
127 print(f"Average Population Density: {np.mean(people_in_cell/pixel_area)} persons/m^2")
128
129
130 #----- Extracci n de informaci n de trayectorias -----
131 print('----- ANALYSIS START -----')
132 tracks_folder = input('Inserta la URL a la carpeta de trayectorias: ')
133 critical_area = []
134 csv_documents = [f for f in os.listdir(tracks_folder) if f.endswith('.csv')]
135 max_loops = 100
136 document_number = 0
137 average_fatalities_total=[]
138 for doc_name in csv_documents:
139     complete_track_path = os.path.join(tracks_folder, doc_name)
140     print(' ')
141     print(f'File on study: {doc_name}')
142     df = pd.read_csv(complete_track_path)
143     total_steps = df['Lat'].count()
144
145     loops = 0
146     while(True):
147         loops = loops+1
148         step = random.randint(round(0.1*total_steps), round(0.9*total_steps)) #no tienen en cuenta
despegue y aterrizaje (valores modificables)
149         [Lat, Lon, Alt, Vx, Vy, Vz] = [df.at[step,'Lat'], df.at[step,'Lon'], df.at[step,'Alt'],
df.at[step,'Vx'], df.at[step,'Vy'],
150                                     df.at[step,'Vz']] #saca los valores para un instante aleatorio
de la trayectoria
151         Horizontal_Velocity =np.sqrt(np.power(Vx, 2) + np.power(Vy, 2)) #modulo de la velocidad
horizontal
152         if Horizontal_Velocity > Vz: #si no se cumple, el programa de calculo bal stico va a dar
error
153             break
154         if loops > max_loops: #control de vueltas para que no sea infinito
155             break
156
157         ##### C lculo de la trayectoria bal stica como par bola #####
158         BDM.set_aircraft(aircraft)
159         ballistic = BDM.compute_ballistic_distance(Alt, Horizontal_Velocity, Vz)
160         impact_speed = ballistic[1] #m/s
161         impact_angle = ballistic[2] * 180/np.pi #deg
162
163         ##### C lculo del rea cr tica sin obst culos #####
164         CA_no_obs = CA.critical_area(aircraft, impact_speed, impact_angle, critical_areas_overlap,
lethal_kinetic_energy)[0]
165         print(f'Average CA without obstacles: {np.mean(CA_no_obs)} m ')
166         OS = casex.Obstacles(CA_width, CA_no_obs/CA_width, trial_area_sidelength)
167
168         if aircraft_mass <= weight_limit_consider_obs:
169             ##### Construcci n malla de obst culos #####
170             OS.obstacles = obstacles_utm
171
172         OS.generate_CAs(trials_count)
173
174
175 #----- DESPLAZAMIENTO REAS CR TICAS A ZONA BENIDORM -----
176 # Calcular centroide de las reas cr ticas generadas
177 CAs_centroid = unary_union(OS.CAs).centroid.coords[0]

```

```

178 # Calcular centroide de los obst culos
179 obstacles_centroid = unary_union(obstacles_utm).centroid.coords[0]
180 # Calcular desplazamiento necesario
181 dx = obstacles_centroid[0] - CAs_centroid[0]
182 dy = obstacles_centroid[1] - CAs_centroid[1]
183
184 # Aplicar traslaci n para centrar las CAs sobre los obst culos
185 OS.CAs = [
186     translate(ca, xoff=dx, yoff=dy)
187     for ca in OS.CAs
188     if isinstance(ca, (Polygon, MultiPolygon)) and not ca.is_empty
189 ]
190
191 if aircraft_mass <= weight_limit_consider_obs:
192     # ----- REDUCCI N DE CAs -----
193     reduced_CAs = []
194     for ca in OS.CAs:
195         reduced_CA = ca
196         for obs in OS.obstacles:
197             if reduced_CA.intersects(obs):
198                 reduced_CA = reduced_CA.difference(obs)
199             if isinstance(reduced_CA, (Polygon, MultiPolygon)) and not reduced_CA.is_empty:
200                 reduced_CAs.append(reduced_CA)
201     OS.CAs_reduced = reduced_CAs
202     if OS.CAs_reduced:
203         areas = [poly.area for poly in OS.CAs_reduced if isinstance(poly, Polygon)]
204         average_area = sum(areas) / len(areas)
205
206     OS.CAs = OS.CAs_reduced
207
208
209 # ----- C LCULO DE MUERTES POR CA -----
210 # Usar CRS en metros (EPSG:32630) para calcular reas correctamente
211 gdf_cas_area = gpd.GeoDataFrame(geometry=OS.CAs, crs="EPSG:32630")
212 # Reproyectar para superponer con raster (solo para coordenadas)
213 gdf_cas_reprojected = gdf_cas_area.to_crs(crs_raster)
214
215 fatalities_per_collision = []
216
217 for geom_utm, geom_raster in zip(gdf_cas_area.geometry, gdf_cas_reprojected.geometry):
218     if geom_utm.is_empty or not geom_utm.is_valid:
219         fatalities_per_collision.append(0)
220         continue
221
222     centroid = geom_raster.centroid
223     row, col = ~transform * (centroid.x, centroid.y)
224     row, col = int(row), int(col)
225
226     if 0 <= row < people_in_cell.shape[0] and 0 <= col < people_in_cell.shape[1]:
227         population_density_in_cell = people_in_cell[row, col] / pixel_area
228         if population_density_in_cell != nodata and population_density_in_cell >= 0:
229             fatalities = geom_utm.area * population_density_in_cell # geom_utm.area ahora
230             est en m correctamente
231             fatalities_per_collision.append(fatalities)
232         else:
233             fatalities_per_collision.append(0)
234     else:
235         fatalities_per_collision.append(0)
236
237
238 # Resultado final
239 average_fatalities = np.mean(fatalities_per_collision)
240

```

