



INSTITUTO DE INTELIGENCIA
DE LAS FUERZAS ARMADAS
“Sarg My D JOSÉ ÁLVAREZ CONDARCO”

UNIVERSIDAD DE LA DEFENSA NACIONAL

INSTITUTO DE INTELIGENCIA

DE LAS FUERZAS ARMADAS

**POSGRADO: “ESPECIALIZACIÓN EN GESTIÓN DE
INFORMACIÓN MILITAR TERRESTRE”**

TRABAJO FINAL INTEGRADOR

**TEMA: EMPLEO DE LAS AERONAVES NO TRIPULADAS PARA
LA DETECCIÓN DE LAS SUSTANCIAS QUÍMICAS, BIOLÓGICAS,
RADIOLÓGICAS Y NUCLEARES EN LOS AÑOS 2012-2022**

AUTOR: TT DANIELA ROCIO GARRO

DIRECTOR: CR (R) Mg AUGUSTO CAYO

AÑO 2023

“Las ideas expresadas sólo representan la postura personal del autor, por lo que son de responsabilidad, no reflejando en consecuencia la opinión del Instituto de Inteligencia de las Fuerzas Armadas y de la Universidad de la Defensa Nacional”

INDICE

1.	Resumen.....	4
2.	Introducción.....	6
2.1.	Planteamiento del Problema.....	7
2.2.	Justificación, alcance y limitaciones.....	8
2.3.	Objetivos.....	10
2.3.1.	Objetivo general.....	10
2.3.2.	Objetivos específicos.....	10
2.4.	Antecedentes y estado actual de la temática.....	11
2.4.1.	Antecedentes Históricos.....	11
2.4.2.	Punto de Inflexión.....	11
2.4.3.	Estado Actual de la Temática.....	12
2.4.4.	Avances en Tecnología de Detección.....	13
2.4.5.	Aplicaciones Operacionales Validadas.....	16
2.4.6.	Normativa y Regulación Internacional.....	16
3.	Capítulo N°1: Marco Teórico.....	18
3.1.	Sustancias QBRN: Definiciones y Características.....	18
3.1.1.	Agentes químicos	18
3.1.2.	Agentes Biológicos.....	19
3.1.3.	Materiales Radiológicos.....	20
3.1.4.	Materiales Nucleares.....	21
3.2.	Aeronaves No Tripuladas: Clasificación y Componentes.....	22
3.2.1.	Clasificación por Peso y Alcance.....	22
3.2.2.	Componentes Principales.....	23
3.3.	Tecnologías de Detección QBRN en Plataformas UAV.....	26
3.3.1.	Detección Radiológica.....	26
3.3.2.	Detección Química.....	27
3.3.3.	Detección Biológica.....	29
3.4.	Aplicaciones Operacionales.....	31
3.4.1.	Mapeo Radiológica Post-Desastre	31
3.4.2.	Vigilancia Química en Operaciones Militares	33

3.4.3. Monitoreo Ambiental Civil	34
3.5. Marco Regulatorio y Legal.....	34
3.5.1. Tratados Internacionales.....	34
3.5.2. Protocolos Militares.....	35
3.5.3. Reguaciones Civiles.....	37
4. Hipótesis.....	38
5. Capítulo N° 2: Metodología y resultados.....	39
5.1. Tipo de Investigación.....	39
5.2. Técnica de Recolección de Datos.....	39
5.3. Fuentes de Información.....	40
5.4. Criterios de Selección de Fuentes	40
5.5. Análisis de Datos.....	41
5.6. Cronograma de Actividades.....	41
6. Capítulo N°3:Casos de Estudios (2012 -2022).....	42
6.1. Fukushima: Mapeo Radiológico Post-Desastre.....	42
6.1.1. Contexto del desastre.....	42
6.1.2. Iniciativa de UAV Radiológico (2012-2020).....	42
6.1.3. Características del Sistema.....	42
6.1.4. Operaciones y Resultados.....	43
6.1.5. Lecciones Aprendidas.....	43
6.2. Siria: Detección de Armas Químicas (2013-2018).....	44
6.2.1. Contexto del Conflicto.....	44
6.2.2. Rol de Sistemas de Detección No Convencionales.....	44
6.2.3. Casos Específicos.....	45
6.2.4. Limitaciones de la Tecnología UAV.....	45
6.2.5. Contribución al Conocimiento.....	45
7. Resultados y Análisis Comparativos	46
7.1. Análisis Comparativo: Métodos Convencionales vs. UAV-QBRN.....	46
7.2. Evaluación de Sistemas Específicos.....	46
7.3. Brecha Tecnológica Identificada.....	47

8.	Conclusiones.....	47
8.1.	Conclusiones Principales.....	47
8.2.	Recomendaciones para las Fuerzas Armadas Argentinas.....	49
8.2.1.	Recomendaciones Inmediatas (Corto Plazo: 2024-2026).....	49
8.2.2.	Recomendaciones de Mediano Plazo (2026-2028).....	49
8.2.3.	Recomendaciones Estratégicas (Largo Plazo: 2028-2035).....	50
8.3.	Áreas de Investigación Futura.....	50
9.	Referencias Bibliográficas.....	51
10.	Anexos.....	53

Índice de Tablas

Tabla 1:	Cronograma de actividades del TFI.	41
Tabla 2:	Comparación de métodos convencionales vs. UAV-QBRN.	46
Tabla 3:	Especificaciones técnicas del sistema OIEA para mapeo radiológico.	55
Tabla 4:	Ataques químicos documentados en Siria	57
Tabla 5:	Modelos de drones y tipos de sensores	58

Índice de Figuras

Figura 1:	Rent a DJI Matrice 600 Pro Hexacopter, Best Prices	12
Figura 2:	RQ-11 Raven Unmanned Aerial Vehicle, United States of America.	13
Figura 3:	UAV Sensor Payloads, proyecto de la UAS Chemical Plume Mapping..	16
Figura 4:	Predator RQ-1 / MQ-1 / MQ-9 Reaper UAV, United States of America.....	23
Figura 5:	Hermes 900 StarLiner MALE Unmanned Aircraft System (UAS), Israel.....	23
Figura 6:	RQ-4 Global Hawk , Air Force, Fact Sheet Display.....	24

1. RESUMEN

Las aeronaves no tripuladas (UAV, por sus siglas en inglés) han revolucionado las capacidades operacionales de las Fuerzas Armadas modernas en las últimas dos décadas. En particular, su aplicación en la detección de sustancias químicas, biológicas, radiológicas y nucleares (QBRN) representa un avance significativo en la protección de efectivos militares y poblaciones civiles. Entre 2012 y 2022, el empleo de UAV equipados con sensores especializados ha demostrado ser una herramienta eficaz tanto en operaciones militares como en respuesta a emergencias nucleares y radiológicas.

Este trabajo de investigación realiza un análisis exhaustivo sobre la evolución tecnológica de las aeronaves no tripuladas, las capacidades de detección QBRN, los casos de estudio más relevantes internacionalmente y propone recomendaciones para la integración de estas capacidades en las Fuerzas Armadas Argentinas. A través de una metodología exploratoria-descriptiva basada en análisis documental, se identifican las ventajas operacionales de los drones QBRN frente a métodos convencionales, sus limitaciones técnicas y el potencial estratégico que representan para la defensa nacional en el contexto de amenazas QBRN emergentes.

Palabras clave: Aeronaves no tripuladas, UAV, drones, detección QBRN, sensores radiológicos, sustancias químicas y biológicas, monitoreo ambiental, tecnología militar, mapeo radiológico, seguridad nacional.

2. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, la tecnología de aeronaves no tripuladas (UAV) ha experimentado un crecimiento exponencial, transformando radicalmente las operaciones militares y civiles a nivel global. La integración de sensores especializados en estas plataformas ha permitido el desarrollo de capacidades nunca antes disponibles para la detección y monitoreo de amenazas químicas, biológicas, radiológicas y nucleares (QBRN).

Históricamente, el monitoreo radiológico después de incidentes nucleares o radiológicos requería que equipos especializados ingresaran en zonas de alto riesgo, exponiendo a los efectivos a dosis significativas de radiación. Sin embargo, con el desarrollo de UAV equipados con detectores de radiación de alta sensibilidad, es posible realizar estas operaciones de forma remota, minimizando riesgos para el personal y mejorando la precisión del mapeo radiológico.

El desastre de Fukushima Daiichi en marzo de 2011 marcó un punto de inflexión en la aplicación operacional de drones para detección QBRN. A partir de ese momento, organizaciones internacionales como el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) han trabajado continuamente en el desarrollo y validación de esta tecnología, con resultados prometedores que han permitido su aplicación práctica en múltiples contextos.

De igual forma, en el contexto de conflictos armados modernos, la detección de armas químicas y biológicas mediante UAV ha representado una ventaja estratégica significativa, permitiendo la vigilancia de zonas contaminadas, la identificación de depósitos de armas prohibidas y la protección de efectivos militares ante amenazas QBRN.

El período 2012-2022 ha sido testigo de avances tecnológicos sin precedentes en sensores miniaturizados, sistemas de procesamiento de datos en tiempo real y plataformas aeronáuticas cada vez más sofisticadas. Este trabajo de investigación analiza el estado del arte de estas tecnologías, su evolución, aplicaciones operacionales concretas y el potencial que representan para las Fuerzas Armadas Argentinas en la protección de la soberanía nacional y la seguridad de la población civil.

2.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Pregunta de Investigación Principal

¿Cuál es el impacto operacional del empleo de aeronaves no tripuladas equipadas con sensores especializados en la detección, identificación y mapeo de sustancias químicas, biológicas, radiológicas y nucleares (QBRN) en escenarios militares y de emergencia durante el período 2012-2022?

Preguntas Secundarias

1. ¿Qué tipos de drones y sistemas de sensores se han empleado en operaciones QBRN reales a nivel internacional?
2. ¿Cuáles son las ventajas comparativas de los UAV frente a métodos convencionales de detección QBRN?
3. ¿Qué limitaciones técnicas y operacionales persisten en los sistemas actuales?
4. ¿De qué manera pueden integrarse estas capacidades en la estructura operacional de las Fuerzas Armadas Argentinas?
5. ¿Cuál es el estado actual de desarrollo tecnológico en detectores y sensores miniaturizados para plataformas UAV?
6. ¿Cuáles son las implicancias estratégicas y doctrinales de la incorporación de capacidades UAV-QBRN?

2.2. JUSTIFICACIÓN, ALCANCE Y LIMITACIONES

Justificación

La selección de este tema se fundamenta en varios elementos de importancia estratégica y operacional:

a) Relevancia Operacional

Las Fuerzas Armadas Argentinas enfrentan una gama creciente de amenazas QBRN, tanto en contextos convencionales como en escenarios de terrorismo transnacional. La incorporación de capacidades UAV-QBRN representa una modernización defensiva estratégica que permite responder eficientemente ante estas amenazas.

b) Vacío de Conocimiento

Existe escasa literatura en español sobre la aplicación operacional específica de UAV en detección QBRN, lo que genera una brecha significativa en el conocimiento disponible para profesionales militares argentinos.

c) Aporte Técnico-Táctico

Este trabajo proporciona un análisis detallado de tecnologías disponibles, capacidades reales comprobadas en campo y recomendaciones concretas para la adquisición e integración de estos sistemas.

d) Impacto en la Defensa Civil

Más allá del ámbito militar, las capacidades UAV-QBRN tienen aplicaciones críticas en la protección civil ante desastres nucleares, accidentes con materiales tóxicos y situaciones de emergencia.

Alcances

- **Temporal:** Análisis del período 2012-2022, enfatizando los desarrollos tecnológicos y casos de aplicación más relevantes de esta década.

- **Geográfico:** Revisión de casos internacionales con especial referencia a ejemplos norteamericanos, europeos y asiáticos, con proyección hacia aplicabilidad en el contexto argentino.
- **Temático:** Enfoque exclusivo en la detección QBRN mediante UAV, excluyendo análisis de armamento autónomo o sistemas de ataque.
- **Metodológico:** Basado en análisis documental, revisión de literatura científica, publicaciones militares y reportes técnicos especializados.

Limitaciones

- **Información clasificada:** Numerosos detalles técnicos de sistemas militares permanecen clasificados, limitando el acceso a especificaciones precisas.
- **Acceso a datos:** Restricciones en el acceso a información operacional de casos militares específicos en contexto de conflictos armados.
- **Evolución tecnológica rápida:** El desarrollo de UAV y sensores es extraordinariamente dinámico, por lo que hallazgos pueden quedar rápidamente obsoletos.
- **Transferencia tecnológica:** Restricciones de exportación de tecnología de defensa avanzada limitan la disponibilidad de sistemas en mercados como el argentino.
- **Alcance de la investigación:** No se realizarán pruebas experimentales propias de sistemas; el análisis se basa exclusivamente en investigación bibliográfica y documental.

2.3 OBJETIVOS

2.3.1 Objetivo General

Es analizar el empleo de aeronaves no tripuladas para la detección de sustancias químicas, biológicas, radiológicas y nucleares durante el período 2012-2022, identificando las capacidades operacionales, limitaciones técnicas y potencial de integración en las Fuerzas Armadas Argentinas.

2.3.2 Objetivos Específicos

1. **Caracterizar** los principales modelos de aeronaves no tripuladas empleadas en operaciones QBRN durante el período de estudio, incluyendo especificaciones técnicas, autonomía, carga útil y sistemas de control.
2. **Identificar y clasificar** las tecnologías de detección QBRN integradas en plataformas UAV, distinguiendo entre sensores químicos, biológicos, radiológicos y nucleares, así como sus fundamentos físicos de funcionamiento.
3. **Analizar** los casos de estudio más relevantes de aplicación operacional de UAV-QBRN a nivel internacional durante 2012-2022, incluyendo Fukushima, operaciones militares en Siria y ejercicios de la OTAN.
4. **Establecer comparaciones** entre métodos de detección convencionales y sistemas basados en UAV, evaluando ventajas operacionales, eficiencia temporal, reducción de riesgo para efectivos y análisis costo-beneficio.
5. **Identificar y evaluar** las limitaciones técnicas, operacionales y regulatorias que afectan el despliegue de sistemas UAV-QBRN.
6. **Proponer recomendaciones** específicas para la adquisición, integración y empleo de capacidades UAV-QBRN en la estructura operacional de las Fuerzas Armadas Argentinas, considerando contextos de conflicto y emergencias civiles.
7. **Establecer líneas futuras de investigación** y desarrollo tecnológico en el campo de la detección QBRN mediante plataformas no tripuladas.

2.4. ANTECEDENTES Y ESTADO ACTUAL DE LA TEMÁTICA

Antecedentes Históricos

2.4.1 Incidentes QBRN Previos al Enfoque UAV

La historia de la detección QBRN está marcada por desastres industriales y nucleares que han impulsado la innovación tecnológica:

- **Chernóbil (1986):** El accidente nuclear más grave de la historia requirió evacuación masiva y exponía a equipos de evaluadores a niveles extremos de radiación. No existían en ese entonces medios no convencionales para el mapeo radiológico seguro.
- **Bhopal (1984):** La fuga química de isocianato de metilo demostró la necesidad urgente de sistemas de detección rápidos en caso de emergencias químicas industriales.
- **Fukushima Daiichi (2011):** Fue el catalizador fundamental que impulsó la investigación en UAV para detección radiológica. El tsunami y terremoto de magnitud 9.1 causaron el colapso del sistema de refrigeración de tres reactores nucleares, obligando a la evaluación de zonas altamente contaminadas sin exposición directa del personal.