```

241     print(f"Average fatalities per ground crash: {average_fatalities:.3e}")
242     average_fatalities_total.append(average_fatalities)
243
244 average_fatalities_total_final = np.mean(average_fatalities_total)
245 print("RESULTADO FINAL")
246 print(f"Average fatalities for all ground crashes: {average_fatalities_total_final:.3e}")

```

B.1.1. Funciones de apoyo al software de cálculo de decesos medios

```

1  import geopandas as gpd
2  import matplotlib.pyplot as plt
3  from shapely.geometry import Polygon
4  import matplotlib.patches as mpatches
5
6
7
8  from shapely.geometry import Polygon, MultiPolygon
9
10 def gdf2obstacle_list(gdf):
11     """
12     Convierte un GeoDataFrame con geometrías de tipo Polygon o MultiPolygon
13     en una lista válida para usar como OS.obstacles en CASEX.
14
15     Parámetros:
16         gdf : geopandas.GeoDataFrame
17             GeoDataFrame que contiene las geometrías de los edificios
18
19     Retorna:
20         lista : lista de objetos shapely.geometry.Polygon
21     """
22     lista = []
23
24     for geom in gdf.geometry:
25         if isinstance(geom, Polygon):
26             lista.append(geom)
27         elif isinstance(geom, MultiPolygon):
28             lista.extend([p for p in geom.geoms])
29         # Si quieres ignorar geoms vacíos o tipos inválidos
30         else:
31             continue
32
33     return lista
34
35
36
37
38 import os
39 import rasterio
40 import geopandas as gpd
41 import numpy as np
42 import matplotlib.pyplot as plt
43 from rasterio.transform import Affine
44 from rasterio.windows import from_bounds
45 from shapely.geometry import box
46 import rasterio
47 import numpy as np
48
49 def pixel_area(raster_path, central_lat=None):
50     """
51     Calcula el área de cada píxel en m² a partir de un raster.
52
53     Parámetros:

```

```

54 raster_path (str): Ruta al archivo raster.
55 lat_central (float, opcional): Latitud central para calculos si el CRS est en grados.
56
57 Retorna:
58 float: area del pixel en m .
59 """
60 with rasterio.open(raster_path) as src:
61     transform = src.transform
62     crs = src.crs
63
64     pixel_width = abs(transform.a)
65     pixel_height = abs(transform.e)
66
67     if crs.is_projected: # CRS en metros (e.g., UTM)
68         return pixel_width * pixel_height
69
70     elif crs.is_geographic: # CRS en grados (e.g., WGS84)
71         if central_lat is None:
72             raise ValueError("Debe proporcionarse lat_central si el CRS est en grados.")
73         R = 6371000 # Radio medio de la Tierra en metros
74         deg2rad = np.pi / 180
75         dlat = pixel_height * deg2rad
76         dlon = pixel_width * deg2rad
77         return (R ** 2) * dlat * dlon * np.cos(central_lat * deg2rad)
78
79     else:
80         raise ValueError("Tipo de CRS no reconocido o no compatible.")

```

B.2. Software de cálculo de frecuencia de colisión y determinación de capacidad

```

1 clc; clear all;
2 while(true)
3     %nmero de tipos de aeronaves que se van a introducir
4     n_clases = input('Cantidad de clases de aeronaves teniendo en cuenta que la ltima que se
        introduzca se considera la aeronave tripulada: \n');
5
6     %%%%%%%%%% Caracteristicas de cada aeronave %%%%%%%%%%%%%%
7     disp('-----')
8     disp('Caracteristicas de cada aeronave: ')
9
10    for i=1:n_clases
11        fprintf('\nDi metro aeronave %d [m]: ', i);
12        g_i(i)=input(' ');
13        fprintf('Altura aeronave %d [m]: ', i);
14        h_i(i)=input(' ');
15        fprintf('Velocidad minima aeronave %d [m]: ', i);
16        v_min_i(i)=input(' ');
17        fprintf('Velocidad maxima aeronave %d [m]: ', i);
18        v_max_i(i)=input(' ');
19        fprintf('Decesos medios por MAC aeronave %d en el area de estudio [m]: ', i)
20        mean_fat(i) = input(' ');
21    end
22
23    %%%%%%%%%% Caracteristicas espacio aereo y densidad de aeronaves %%%%%%%%%%%%%%
24    aircraft_density = input('\nDensidad de aeronaves [1/km^2]: ')/1e4;
25    area = input('\nArea total considerada [km^2]: ')*1e4;
26    altura = input('\nAltura considerada [m]: ');
27
28    %%%%%%%%%% Caracteristicas del mix %%%%%%%%%%%%%%
29    mix = 0;

```