2.4.2 Punto de Inflexión: Fukushima y el Desarrollo de UAV-QBRN

Tras el desastre de Fukushima en 2011, el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) y la Agencia de la Energía Atómica de Japón (JAEA) establecieron un programa colaborativo para desarrollar sistemas de monitoreo radiológico mediante aeronaves no tripuladas. Este trabajo conjunto, iniciado en 2012 y extendido hasta 2020 mediante proyectos de cooperación técnica, produjo:

- Instrumentación completa de detección radiológica miniaturizada

- Sistemas de procesamiento y almacenamiento de datos integrados en drones
- Metodologías de mapeo radiológico de alta precisión
- Validación en condiciones reales en la prefectura de Fukushima

2.4.3 Estado Actual de la Temática (2012-2022)

Evolución Tecnológica de Plataformas UAV

Durante el período de estudio, ha habido una diversificación exponencial de plataformas de drones:

a) Drones Comerciales Adaptados

Los Modelos como DJI Matrice 600 Pro, Freefly Systems M600, y Yamaha Fazer demostraron capacidad para llevar cargas útiles especializadas de 5-50 kg, permitiendo integración de detectores QBRN profesionales.



Figura1: Rent a DJI Matrice 600 Pro Hexacopter, Best Prices

b) Drones Tácticos Militares

Los sistemas como el RQ-11 Raven (fuerzas estadounidenses), el Puma (AeroVironment) y equivalentes de otras potencias militares incorporaron progresivamente capacidades QBRN en su suite de sensores.



Figura 2: RQ-11 Raven Unmanned Aerial Vehicle, United States of America

c) Plataformas Especializadas

Algunos fabricantes desarrollaron drones específicamente diseñados para operaciones QBRN, con fuselajes resistentes a contaminación, sistemas de muestreo integrados y comunicaciones redundantes.

2.4.4 Avances en Tecnologías de Detección

Sensores Radiológicos:

- Detectores gamma de centelleo miniaturizados: Cristales como NaI(Tl), CsI o LaBr₃ acoplados a fotodiodos de estado sólido (SiPM), reducen peso y consumo pero mantienen buena sensibilidad para montar el módulo completo (detector + electrónica) en pequeños drones comerciales. Contadores Geiger-Müller de bajo

peso, se usan como “alarmas” robustas y baratas para detectar rápidamente la presencia de radiación antes de activar espectrómetros más complejos

- Espectrómetros gamma portátiles con procesamiento en tiempo real: Unidades como GAMON-Drone o DRONES-G MINI integran detector de centelleo, digitalizador rápido y análisis espectral a bordo, permitiendo identificar isótopos (por ejemplo Cs-137, Co-60) durante el vuelo y generar mapas de dosis geo-referenciados.
- Sistemas de muestreo de partículas radiactivas: Algunos prototipos incorporan filtros de aire o cabezales de muestreo en el dron para capturar aerosoles y polvo radiactivo, que luego se analiza en laboratorio para complementar la medición gamma en tiempo real. (Martin, P. G., Payton, O. D., Fardoulis, J. S., Richards, D. A., & Scott, T. B., 2015)

Sensores Químicos:

- Espectrómetros de masas miniaturizados: Reducciones de tamaño y consumo permiten montar pequeños espectrómetros (a menudo acoplados a cromatografía o a muestreo directo) en UAV para analizar vapores orgánicos, compuestos tóxicos industriales o trazas de agentes químicos. (Tokekar, P., Vander Hook, J., Mulla, D., & Isler, V., 2016)
- Cámaras hiperespectrales: Estas cámaras obtienen imágenes en decenas o cientos de bandas espectrales; cada material tiene una “firma” propia, lo que permite detectar derrames químicos o superficies contaminadas a distancia, sin entrar en la nube tóxica.
- Sensores de iones de movilidad controlada (IMS): Son dispositivos muy sensibles al paso de moléculas ionizadas, capaces de detectar concentraciones muy bajas de ciertos gases; su miniaturización ha permitido integrarlos en drones para patrullar plumas químicas en tiempo casi real. (Van der Wal, L., Van Kollenburg, P., & Henneken, H., 2016).
- Sensores de fotoionización (PID): Son detectores que utilizan radiación ultravioleta para ionizar moléculas orgánicas volátiles en el aire; la corriente

generada es proporcional a la concentración, lo que permite medir en tiempo casi real la presencia de numerosos compuestos tóxicos industriales y vapores orgánicos, aunque no identifican la sustancia exacta sino el nivel global de contaminación. (Li, Y., Wang, S., Zhang, X., & Sun, P., 2021)

Sensores Biológicos:

- Biosensores y muestreadores de aire integrados: Combinan un cabezal de muestreo de bioaerosoles (que aspira aire y deposita partículas en un filtro o medio líquido) con un elemento de reconocimiento biológico (anticuerpos, sondas de ADN, enzimas) y un transductor óptico o electroquímico que genera una señal medible ante la presencia del patógeno. Permiten, en teoría, pasar de “muestras de aire” a “detección casi en tiempo real” en el propio dron. (Yamamoto, N., Bibby, K., Qian, J., Hospodsky, D., Rismani-Yazdi, H., Nazaroff, W. W., & Peccia, J., 2019)

Espectroscopia Raman para identificación de patógenos: Aprovecha que bacterias, esporas y otros microorganismos tienen “huellas” espectrales propias cuando se iluminan con un láser. Los sistemas Raman portátiles, y especialmente los basados en SERS (Surface-Enhanced Raman Scattering), pueden montarse en plataformas UAV para analizar partículas capturadas o superficies contaminadas sin contacto directo. (Ghosh, S., Shinde, S. B., & Banerjee, S. , 2019)

- PCR portátil para detección molecular: Los avances en dispositivos de PCR en tiempo real miniaturizados permiten amplificar ADN/ARN de microorganismos en equipos del tamaño de una caja pequeña, alimentados por baterías. Integrados a un UAV con muestreador de aire, hacen posible recoger el bioaerosol, extraer el material genético y obtener un resultado positivo/negativo en decenas de minutos, en lugar de horas o días en laboratorio. (Schmoldt, S., & Zimmermann, S., 2019)
- Sistemas de muestreo de polvo y partículas: incluyen filtros montados en el dron, impactadores o impingers (como el sistema DAPSI) que colectan partículas en solución líquida. Tras el vuelo, estos filtros o líquidos se analizan por cultivo, microscopía, qPCR o secuenciación, proporcionando un mapa espacial de la distribución de bioaerosoles (hongos, bacterias, virus) en la zona explorada.

2.4.5 Aplicaciones Operacionales Validadas

El período 2012-2022 vio la validación operacional de UAV-QBRN en múltiples contextos:

- **Monitoreo post-desastre (Fukushima):** Mapeo radiológico de 600+ hectáreas
- **Vigilancia ambiental:** Detección de contaminantes en aire, agua y suelo
- **Operaciones militares:** Reconocimiento de zonas presuntamente contaminadas
- **Respuesta ante emergencias civiles:** Evaluación inicial de escenarios de riesgo QBRN.

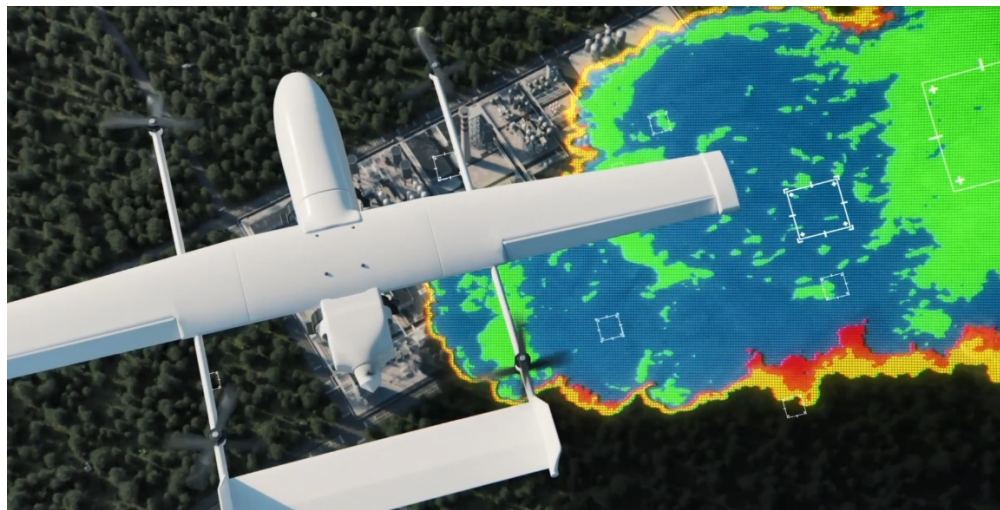


Figura 3: UAV Sensor Payloads, proyecto de la UAS Chemical Plume Mapping.
Fuente disponible en: <https://www.cttso.gov/Projects/CBRNE/New/UASChemicalPlumeMapping.html>

2.4.6 Normativa y Regulación Internacional

Durante este período emergió un marco regulatorio internacional:

- **OIEA (Organismo Internacional de Energía Atómica):** No solamente publicó “guías generales de seguridad, sino que desarrolló y probó una metodología completa de monitoreo radiológico con UAV tras Fukushima”(International Atomic Energy Agency, 2021), (instrumentación, software, calibración, procedimientos y formación de personal).

Hoy ofrece a los Estados Miembros documentos técnicos y específicos sobre “uso de UAS para vigilancia radiológica”, donde se recomiendan requisitos mínimos

de los sensores, patrones de vuelo tipo barrido, validación de mapas de dosis y criterios para usar drones en emergencias sin exponer a brigadas en tierra.

- **OTAN:** Los UAV se insertan dentro de la doctrina CBRN general, sobre todo en las publicaciones AJP-3.8 y ATP-3.8.1 y documentos recientes sobre el rol de vehículos no tripulados en defensa CBRN.

Estos documentos indican que los UAV con sensores CBRN se emplean para reconocimiento de la “hot zone”, delimitando las áreas contaminadas, toma de muestras a distancia y apoyo a la predicción de plumas, integrando sus datos en los sistemas de mando y control (C2) de la fuerza. (NATO, 2019, NATO 2022)

- **Tratado de No Proliferación Nuclear (TNP):** Sigue siendo el marco jurídico central para limitar la proliferación de armas nucleares y garantizar el uso exclusivamente pacífico de la energía nuclear, mediante salvaguardias de verificación aplicadas por el OIEA.

Los UAV aparecen como herramienta emergente dentro de las aplicaciones de “nuclear safeguards”, donde se estudia su uso para inspecciones visuales de instalaciones, vigilancia de áreas amplias alrededor de centrales o depósitos y apoyo al mapeo radiológico en sitios contaminados o de difícil acceso, complementando las inspecciones en situaciones tradicionales. (Pacific Northwest National Laboratory, 2015)

- **Regulaciones civiles nacionales:** En paralelo, muchos países han creado marcos específicos para operaciones de drones (registro, identificación remota, alturas máximas, BVLOS, etc.), que condicionan cómo se puede emplear un UAV con sensores QBRN sobre zonas pobladas o infraestructuras críticas. (Autoridad Regulatoria Nuclear, 2022, U.S. Nuclear Regulatory Commission, 2025).

En el caso argentino, estas normas de aviación civil y de uso del espacio aéreo deben armonizarse con la normativa nuclear y de protección civil, de modo que los vuelos QBRN con drones sobre centrales, ciudades o áreas restringidas se hagan con autorización, planes de vuelo aprobados, coordinación con la autoridad aeronáutica y medidas especiales de ciberseguridad e identificación remota del dron.

3. Capítulo N°1: Marco Teórico

3.1 Sustancias QBRN: Definiciones y Características

3.1.1 Agentes Químicos

Los agentes químicos militares son sustancias tóxicas sintéticas diseñadas o producidas específicamente para causar daño letal o incapacitante al personal. Se clasifican en varias categorías según su mecanismo de acción:

a) Agentes Nerviosos

Inhibidores de la acetilcolinesterasa, una enzima que se encuentra en la unión neuromuscular y cuya función normal es degradar rápidamente el neurotransmisor acetilcolina para que el músculo pueda relajarse después de cada impulso nervioso, al bloquear esta enzima, los agentes nerviosos provocan acumulación de acetilcolina, la estimulación continua de los receptores y, como consecuencia, contracciones mantenidas, parálisis muscular y muerte por asfixias. Ejemplos: Tabun (GA), Sarín (GB), Somán (GD), VX.

b) Agentes Vesicantes (Mostazas)

Producen ampollas y quemaduras químicas profundas en piel y membranas mucosas, y en exposiciones significativas también dañan la tráquea y los bronquios, generando bronquitis crónica y fibrosis pulmonar en sobrevivientes de ataques con gas mostaza. (Iperita).

c) Agentes Asfixiantes

Causan daño pulmonar y edema pulmonar al destruir la barrera alveolo-capilar, generando inicialmente tos y sensación de ahogo, y en dosis altas edema pulmonar agudo mortal horas después de la exposición. Ejemplo: Cloro (Cl_2), Fosgeno ($COCl_2$).

3.1.2 Agentes Biológicos

Los Microorganismos patógenos, toxinas biológicas o sus derivados utilizados como armas biológicas:

a) Bacterianos (Ántrax, Peste, Tularemia)

- *Bacillus anthracis* (ántrax): Es un bacilo formador de esporas muy resistente, clasificado como agente de categoría A por su capacidad de producir altas tasas de mortalidad si se aerosoliza; la forma inhalatoria causa un cuadro inicial parecido a una gripe seguido de insuficiencia respiratoria, choque y mortalidad elevada sin tratamiento. (Gage, K. L., & Kosoy, M. Y., 2005)
- *Yersinia pestis* (peste): Es un cocobacilo que en su forma neumónica puede transmitirse entre personas por aerosoles, con fiebre alta, neumonía hemorrágica y muerte rápida si no se administra antibiótico precoz. (Peters, C. J., & Hartley, D. M., 2002)
- *Francisella tularensis* (tularemia): Es una bacteria muy infecciosa (basta una inoculación o inhalación de pocas decenas de organismos), produce fiebre, adenopatías y, en su forma neumónica, neumonía grave; se considera también agente potencial de bioterrorismo.

b) Virales (Viruela, Virus de la Fiebre de Marburgo, Virus del Ébola)

- *Variola virus* (viruela): En un Poxvirus humano erradicado en 1980, pero clasificado como agente de bioterrorismo de categoría A por su alta transmisibilidad persona a persona, elevada mortalidad histórica y ausencia de inmunidad en gran parte de la población actual.
- *Virus de la Fiebre de Marburgo* y *virus de Ébola*: Es un Filovirus causantes de fiebres hemorrágicas graves, con inicio brusco de fiebre, malestar y diarrea, seguidos de hemorragias y fallo multiorgánico; se consideran agentes potenciales de guerra biológica por su alta letalidad y posibilidad de transmisión por aerosoles en escenarios deliberados.

c) Toxinas (Toxina botulínica, ricina, toxina de ricino)

- Toxina botulínica: La neurotoxina producida por *Clostridium botulinum*, una de las sustancias más letales conocidas; bloquea la liberación de acetilcolina en la unión neuromuscular y provoca parálisis flácida progresiva que puede culminar en fallo respiratorio, motivo por el cual está incluida entre los agentes de bioterrorismo de categoría A.(Tonat, K., 2001).
- Ricina (toxina de ricino): Es una toxina proteica obtenida de las semillas de *Ricinus communis*; inhibe la síntesis proteica intracelular, causando daño multiorgánico. Ha sido usada o intentada usar en varios incidentes terroristas y está regulada como sustancia de alta peligrosidad en los regímenes CBRN.