```

30 while(sum(mix)~=100)
31     fprintf('\nIntroduzca el mix (todo tiene que sumar 100): \n');
32     for i=1:n_clases
33         fprintf('Porcentaje de la aeronave %d en el mix: ', i)
34         mix(i) = input(' ');
35         aircraft_percentage(i) = mix(i);
36     end
37 end
38
39
40
41
42 %%%%%%%%%%% Ejemplo de valores %%%%%%%%%%%
43 % aircraft_lon = [0.5, 1, 3, 15]; % Di metros horizontales (m)
44 % aircraft_height = [0.3, 0.5, 1, 8]; % Di metros verticales (m)
45 % v_min_i = [10, 15, 20, 33]; % Velocidades m nimas (m/s)
46 % v_max_i = [15, 20, 28, 40]; % Velocidades m ximas (m/s)
47 % mean_fat = [1.29e-3, 2.91e-3, 5.52e-3, 1.1e-1];
48 % area = 5000 * 5000; % rea en m^2
49 % H = 100; % Altura de vuelo (m)
50 % aircraft_density = linspace(1e-6, 5e-6, 5); % aeronaves por m^2
51 % aircraft_percentage = [80 15 4.9 0.1;
52 % 70 20 9.5 0.5;
53 % 50 30 19 1] / 100;
54 %
55
56
57 %%%%%%%%%%% Constantes %%%%%%%%%%%
58 N_type_of_manned_aircraft = 1;
59 N_type_of_unmanned_aircraft = n_clases-1;
60 TLS_max = 1e-7;
61
62
63 %resumen
64 fprintf(['\n-----', ...
65 '\n-----', ...
66 '\nDatos introducidos:' ...
67 '\n\tCaracter sticas de aeronaves:' ...
68 '\n\t\tDi metros aeronaves: [%s]' ...
69 '\n\t\tAlturas aeronaves: [%s]' ...
70 '\n\t\tVelocidades m nimas aeronaves: [%s]' ...
71 '\n\t\tVelocidades m ximas aeronaves: [%s]' ...
72 '\n\t\tDecesos medios por MAC para cada aeronave en el rea de estudio: [%s]' ...
73 '\n\tCaracter sticas espacio a reo:' ...
74 '\n\t\trea: %.3e' ...
75 '\n\t\tAltura: %d' ...
76 '\n\tDensidad de aeronaves: %.2e' ...
77 '\n\tMix: [%s],' ...
78 '\n\tTLS: %.1e'], join(string(g_i),' '), join(string(h_i),' '), join(string(v_min_i),'
'), join(string(v_max_i),' '), join(string(mean_fat),' '),
area, altura, aircraft_density, join(string(aircraft_percentage),' '), TLS_max)
79
80 %%%%%%%%%%% C lculo de colisiones por hora %%%%%%%%%%%
81 % UAVs (end-1 tipos)
82 idx_UAV = 1:N_type_of_unmanned_aircraft;
83
84
85 %n mero aeronaves total
86 N_i = aircraft_percentage * aircraft_density * area;
87 %frecuencia total
88 lambda_total = lambda_UAS_MAC(N_i, g_i, h_i, v_min_i, v_max_i, area, altura);
89
90 %frecuencia uav-tripulado
91 lambda_cross = lambda_cross_interaction( ...

```

```

92     N_i(idx_UAV), g_i(idx_UAV), h_i(idx_UAV), v_min_i(idx_UAV), v_max_i(idx_UAV), ...
93     N_i(idx_manned), g_i(idx_manned), h_i(idx_manned), v_min_i(idx_manned),
    v_max_i(idx_manned), ...
94     area, altura);
95
96     pmac_gr = lambda_total/sum(N_i); %[mac/fh / aeronave] = [mac/(fh aeronave)]
97     pmac_air = lambda_cross/sum(N_i); %[mac/fh / aeronave] = [mac/(fh aeronave)]
98     mean_fat_mac = 2*sum(aircraft_percentage.*mean_fat); %[fat/mac]
99     lambda_max = tls_gr/mean_fat_mac; %[fat/fh / fat/mac] = [mac/fh]
100    cap_gr = lambda_max/pmac_gr; %[mac/fh / mac/(fh aeronave)] = [aeronave]
101    cap_air = tls_air/pmac_air; %[mac/fh / mac/(fh aeronave)] = [aeronave]
102
103    fprintf('Frecuencia de MACs\n')
104    fprintf('N mero de MACs total = %.2e [1/FH]\n', lambda_total);
105    fprintf('N mero de MACs UAV vs tripulado = %.2e [1/FH]\n', lambda_cross);
106    fprintf('\nRIESGO EN TIERRA\n')
107    fprintf('Media de decesos/MAC = %.2e [fat/mac]\n', mean_fat_mac')
108    fprintf('Frecuencia m xima de MAC = %.2e [fat/FH]\n', lambda_max')
109    fprintf('Pmac_gr = %d
    [mac/(fh aeronaves)]\n',pmac_gr')
110    fprintf('Capacidad m xima Riesgo Tierra [%.1e] tipo %d = %d
    [aeronaves]\n',cap_gr')
111    fprintf('\nRIESGO EN AIRE\n')
112    fprintf('Pmac_air [%.1e] tipo %d = %d
    [mac/(fh aeronaves)]\n',pmac_air')
113    fprintf('Capacidad m xima Riesgo Aire [%.1e] tipo %d = %d
    [mac/(fh aeronaves)]\n',cap_air')
114
115    fprintf('-----\n');
116
117    input('Presione Enter para volver a empezar')
118 end

```

B.2.1. Funciones de apoyo al software de cálculo de colisiones y capacidad máxima