3.1.3 Materiales Radiológicos

Sustancias radiactivas naturales o artificiales que emiten radiación ionizante:

a) Tipos de Radiación

- Radiación alfa (α): Son núcleos de helio formados por dos protones y dos neutrones; tienen mucha masa y carga positiva, por lo que recorren distancias muy cortas y se detienen con una hoja de papel o la capa superficial de la piel, pero son muy dañinas si el emisor alfa se inhala o ingiere
- Radiación beta (β): Son electrones (β^-) o positrones (β^+) de alta energía emitidos desde el núcleo; penetran unos milímetros en tejidos y pueden atravesar algunos milímetros de metal o plástico, representando riesgo cutáneo y de cristalino.
- Radiación gamma (γ): Son fotones de muy alta energía emitidos desde el núcleo; no tienen masa ni carga, poseen gran capacidad de penetración y requieren blindajes de plomo u hormigón para reducir la dosis.
- Radiación de neutrones: Son neutrones libres generados principalmente en procesos de fisión o en fuentes especiales; tienen gran poder de penetración y pueden activar otros materiales, produciendo nuevos radionúclidos por captura neutrónica. (U.S. Nuclear Regulatory Commission., 2020)

b) Isótopos Relevantes

- Cobalto-60: Usado en medicina e industria, emisor gamma de alta energía con vida media de 5,27 años; ampliamente utilizado en radioterapia y esterilización de materiales médicos, pero también presente en fuentes industriales de alto riesgo si se extravían o se manipulan de forma indebida.
- Cesio-137: Isótopo con vida media de unos 30 años; principal responsable de la contaminación a largo plazo tras accidentes como Chernóbil y Fukushima, muy móvil en el ambiente y con aplicaciones médicas e industriales que lo convierten en una fuente de preocupación para dispositivos de dispersión radiológica.
- Iodo-131: Emisor beta/gamma de vida media corta (~8 días), se acumula preferentemente en la glándula tiroides y fue uno de los radionúclidos más importantes en los primeros meses tras Chernóbil y Fukushima; en medicina se emplea para diagnóstico y tratamiento de enfermedades tiroideas.
- Estroncio-90: Emisor beta puro con vida media de 28–29 años; químicamente se comporta como el calcio, por lo que se incorpora a huesos y dientes, generando riesgo de efectos a largo plazo como cáncer óseo y leucemias.

3.1.4 Materiales Nucleares

Materiales fisionables capaces de sostener una reacción nuclear en cadena por lo tanto de interés tanto para la producción de energía como para armas nucleares:

a) Uranio Enriquecido

El uranio natural contiene solo $\approx 0,7\%$ de U-235, por lo que debe enriquecerse para la mayoría de los usos.

- Bajo enriquecimiento (LEU): Hasta 20% de U-235; típicamente 3–5% para reactores de agua ligera de generación eléctrica como Atucha II o muchos PWR/BWR en el mundo.

- Alto enriquecimiento (HEU): $>20\%$ de U-235; se utiliza en algunos reactores de investigación compactos y es considerado “material de uso directo” para armas nucleares, siendo el grado armamento usualmente $\geq 90\%$ U-235.

b) Plutonio

El plutonio no se encuentra en la naturaleza en cantidades significativas; se produce irradiando U-238 en reactores, donde la captura de neutrones y posteriores desintegraciones originan Pu-239.

El Pu-239 es fisible, tiene vida media de unos 24 000 años y se utiliza tanto como combustible en algunos reactores (MOX) como, especialmente, en los núcleos de la mayoría de las armas nucleares por su menor masa crítica y mayor producción de neutrones por fisión en comparación con el U-235.

3.2 Aeronaves No Tripuladas: Clasificación y Componentes

3.2.1 Clasificación por Peso y Alcance

- **Micro-UAV:** Peso menor de 200 g, alcance típico menor de 1 km y autonomía inferior a 30–60 minutos; se usan para entrenamiento básico, misiones de reconocimiento muy cercano y aplicaciones civiles como fotografía o inspección de interiores.
- **Mini-UAV:** Peso entre 200 g y 5 kg (algunos autores extienden hasta 25–30 kg), alcance de 5–50 km y autonomía menor de 2 horas; se emplean en seguridad pública, agricultura de precisión y misiones tácticas de baja cota para pelotones o compañías.
- **Táctico:** Peso aproximado de 5–50 kg (aunque algunos sistemas tácticos mayores superan los 150 kg), con alcances de 50–200 km y altitudes hasta 5 000–8 000 m; cumplen misiones de reconocimiento de nivel batallón/brigada, corrección de fuegos, vigilancia de convoyes y apoyo a operaciones en profundidad limitada.
- **MALE (Medium Altitude Long Endurance):** Operan entre 5 000 y 15 000 m de altitud, con autonomías de 12–30 horas y alcances superiores a 200 km; se emplean

para inteligencia, vigilancia, adquisición de objetivos y reconocimiento (ISTAR) de teatro, patrulla de fronteras y, en algunos modelos, misiones de ataque de precisión. Ejemplos: MQ-1 Predator, Hermes 900, Bayraktar TB2.



Figura 4: Predator RQ-1 / MQ-1 / MQ-9 Reaper UAV, United States of America



Figura 5: Hermes 900 StarLiner MALE Unmanned Aircraft System (UAS), Israel

- **HALE (High Altitude Long Endurance):** Plataformas de más de 500 kg que vuelan por encima de 15 000–18 000 m, con autonomías superiores a 24–30 horas y capacidades de cobertura continental o transcontinental; su función principal es la vigilancia estratégica e inteligencia de señales (ISR) a gran escala. Ejemplo: RQ-4 Global Hawk, con autonomía superior a 34 horas y techo operativo cercano a 60 000 pies.