```

1 function lambda = lambda_UAS_MAC(N_i, g_i, h_i, v_min_i, v_max_i, A, H)
2 % N_i : Vector [N1, N2, ..., NM]
3 % g_i, h_i : Radios de protecci n horizontales y verticales [m]
4 % v_min/max_i : Velocidades m nimas/m ximas [m/s]
5 % A : rea [m ]
6 % H : Altura [m]
7
8 M = length(N_i);
9 N_total = sum(N_i);
10 %disp(N_i)
11 %disp(N_total)
12
13 % Calcular matriz de velocidades relativas esperadas
14 E_v = zeros(M, M);
15 for i = 1:M
16     for j = 1:M
17         E_v(i, j) = expected_relative_velocity(v_min_i(i), v_max_i(i), v_min_i(j), v_max_i(j));
18     end
19 end
20 %disp(E_v)
21
22 % Calcular lambda
23 total_sum = 0;
24 for i = 1:M
25     sum_1 = 0;
26     sum_2 = 0;
27     for j = 1:M

```

```

28         sum_1 = sum_1 + (g_i(i) + g_i(j)) * E_v(i, j) * N_i(j);
29         sum_2 = sum_2 + N_i(j) * (h_i(i) + h_i(j));
30     end
31     total_sum = total_sum + N_i(i) * sum_1 * sum_2;
32 end
33
34 % lambda en [1/s]
35 lambda = (1 / (2 * A * N_total^2 * H)) * total_sum;
36
37 % Convertir a [1/h]
38 lambda = lambda * 3600;
39 end
40
41
42 function lambda = lambda_cross_interaction(N_i, g_i, h_i, v_min_i, v_max_i, ...
43                                         N_j, g_j, h_j, v_min_j, v_max_j, A, H)
44     M_i = length(N_i);
45     M_j = length(N_j);
46     N_total = sum(N_i) + sum(N_j);
47
48     %calculo velocidad esperada
49     E_v = zeros(M_i, M_j);
50     for i = 1:M_i
51         for j = 1:M_j
52             E_v(i, j) = expected_relative_velocity(v_min_i(i), v_max_i(i), v_min_j(j), v_max_j(j));
53         end
54     end
55
56     %calculo sumatorio de frecuencia de colisi n por hora de vuelo
57     total_sum = 0;
58     for i = 1:M_i
59         term1=0;
60         term2=0;
61         for j = 1:M_j
62             term1 = term1 + (g_i(i) + g_j(j)) * E_v(i,j) * N_j(j);
63             term2 = term2 + N_j(j) * (h_i(i) + h_j(j));
64         end
65         total_sum = total_sum + N_i(i) * term1 * term2;
66     end
67
68     %inclusi n de denominador y pasar de 1/seg a 1/h
69     lambda = (1 / (2 * A * N_total^2 * H)) * total_sum;
70     lambda = lambda * 3600;
71 end
72
73
74 function E_v_ij = expected_relative_velocity(vmin_i, vmax_i, vmin_j, vmax_j)
75     % Calcula el valor esperado de la velocidad relativa entre dos UAVs
76     % que se desplazan con velocidades distribuidas uniformemente en [vmin, vmax]
77     % Velocidades deben estar en m/s
78
79     % Caso especial: velocidades constantes
80     if vmin_i == vmax_i && vmin_j == vmax_j
81         E_v_ij = sqrt(vmin_i^2 + vmin_j^2);
82         return;
83     end
84
85     % Dominio de integraci n
86     n = 50;
87     v_i = linspace(vmin_i, vmax_i, n);
88     v_j = linspace(vmin_j, vmax_j, n);
89     theta = linspace(0, 2*pi, n);
90
91     [V_i, V_j, Theta] = ndgrid(v_i, v_j, theta);

```

```

92     integrand = sqrt(V_i.^2 + V_j.^2 - 2 .* V_i .* V_j .* cos(Theta));
93
94     % Diferenciales (m/s y radianes)
95     dv_i = (vmax_i - vmin_i) / (n - 1);
96     dv_j = (vmax_j - vmin_j) / (n - 1);
97     dtheta = (2 * pi) / (n - 1);
98
99     % Integral triple sobre velocidad y direcci n
100     E_v_ij = (1 / ((vmax_i - vmin_i) * (vmax_j - vmin_j) * 2 * pi)) * ...
101         sum(integrand(:)) * dv_i * dv_j * dtheta;
102 end

```

C. Manual de usuario

C.1. Introducción al software

C.1.1. Objetivo del software

Este software tiene como objetivo, por una parte, el cálculo del número de decesos provocados por un MAC para cada tipo de aeronave y, por otra, utilizando esta información, obtener la frecuencia de colisión por hora de vuelo para una densidad de aeronaves y una proporción de cada tipo de ellas concretas. Con esta información se calculará, finalmente, la capacidad máxima permitida para el espacio aéreo para las características definidas.

C.1.2. Requisitos

Para poder usar el software se requiere tener instalado:

- Archivos que contienen el software.
- Python.
- MATLAB.
- Archivos .csv con trayectorias simuladas.
- Archivos vectoriales de densidad de población y superficie construida del área específica.
- Librerías de la Tabla 13
- Cualquier sistema operativo que pueda ejecutar MATLAB y Python es válido para el uso de este software.

Librerías necesarias
casex
math
pandas
numpy
os
descartes
shapely
rasterio
geopandas
pyproj

Tabla 13: Librerías necesarias para la ejecución del software

Se deben tener conocimientos básicos de:

- Consola del sistema.
- Consola de MATLAB.

C.2. Descripción del funcionamiento

El software está compuesto por dos archivos main que se ejecutan por separado.

C.2.1. Software para el cálculo de decesos por MAC

En este primer archivo se solicita la entrada de los siguientes datos:

- Envergadura de la aeronave.
- Altura de la aeronave.
- Masa de la aeronave.
- URL a la carpeta con las trayectorias.
- URL al archivo que contiene el mapa vectorial de la distribución de la densidad de población del área de interés.
- URL al archivo que contiene el mapa vectorial de la distribución de la superficie construida del área de interés.

A no ser que se especifique, los valores se deben introducir en unidades del SI.

Con esta información se aplica el riesgo en tierra, ya explicado en el documento, y se obtiene el número de decesos por MAC para la aeronave especificada en el área definida.

Muestra por pantalla el área crítica media de cada archivo, el número de decesos medio por cada archivo y el número de decesos total.

C.2.2. Software para el cálculo de la frecuencia de MAC y la capacidad máxima permitida

Se ejecuta el programa pulsando ‘Run’ en la interfaz de MATLAB.

A continuación, en la terminal de MATLAB se solicita la entrada de los siguientes datos por orden:

1. ‘Número de tipos de aeronaves que conforman la flota’. Se debe especificar un número entero de clases de aeronaves que se va a introducir.

2. Envergadura de la aeronave. Se introduce este valor para una de las aeronaves.
3. Altura de la aeronave. Se introduce este valor para una de las aeronaves.
4. Velocidad mínima de cada aeronave. Se introduce este valor para una de las aeronaves.
5. Velocidad máxima de cada aeronave. Se introduce este valor para una de las aeronaves.
6. Decesos medios por MAC de cada aeronave. Se introduce este valor para una de las aeronaves.
7. Se repiten los pasos anteriores tantas veces como el número de aeronaves se ha especificado.
8. Densidad de aeronaves [$1/km^2$]. Introducir el número de aeronaves por km^2
9. Área total considerada [km^2]. Introducir este valor en km^2 .
10. Altura considerada. Introducir este valor.
11. Porcentaje de cada clase de aeronave. Introducir este valor para una de las aeronaves.
12. Repetir el paso anterior tantas veces como clases de aeronaves se hay especificado que hay.

A no ser que se especifique, los valores se deben introducir en unidades del SI.

Se muestra a continuación un resumen de los datos introducidos.

Con esta información, calcula el número de aeronaves total y de UAVs y aeronaves tripuladas mediante las funciones `lambda_UAS_MAC.m` y `lambda_cross_interaction.m`, que a su vez requieren de la función `expected_relative_velocity.m`, se calcula y se muestran por pantalla los siguientes valores:

- Número de MACs total.
- Número de MACs UAV vs tripulado.
- Media de decesos/MAC por mix.
- Frecuencia máxima de MAC.
- Capacidad máxima de volumen.
- Número de MACs total.
- Número de MACs UAV vs tripulado.

C.3. Ejemplo completo de uso

C.3.1. Ejemplo de uso para el software para el cálculo de decesos por MAC

```

1 Inserta tipo de aeronave (fixed o rotory): fixed
2 Inserta anchura de la aeronave: 1
3 Inserta masa de la aeronave: 50
4 Inserta rea frontal de la aeronave: 0.3
5 Inserta la latitud m nima: 38.54
6 Inserta la latitud m xima: 38.55
7 Inserta la longitud m nima: -0.14
8 Inserta la longitud m xima: -0.1
9 Inserta la URL al mapa de poblacion: r"C:\Users\pablo\Desktop\Benidorm_GHS_Population.tif"
10 Inserta la URL al mapa de superficie construida:
    r"C:\Users\pablo\Desktop\Distribucion_Edificios_Benidorm_Shapefile.geojson"
    ----- UAV Parametres -----
11 UAV mass: 50 kg
12 UAV wingspan: 1 m
13 UAV frontal area: 0.3 m^2
14 UAV friction coefficient: 0.7
15 ----- AREA OF STUDY -----
16 Max Latitude: 38.55
17 Min Latitude: 38.54
18 Max Longitude: -0.1
19 Min Longitude: -0.14
20 Average Population Density: 0.0022425762119064013 persons/m^2
21 ----- ANALYSIS START -----
22 Inserta la URL a la carpeta de trayectorias: r'C:\Users\pablo\Desktop\Trayectorias'
23 File on study: Aleatorio_1.csv
24 Average CA without obstacles: 1.0219557751847541 m
25 Average fatalities per ground crash: 8.938e-04
26
27 File on study: Aleatorio_10.csv
28 Average CA without obstacles: 1.810443382381937 m
29 Average fatalities per ground crash: 1.508e-03
30
31 File on study: Aleatorio_100.csv
32 Average CA without obstacles: 1.8030213290778399 m
33 Average fatalities per ground crash: 1.760e-03
34
35 File on study: Aleatorio_101.csv
36 Average CA without obstacles: 1.0201375659212593 m
37 Average fatalities per ground crash: 9.798e-04
38
39 File on study: Aleatorio_102.csv
40 Average CA without obstacles: 1.9481965541763682 m
41 Average fatalities per ground crash: 2.112e-03
42
43 File on study: Aleatorio_103.csv
44 Average CA without obstacles: 1.0405822139422025 m
45 Average fatalities per ground crash: 8.371e-04
46
47 File on study: Aleatorio_104.csv
48 Average CA without obstacles: 1.02449020959963 m
49 Average fatalities per ground crash: 8.320e-04
50
51 File on study: Aleatorio_105.csv
52 Average CA without obstacles: 2.051524280616846 m
53 Average fatalities per ground crash: 1.917e-03
54
55 File on study: Aleatorio_106.csv
56 Average CA without obstacles: 2.122725335950819 m
57 Average fatalities per ground crash: 1.629e-03
58
59 File on study: Aleatorio_107.csv
60 Average CA without obstacles: 1.8776463356120328 m
61 Average fatalities per ground crash: 1.780e-03
62

```