Figura 6: RQ-4 Global Hawk , Air Force, Fact Sheet Display

3.2.2. Componentes Principales

a) Plataforma Aérea

- **Configuración multirotor:** Existen con la cantidad de 4, 6 u 8 rotores. Ventajas: Capacidad de vuelo estacionario, despegue/aterrizaje vertical, control preciso.
- **Configuración ala fija:** Son similares a aviones pequeños. Ventajas: Mayor alcance, eficiencia de combustible, velocidad.
- **Configuración VTOL híbrida:** Combinan características de ambas. Ventajas: Flexibilidad operacional.

b) Sistema de Propulsión

- Motores eléctricos con baterías (drones civiles): Ofrecen bajo ruido, menor firma térmica y mantenimiento sencillo; la limitación principal es la autonomía, muy dependiente de la densidad energética de las baterías (normalmente 20–40 min con carga QBRN)
- Motores de combustión interna (drones tácticos de largo alcance): Usan gasolina, diésel o JP-8 y permiten autonomías de varias horas, clave para plataformas tácticas y MALE; requieren más mantenimiento y generan mayor firma acústica e infrarroja.
- Celdas de combustible de hidrógeno (desarrollo emergente): Aumentan significativamente la autonomía (varias horas adicionales) y reducen emisiones, pero todavía presentan desafíos en almacenamiento seguro de hidrógeno y costos.

c) Sistema de Control

- Estaciones de control terrestre (GCS): Consolas donde los operadores planifican la misión, supervisan parámetros de vuelo y reciben vídeo y datos QBRN en tiempo real; pueden ser portátiles (laptop + antena) o montadas en shelters tácticos.
- Comunicaciones por radio redundantes: Enlaces primarios y de respaldo (line-of-sight, satelitales, enlaces cifrados) para garantizar el control del UAV y la transmisión segura de datos incluso en ambientes con interferencias o guerra electrónica.
- Sistemas de navegación inercial (INS) y GPS/GNSS integrado: El INS permite mantener la navegación aun cuando se pierde la señal de satélite; la combinación INS+GNSS es crítica en escenarios QBRN donde puede haber perturbaciones o necesidad de vuelo autónomo.
- Sistemas de autopiloto programable: Controlan automáticamente altura, velocidad y ruta mediante waypoints, liberando carga de trabajo del operador y posibilitando

patrones de vuelo repetibles (por ejemplo, barridos “lawnmower” para mapeo radiológico).

d) Carga Útil (Payload)

En el contexto QBRN, la carga útil incluye:

- Detectores radiológicos
- Sensores químicos
- Sistemas de muestreo
- Cámaras (visible, infrarroja, multiespectral)
- Sistemas de almacenamiento de datos
- Transmisores de datos en tiempo real

3.3 Tecnologías de Detección QBRN en Plataformas UAV

3.3.1 Detección Radiológica

Principios Físicos:

Los detectores radiológicos funcionan mediante la interacción de radiación ionizante con materiales sensibles:

- **Detectores de centelleo:** Cristal (NaI, CsI) emite luz visible cuando absorbe radiación. Fotomultiplicadores convierten esta luz en pulsos eléctricos. Espectrometría gamma permite identificar isótopos.
- **Detectores gaseosos:** Cámara de ionización o contador Geiger. Gas se ioniza con paso de radiación. Voltaje aplicado crea pulso detectable. Versátiles pero menor resolución espectral.
- **Semiconductores:** Detectores HPGe (Germanio hiperpuro) ofrecen excelente resolución espectral pero requieren refrigeración criogénica (limitación en UAV).

Aplicaciones en UAV:

- **Mapeo de dosis en tiempo real con interpolación geoespacial:**

El dron vuela siguiendo un patrón preprogramado (por ejemplo, líneas paralelas a baja altura) y registra en cada punto la tasa de dosis junto con coordenadas GPS y altitud. Con esos datos, el software genera un mapa de calor de la radiación, donde se visualizan claramente las zonas más contaminadas, lo que permite trazar perímetros de seguridad sin exponer a los equipos terrestres.

- **Identificación de isótopos mediante espectroscopia gamma:**

Cuando la carga útil incluye un espectrómetro (NaI(Tl), LaBr₃, CZT, etc.), no solo se ve “cuánta” radiación hay, sino también “de qué tipo”. Analizando el espectro de energías, el sistema puede diferenciar entre, por ejemplo, Cs-137, Co-60 o fuentes médicas extraviadas, algo clave para saber si se trata de un accidente industrial, un residuo de fondo o un posible dispositivo de dispersión radiológica.

- **Localización de fuentes radiactivas puntuales:**

Combinando la intensidad de la señal con la posición del dron, los algoritmos pueden estimar dónde está la fuente y qué magnitud tiene. En la práctica, el operador ve en la pantalla cómo se “enciende” un punto caliente y puede ordenar vuelos adicionales sobre esa zona para refinar la posición, lo que acelera mucho la búsqueda de fuentes perdidas o la verificación de alertas en instalaciones sensibles.

- **Monitoreo de liberación radiactiva post-accidente:**

Tras un incidente en una planta nuclear o en un transporte de material radiactivo, los UAV permiten seguir la evolución de la nube y del depósito en el terreno de forma rápida y repetible. Vuelos sucesivos en las horas y días posteriores muestran si la radiación aumenta, disminuye o se desplaza, información esencial para decidir evacuaciones, restricciones de acceso y prioridades de descontaminación.

3.3.2. Detección Química

Principios Físicos:

- **Espectrometría de masas:** En esencia, estos equipos primero ionizan las moléculas de la muestra y luego las separan según su relación masa-carga en un analizador. Eso permite saber “quién está ahí” (identidad del compuesto) y, en muchos casos, cuánto hay (cuantificación). Hoy existen espectrómetros portátiles, del tamaño de un maletín, capaces de identificar vapores de agentes de guerra química y tóxicos industriales en cuestión de minutos, lo que los hace compatibles con su uso a bordo de UAV como plataforma de muestreo cercano (908 Devices, 2025; Wilk et al., 2024).
- **Cámaras hiperspectrales:** Aquí la lógica es distinta: en lugar de “aspirar” la muestra, la cámara observa la escena a distancia en decenas o cientos de bandas espectrales. Cada sustancia refleja o emite la radiación de una forma ligeramente distinta, como una huella digital espectral. Los algoritmos comparan la firma de cada píxel con bibliotecas conocidas y, si encuentran coincidencias, pueden dibujar en el mapa por dónde se está moviendo una pluma química, sin que el dron tenga que entrar físicamente en la nube (Cicone et al., 2016; Manolakis et al., 2008).
- **Cromatografía líquida/gaseosa portátil:** En este caso, la idea es separar primero la mezcla en sus distintos componentes y recién después detectarlos. Pequeños sistemas de GC-MS o LC-MS portátiles pueden ir montados en drones grandes o usarse en tierra como complemento: el UAV hace el muestreo de aire con micro-trampas o fibras SPME, y luego ese cartucho se analiza en un equipo portátil cerca del lugar del incidente. Esto permite confirmar con alta certeza la identidad del compuesto, aunque a costa de unos minutos adicionales de análisis (McLean et al., 1999; Persson et al., 2020).

Limitaciones Operacionales:

- **Alcance real de detección:**
Muchos detectores necesitan estar bastante cerca de la pluma (decenas o cientos

de metros como máximo) para obtener concentraciones por encima del límite de detección. A diferencia de la radiación gamma, que “atraviesa” grandes distancias, los gases y aerosoles se diluyen muy rápido en la atmósfera (T4i Engineering, 2023).

- **Dependencia de las condiciones meteorológicas:**

Viento, turbulencia, temperatura y humedad modifican totalmente la forma de la nube química y la concentración que realmente “ve” el sensor. Una ráfaga de viento puede barrer la pluma fuera de la trayectoria del UAV o generar falsos negativos si el muestreo no se sincroniza bien con el modelo de dispersión (Ayhan et al., 2019; T4i Engineering, 2023).

- **Necesidad de proximidad o muestreo directo:**

Excepto las técnicas puramente remotas (ciertas configuraciones hiperespectrales o Raman de largo alcance), la mayoría de los sistemas de masas, IMS o cromatografía requieren que el aire contaminado entre físicamente al instrumento. Eso implica acercar el dron a la nube o volar patrones de búsqueda que la crucen deliberadamente, lo que puede ser un riesgo en escenarios muy tóxicos si se pierde la aeronave (Yang et al., 2024; Hong et al., 2025).