```

63 File on study: Aleatorio_108.csv
64 Average CA without obstacles: 1.049968505800763 m
65 Average fatalities per ground crash: 8.188e-04
66
67 File on study: Aleatorio_109.csv
68 Average CA without obstacles: 2.0196881693050206 m
69 Average fatalities per ground crash: 1.636e-03
70
71 File on study: Aleatorio_11.csv
72 Average CA without obstacles: 2.0930301630484403 m
73 Average fatalities per ground crash: 2.059e-03
74
75 File on study: Aleatorio_110.csv
76 Average CA without obstacles: 1.919753667039708 m
77 Average fatalities per ground crash: 1.803e-03
78
79 File on study: Aleatorio_111.csv
80 Average CA without obstacles: 1.0207032864927508 m
81 Average fatalities per ground crash: 7.833e-04
82
83 File on study: Aleatorio_112.csv
84 Average CA without obstacles: 1.0169366533177635 m
85 Average fatalities per ground crash: 9.733e-04
86
87 File on study: Aleatorio_113.csv
88 Average CA without obstacles: 2.356650383658593 m
89 Average fatalities per ground crash: 1.891e-03
90
91 File on study: Aleatorio_114.csv
92 Average CA without obstacles: 1.0786878684980947 m
93 Average fatalities per ground crash: 9.410e-04
94
95 File on study: Aleatorio_115.csv
96 Average CA without obstacles: 1.1625848935710763 m
97 Average fatalities per ground crash: 8.459e-04
98
99 File on study: Aleatorio_116.csv
100 Average CA without obstacles: 1.7908344677498134 m
101 Average fatalities per ground crash: 1.548e-03
102
103 File on study: Aleatorio_117.csv
104 Average CA without obstacles: 1.024524640158719 m
105 Average fatalities per ground crash: 9.395e-04
106
107 File on study: Aleatorio_118.csv
108 Average CA without obstacles: 1.4301205933390952 m
109 Average fatalities per ground crash: 1.403e-03
110
111 File on study: Aleatorio_119.csv
112 Average CA without obstacles: 1.9478907511487034 m
113 Average fatalities per ground crash: 1.856e-03
114
115 File on study: Aleatorio_12.csv
116 Average CA without obstacles: 2.0948118393401804 m
117 Average fatalities per ground crash: 1.956e-03
118
119 File on study: Aleatorio_120.csv
120 Average CA without obstacles: 1.017610565849469 m
121 Average fatalities per ground crash: 8.980e-04
122
123 File on study: Aleatorio_121.csv
124 Average CA without obstacles: 2.037360961254909 m
125 Average fatalities per ground crash: 1.930e-03
126

```

```

127 File on study: Aleatorio_122.csv
128 Average CA without obstacles: 2.0388324501594894 m
129 Average fatalities per ground crash: 1.530e-03
130
131 File on study: Aleatorio_123.csv
132 Average CA without obstacles: 1.7450291403461407 m
133 Average fatalities per ground crash: 1.560e-03
134
135 File on study: Aleatorio_124.csv
136 Average CA without obstacles: 1.0163305504491813 m
137 Average fatalities per ground crash: 8.128e-04
138
139 File on study: Aleatorio_125.csv
140 Average CA without obstacles: 2.1635168832359843 m
141 Average fatalities per ground crash: 2.057e-03
142 RESULTADO FINAL
143 Average fatalities for all ground crashes: 1.416e-03

```

C.3.2. Ejemplo de uso para software para el cálculo de la frecuencia de MAC y la capacidad máxima permitida

Se muestra a continuación la consola con las peticiones y respuestas para un caso concreto de ejemplo. Se representa en **negrita** las entradas.

```

1  Cantidad de clases de aeronaves teniendo en cuenta que la ltima que se introduzca se
   considera la aeronave tripulada:
2
3  \textbf{4}
4
5  -----
6
7  Caracter sticas de cada aeronave:
8
9  Di metro aeronave 1 [m]:  0.5
10
11 Altura aeronave 1 [m]:  0.3
12
13 Velocidad m nima aeronave 1 [m]: 10
14
15 Velocidad m xima aeronave 1 [m]: 15
16
17 Decesos medios por MAC aeronave 1 en el rea de estudio [m]: 1.29e-3
18
19 Di metro aeronave 2 [m]: 1
20
21 Altura aeronave 2 [m]: 0.5
22
23 Velocidad m nima aeronave 2 [m]: 15
24
25 Velocidad m xima aeronave 2 [m]: 20
26
27 Decesos medios por MAC aeronave 2 en el rea de estudio [m]: 2.91e-3
28
29 Di metro aeronave 3 [m]:  3
30
31 Altura aeronave 3 [m]: 1
32
33 Velocidad m nima aeronave 3 [m]: 20
34
35 Velocidad m xima aeronave 3 [m]: 28

```

```

36
37 Decesos medios por MAC aeronave 3 en el rea de estudio [m]: 5.52e-3
38
39 Di metro aeronave 4 [m]: 15
40
41 Altura aeronave 4 [m]: 8
42
43 Velocidad m nima aeronave 4 [m]: 33
44
45 Velocidad m xima aeronave 4 [m]: 40
46
47 Decesos medios por MAC aeronave 4 en el rea de estudio [m]: 1.1e-1
48
49 Densidad de aeronaves [1/km^2]: 1
50
51 rea total considerada [km^2]: 25
52
53 Altura considerada [m]: 100
54
55 Introduzca el mix (todo tiene que sumar 100):
56
57 Porcentaje de la aeronave 1 en el mix: 80
58
59 Porcentaje de la aeronave 2 en el mix: 18.5
60
61 Porcentaje de la aeronave 3 en el mix: 1.4
62
63 Porcentaje de la aeronave 4 en el mix: 0.1
64
65 -----
66
67 -----
68
69 Datos introducidos:
70
71 Caracter sticas de aeronaves:
72
73 Di metros aeronaves: [0.5 1 3 15]
74
75 Alturas aeronaves: [0.3 0.5 1 8]
76
77 Velocidades m nimas aeronaves: [10 15 20 33]
78
79 Velocidades m ximas aeronaves: [15 20 28 40]
80
81 Decesos medios por MAC para cada aeronave en el rea de estudio: [0.00129 0.00291 0.00552
0.11]
82
83 Caracter sticas espacio a reo:
84
85 rea : 2.500e+05
86
87 Altura: 100
88
89 Densidad de aeronaves: 1.00e-04
90
91 Mix: [80 20 0 0]
92
93 TL0S: 1.0e-07
94
95 RESULTADOS:
96
97 N mero de MACs total = 2.85e+00 [1/FH]
98

```