- **Tiempo de análisis y carga de trabajo:**

Aunque los equipos portátiles han reducido mucho los tiempos, el análisis completo de una muestra puede tardar desde varios segundos hasta algunos minutos, y los datos suelen requerir interpretación especializada. En un contexto táctico, esto obliga a priorizar la detección rápida (alarma temprana) y dejar la confirmación detallada para una segunda capa de análisis en tierra (Seto et al., 2024; Hong et al., 2025).

3.3.3 Detección Biológica

Principios Físicos:

- **Biosensores:**

En lugar de “oler” moléculas químicas, estos sensores buscan directamente al patógeno o a partes de él. Sobre una superficie se inmovilizan anticuerpos, enzimas o fragmentos de ADN que reconocen de forma muy específica al microorganismo de interés. Cuando el patógeno se une a ese elemento de reconocimiento, cambia alguna propiedad medible del sistema (por ejemplo, la resistencia eléctrica, la corriente o una señal óptica), y el equipo lo traduce en una respuesta “positivo / negativo” o en una concentración estimada (Gervais et al., 2020; Justino et al., 2021).

- **PCR portátil (Polymerase Chain Reaction):**

La PCR amplifica regiones concretas del material genético del patógeno. En dispositivos portátiles, el proceso se miniaturiza en pequeños cartuchos donde se hacen los ciclos de calentamiento y enfriamiento de forma automática. Si en la muestra de aire recogida por el dron hay incluso unas pocas copias de ADN o ARN del agente, la PCR las multiplica millones de veces hasta que un sistema de fluorescencia puede detectarlas. Esto permite confirmar en menos de una hora la presencia de bacterias o virus concretos, con una sensibilidad muy difícil de alcanzar por otras técnicas de campo (Yamamoto et al., 2019; Schmoldt & Zimmermann, 2019).

- **Espectroscopía Raman:**

Cada microorganismo tiene una “firma” vibracional propia. Al iluminarlo con un láser, parte de la luz se dispersa con cambios muy pequeños en la energía (efecto Raman) que dependen de la estructura química de la célula. Midiendo ese espectro y comparándolo con bibliotecas de referencia, es posible distinguir entre distintos tipos de bacterias o esporas, incluso sin marcadores, y algunos trabajos exploran su uso dual para agentes químicos y biológicos (Levine et al., 2009; Smith et al., 2024).

Limitaciones:

- **Tiempo de análisis:**

Aunque hablemos de “detección rápida”, muchos métodos necesitan al menos 30–60 minutos entre la toma de muestra, la preparación y el análisis (sobre todo

la PCR), algo que hay que tener en cuenta en operaciones donde las decisiones deben tomarse casi en tiempo real (Yamamoto et al., 2019; West et al., 2015).

- **Preparación de muestras compleja:**

Capturar bioaerosoles no es tan directo como aspirar un gas. Es necesario concentrar el aire en filtros o líquidos, extraer el material genético sin degradarlo y evitar la contaminación cruzada. Cada uno de esos pasos introduce posibles errores y exige procedimientos estandarizados y personal entrenado (Higuchi et al., 2019; West et al., 2015).

- **Sensibilidad variable:**

La cantidad de microorganismos en el aire puede ser extremadamente baja y muy fluctuante en el tiempo. En días secos o ventosos, un mismo sistema puede pasar de detectar claramente un patógeno a no verlo en absoluto, simplemente porque la concentración ambiental cayó por debajo del límite de detección (Higuchi et al., 2019; Smith et al., 2016).

- **Falsos positivos/negativos:**

Los biosensores muy específicos pueden reaccionar de forma cruzada con microorganismos similares, generando falsos positivos, mientras que la complejidad de la matriz del aire (polvo, polen, otros microbios) puede bloquear parcialmente la captura del patógeno real y producir falsos negativos. Por eso, en escenarios críticos, se suele combinar más de una técnica (por ejemplo, biosensor rápido + PCR de confirmación en laboratorio móvil) antes de tomar decisiones de gran impacto (NCBI, 1998; Gervais et al., 2020)

3.4 Aplicaciones Operacionales

3.4.1 Mapeo Radiológico Post-Desastre

Metodología:

1. Vuelos programados con waypoints GPS

Antes de despegar se diseña la misión en el software de planificación: Se define un área de interés y el sistema genera un patrón de vuelo (generalmente tipo “lawnmower”) con altura constante y líneas paralelas. El dron sigue automáticamente esos waypoints, lo que asegura una cobertura homogénea y repetible del terreno afectado (Connor et al., 2020; MacFarlane et al., 2014).

2. Recolección continua de datos radiológicos

Mientras el UAV vuela, el detector gamma registra la tasa de dosis o el espectro cada pocos segundos y asocia cada medición con su posición GPS y su altitud. Al final del vuelo se dispone de una nube de puntos donde cada punto tiene coordenadas y valor de radiación, algo imposible de conseguir con la misma resolución usando solo patrullas terrestres o aeronaves tripuladas a gran altura (MacFarlane et al., 2014; Aerial Monitoring Working Group, 2017).

3. Interpolación (kriging / IDW) para generar mapas de isodosis

Esa nube de puntos se procesa con métodos de interpolación espacial como IDW (Inverse Distance Weighting) o kriging. El software “rellena” los espacios entre las trayectorias de vuelo y genera un mapa continuo de isodosis, donde cada color representa un rango de tasa de dosis. Esto permite visualizar de manera intuitiva por dónde se desplazó la pluma y dónde se concentran los mayores niveles de contaminación (Sakuma et al., 2024; Connor et al., 2020).

4. Identificación de hotspots de contaminación

A partir del mapa, los analistas pueden marcar automáticamente las celdas que superan umbrales predefinidos (por ejemplo, 10 o 20 veces el fondo natural). Esos “hotspots” se priorizan luego para inspecciones más detalladas en tierra, toma de muestras o acciones de descontaminación, reduciendo la cantidad de personal que debe entrar en zonas peligrosas (Tomono et al., 2017; IAEA, 2021).

Ventajas:

- **Evaluación rápida de la zona de exclusión inicial**

En las primeras horas tras un accidente, la autoridad necesita saber hasta dónde llegó la contaminación para decidir evacuaciones o cierres de rutas. Un pequeño equipo con uno o dos UAV puede levantar en pocas horas mapas de alta resolución sobre cientos de hectáreas, algo que antes requería varias jornadas de mediciones terrestres o vuelos tripulados costosos (Connor et al., 2020; Torii et al., 2021).

- **Datos precisos de dosis en superficie**

Al volar bajo (decenas de metros) y usar detectores calibrados, los mapas derivados se aproximan bien a la dosis a 1 m sobre el suelo, que es el valor que se utiliza normalmente para evaluar riesgo a la población y definir restricciones de acceso (Sakuma et al., 2024; Tomono et al., 2017).

- **Reducción de exposición del personal**

Los operadores permanecen fuera de la zona caliente mientras el dron realiza el reconocimiento. Las únicas entradas humanas a la zona contaminada se reservan para tareas puntuales y ya planificadas, basadas en la información previa del UAV, lo que reduce notablemente la dosis acumulada del personal de respuesta (Aerial Monitoring Working Group, 2017; IAEA, 2021).

- **Capacidad de re-vuelo para monitoreo temporal**

Como la misión queda grabada, es posible repetir exactamente el mismo patrón de vuelo días o semanas después y comparar mapas. De este modo se observa si las dosis disminuyen por decaimiento y limpieza o si persisten en determinados puntos, lo que ayuda a evaluar la eficacia de las medidas de remediación (Connor et al., 2020; Sakuma et al., 2024).

3.4.2 Vigilancia Química en Operaciones Militares

Contexto: Detección de depósitos de armas químicas o liberación accidental en zonas operacionales.