```

99 N mero de MACs UAV vs tripulado      = 0.00e+00 [1/FH]
100
101 Media de decesos/MAC por mix          = 3.23e-01 [fat/mac]
102
103 Frecuencia m xima de MAC              = 3.10e-07 [fat/FH]
104
105 Capacidad m xima de volumen           = 2.717188e-04 [aeronaves]
106
107 N mero de MACs total                  = 3.68e+00 [1/FH]
108
109 N mero de MACs UAV vs tripulado      = 5.97e-04 [1/FH]
110
111 -----
112
113 Presione Enter para volver a empezar

```

C.4. Errores comunes

Todo lo que no sea introducir el tipo de valores especificados en este manual es susceptible de provocar errores en el software. Esto es debido a que este software no tiene como finalidad ser comercializado ni utilizado por ninguna agencia oficial, sino que es meramente ilustrativo de la aplicación del modelo propuesto.

D. Presupuesto

El presente presupuesto tiene como finalidad proporcionar una estimación económica aproximada de los recursos empleados para la realización del proyecto. Se considera que, aunque el proyecto se ha desarrollado en un entorno académico, es conveniente cuantificar los costes asociados para evaluar su viabilidad y aproximación al entorno profesional. Para ello se desglosan los elementos de gasto en función de su origen: personal, licencias de software, y recursos materiales.

D.1. Clasificación de costes

- **Costes de personal:** Se ha estimado una dedicación de 360 horas al desarrollo completo del proyecto. Para el cálculo, se ha considerado el salario medio por hora del grupo de investigación en el que se ha desarrollado el TFG, correspondiente a 34,6€/h.
- **Licencias de software:** Se ha empleado el software MATLAB en su versión *Student*, cuyo coste anual asciende a 69€(IVA incluido). Prorrateándolo entre el número de horas laborables en un año (1712h) para el número de horas invertidas en el proyecto, resulta en un coste de 14.5€(IVA incluido).
- **Recursos materiales:** Todo el trabajo se ha realizado en un equipo informático personal, por lo que no se ha imputado ningún coste adicional asociado a hardware, alquiler de espacios, ni adquisición de recursos materiales. Se calcula, por tanto el coste el coste de amortización del equipo, dividiendo las horas laborables invertidas entre las horas laborables de dos años (3424h), lo que resulta en una amortización del 10.5% del coste del ordenador. El coste de este fue de 600€(IVA incluido), con lo cual, el coste de amortización es de 63€(IVA incluido).

D.2. Presupuesto detallado

Concepto	Coste unitario	Coste total	Coste total con IVA
Horas de trabajo (360h)	34,60 €	12 456,00 €	15071,76 €
Licencia MATLAB Student	57,02 €	11,98 €	14,50 €
Coste de amortización	52,06 €	52,06 €	63,00
Total estimado		12 520,01 €	15 148,5 €

Tabla 14: Resumen del presupuesto estimado del proyecto

D.3. Consideraciones finales

El presupuesto aquí reflejado tiene un carácter estimativo, sin que exista facturación real. Los costes recogidos responden a valores medios y públicos, aplicables a un entorno académico y de investigación. La práctica totalidad del proyecto se ha desarrollado de forma autónoma y sin coste de infraestructura externa, salvo por la licencia de software empleada. Por tanto, puede considerarse un presupuesto ajustado y representativo para estudios de carácter técnico desarrollados en el ámbito universitario.

Referencias

- [1] Joint Authorities for Rulemaking of Unmanned Systems. (2024). *JARUS guidelines on Specific Operations Risk Assessment (SORA) – Main Body* (Edition 2.5). <https://jarus-rpas.org/>.
- [2] Joint Authorities for Rulemaking of Unmanned Systems. (2019). *JARUS guidelines on SORA – Annex C: Strategic Mitigation Collision Risk Assessment* (Edition 1.0). <https://jarus-rpas.org/>.
- [3] Joint Authorities for Rulemaking of Unmanned Systems. (2024). *JARUS guidelines on SORA – Annex F: Theoretical Basis for Ground Risk Classification and Mitigation* (Edition 2.5). <https://jarus-rpas.org/>.
- [4] U-AGREE. (2025). *Initial Collision Risk Model D3.3 - Edition 01.00*.
- [5] Google LLC. (2023). *Google Earth* [Software]. Accessed: 2025-10-07 <https://www.google.com/earth/>.
- [6] Endoh, S. (1982). *Aircraft collision models* (Informe No. R82-2). Massachusetts Institute of Technology.
- [7] European Union Aviation Safety Agency. (n.d.). *Drone regulatory system*. EASA. Accessed: 2025-07-07. <https://www.easa.europa.eu/en/domains/drones-air-mobility/drones-air-mobility-landscape/Understanding-European-Drone-Regulations-and-the-Aviation-Regulatory-System>.
- [8] Comisión Europea. (2019). *Reglamento de Ejecución (UE) 2019/947 de la Comisión de 24 de mayo de 2019 relativo a las normas y procedimientos aplicables a la utilización de aeronaves no tripuladas*. Diario Oficial de la Unión Europea.
- [9] Comisión Europea. (2019). *Reglamento Delegado (UE) 2019/945 de la Comisión de 12 de marzo de 2019 sobre los sistemas de aeronaves no tripuladas y los operadores de terceros países de sistemas de aeronaves no tripuladas*. Diario Oficial de la Unión Europea.
- [10] Agencia de la Unión Europea para la Seguridad Aérea (EASA). (2022). *Acceptable Means of Compliance (AMC) and Guidance Material (GM) to Commission Implementing Regulation (EU) 2019/947 – Issue 1*.
- [11] Joint Authorities for Rulemaking of Unmanned Systems. (2024). *JARUS guidelines on SORA – Annex B: Integrity and Assurance Levels for the Mitigations Used to Reduce the Intrinsic Ground Risk Class* (Edition 2.5). <https://jarus-rpas.org/>.
- [12] Joint Authorities for Rulemaking of Unmanned Systems. (2019). *JARUS guidelines on SORA – Annex D: Tactical Mitigation Collision Risk Assessment* (Edition 1.0). <https://jarus-rpas.org/>.
- [13] Joint Authorities for Rulemaking of Unmanned Systems. (2024). *JARUS guidelines on SORA – Annex E: Integrity and Assurance Levels for the Operational Safety Objectives (OSO)* (Edition 2.5). <https://jarus-rpas.org/>.

- [14] Joint Authorities for Rulemaking of Unmanned Systems. (2024). *JARUS guidelines on SORA – Annex A: Guidelines on Collecting and Presenting System and Operation Information for a Specific UAS Operation* (Edition 2.5). <https://jarus-rpas.org/>.
- [15] RTI International. (2003). *Casualty areas for selected risk assessment models* (Informe No. DTRS57-00-C-10078).
- [16] Naval Air Warfare Center Aircraft Division. (2005). *Casualty expectation for aircraft mishaps* (Informe No. NAWCADPAX/S3/5W2110/5-04).
- [17] Joint Authorities for Rulemaking of Unmanned Systems (JARUS). (n.d.). *CASEX documentation*. Accessed: 2025-07-17. <https://casex.readthedocs.io/en/latest/>.
- [18] Janser, P. W. (1982). *Lethality of unprotected persons due to debris and fragments*. Paper presented at the Twentieth Explosives Safety Seminar, 24–26 August, Norfolk, VA, USA.
- [19] Copernicus Emergency Management Service. (n.d.). *Global Human Settlement Layer (GHSL)*. Accessed: 2025-07-17. <https://human-settlement.emergency.copernicus.eu/>.
- [20] EUROCONTROL Experimental Centre. (2003). *Pessimistic sector capacity estimation* (Informe No. EEC Note No. 21/03).
- [21] Federal Aviation Administration. (2022). *Capacity assessment of Advanced Air Mobility (AAM) operations* (Informe No. DOT/FAA/TC-22/32). <https://www.airporttech.tc.faa.gov/DesktopModules/FlexNews/DownloadHandler.ashx?id=3c20ff3e-59f1-49aa-9eae-f6fe7e7b733b&f=DOT-FAA-TC-22-32.pdf>.
- [22] NASA Langley Research Center. (2007). *Safety performance of airborne separation: Preliminary baseline testing* (NASA/TM-2007-214843).
- [23] U-AGREE. (2025). *Initial Concept Outline D2.3 - Edition 01.00*.
- [24] Joint Authorities for Rulemaking of Unmanned Systems. (2015). *Scoping Paper to AMC RPAS.1309 (Issue 2)* (Informe No. JAR-DOC-06). <https://www.jarus-rpas.org/>.
- [25] European Union Aviation Safety Agency. (2024). *Easy Access Rules for U-space, CHAPTER IV: U-SPACE SERVICES*. EASA. Accessed: 2025-07-07. <https://www.easa.europa.eu/en/document-library/easy-access-rules/online-publications/easy-access-rules-u-space?page=8>.