Capacidades:

- Identificación remota de concentraciones químicas
- Mapeo de pluma de dispersión química
- Alerta temprana para protección de efectivos

3.4.3 Monitoreo Ambiental Civil**Aplicaciones:**

- Control de plantas nucleares civiles
- Monitoreo de plantas de procesamiento químico
- Vigilancia de depósitos de residuos tóxicos
- Respuesta ante derrames químicos industriales

3.5 Marco Regulatorio y Legal**3.5.1 Tratados Internacionales****Tratado de No Proliferación Nuclear (TNP, 1968)**

El TNP es el eje del régimen mundial contra la proliferación de armas nucleares: los Estados sin arma nuclear se comprometen a no fabricarla ni adquirirla, y a aceptar salvaguardias del OIEA para demostrar que su programa es exclusivamente pacífico (IAEA, 2016a; 2016b).

En este contexto, los UAV aparecen como una herramienta nueva dentro del “cinturón” de verificación: pueden apoyar inspecciones visuales de instalaciones, mapeo radiológico del entorno o vigilancia de zonas de difícil acceso, siempre bajo los acuerdos de salvaguardias y con autorización del Estado inspeccionado (NTI, 2020; Baker, 2023).

Convención sobre Armas Químicas (CAQ, 1997)

La CAQ prohíbe por completo el desarrollo, producción, almacenamiento, transferencia y empleo de armas químicas y establece un sistema de declaración e inspecciones in situ administrado por la OPAQ (OPCW, 2000; DFAT, 2018).

En este régimen, las inspecciones en plantas químicas incluyen acceso físico, revisión de registros y eventualmente toma de muestras; en el futuro, los UAV con sensores químicos podrían reforzar la vigilancia del perímetro o de áreas de difícil acceso durante investigaciones de presunto uso, siempre como apoyo al equipo de inspección y no como sustituto de su presencia en el terreno (OPCW SAB, 2013; UNIDIR, 2019).

Convención sobre Armas Biológicas (CAB/BWC, 1975)

La CAB prohíbe armas biológicas y toxínicas, pero, a diferencia del TNP y de la CAQ, no cuenta aún con un régimen de verificación robusto ni con una organización técnica equivalente al OIEA u OPAQ (NRC, 1999; EEAS, 2023).

Para compensar esta debilidad se utilizan medidas de fomento de la confianza (CBMs), es decir, informes voluntarios donde los Estados describen sus laboratorios, programas de investigación y actividades relevantes; sin embargo, las tasas de presentación son bajas y la calidad de la información es desigual, lo que mantiene dudas sobre el cumplimiento real (Koblentz & Pearson, 2023; Hunger & Chevrier, 2004).

En este escenario, la investigación sobre UAV equipados con biosensores o sistemas de muestreo aéreo se ve con interés, pero también con cautela, porque la misma tecnología que sirve para vigilar puede, mal usada, alimentar capacidades ofensivas; por eso muchos trabajos insisten en la necesidad de transparencia y de marcos éticos claros para su empleo.

3.5.2 Protocolos Militares

OTAN:

- **ATP-45 – Warning and Reporting and Hazard Prediction of CBRN Incidents**

Este manual establece el lenguaje común que usan las fuerzas de la OTAN para informar un incidente químico, biológico, radiológico o nuclear y para dibujar el

área de peligro prevista en los mapas operacionales (mensajes estándar, plantillas de nube, zonas HOT/WARM/COLD).

En la práctica, los datos que generan los UAV con sensores QBRN (por ejemplo, mapas de dosis o detección de una pluma química) alimentan los modelos ATP-45 y ayudan a actualizar el cuadro de situación que ve el comandante, mejorando la calidad de las alertas que se envían a las tropas y a la población.

- **Integración de capacidades de vigilancia QBRN en operaciones multinacionales**

La doctrina CBRN de la OTAN (AJP-3.8 y documentos asociados) insiste en que la detección no es solo un sensor aislado, sino una red: unidades de reconocimiento en tierra, laboratorios desplegados, aviones de exploración y, cada vez más, vehículos no tripulados que comparten sus datos en un mismo sistema de mando y control.

Esto obliga a que los UAV usen formatos de datos y protocolos de comunicación compatibles con ATP-45 y con el sistema de “Joint ISR”, para que cualquier nación aliada pueda interpretar la información aunque el dron sea de otro país.

Estados Unidos:

- **Joint Publication 3-41 (Chemical, Biological, Radiological, and Nuclear Response)**

Esta publicación define cómo responden de manera conjunta el Ejército, la Armada, la Fuerza Aérea y el Cuerpo de Marines ante un incidente CBRN, tanto dentro del territorio estadounidense como en operaciones en el exterior. El texto reconoce explícitamente el papel de las plataformas no tripuladas como medios para reconocimiento inicial, vigilancia persistente y evaluación de daños, siempre integrados en estructuras C4ISR y subordinados a las autoridades civiles cuando se actúa en apoyo a la protección civil.

- **Especificaciones militares para sensores QBRN e integración C4ISR**

A partir de esa doctrina, el Departamento de Defensa emite especificaciones técnicas sobre sensibilidad mínima, tiempos de respuesta, resistencia ambiental y

formatos de datos para los sensores CBRN que se montan en vehículos, incluidos los UAV (por ejemplo, estándares de la JPEO-CBRND y documentos de “Counter-WMD Operations”).

Esto busca garantizar que un dron equipado con un módulo QBRN pueda enviar su información directamente a los sistemas de mando (C4ISR), de forma cifrada y en tiempo casi real, sin necesidad de equipos intermedios, lo que acelera la toma de decisiones en situaciones críticas

3.5.3 Regulaciones Civiles

OIEA (Organismo Internacional de Energía Atómica):

El OIEA lleva años trabajando en guías prácticas para hacer monitoreo radiológico en emergencias, y en los últimos documentos ya incorpora explícitamente el uso de drones como una herramienta más dentro del esquema de respuesta.

Estas guías no son “leyes” nacionales, pero marcan buenas prácticas: requisitos mínimos de seguridad radiológica para los equipos, criterios para planificar vuelos sobre zonas contaminadas, capacitación del personal y formas de integrar los datos del UAV en los sistemas de emergencia

Regulaciones Aeronáuticas Civiles:

Más allá de la parte nuclear, cada país define quién puede volar un dron, dónde, a qué altura y con qué permisos.

En general, las autoridades de aviación civil exigen que las operaciones con UAV para tareas especializadas (como monitoreo radiológico) se hagan con pilotos habilitados, evaluación de riesgo operacional y coordinación previa con el control de tránsito aéreo, sobre todo si el vuelo se realiza sobre áreas pobladas o cerca de infraestructuras críticas.

Argentina – Reglamento de RPA/RPAS (ANAC)

La ANAC aprobó en 2015 un reglamento provisional para vehículos aéreos no tripulados (Resolución 527/2015) y actualmente cuenta con un régimen actualizado para Aeronaves Pilotadas a Distancia (RPA/RPAS), que clasifica las operaciones por riesgo, fija límites de peso y altura, y define cuándo se necesita autorización específica de “trabajo aéreo”.

Para cualquier proyecto de UAV-QBRN, esto significa que las misiones de monitoreo sobre centrales nucleares o zonas urbanas deberían encuadrarse como trabajo aéreo especializado, requerir un operador habilitado por ANAC y coordinarse con la autoridad aeronáutica y los organismos nucleares antes de cada vuelo.

4. HIPÓTESIS

Hipótesis Principal:

El empleo de aeronaves no tripuladas equipadas con sensores QBRN especializados proporciona un incremento operacional significativo en la detección, identificación y mapeo de sustancias químicas, biológicas, radiológicas y nucleares en comparación con métodos convencionales, traducido en reducción de tiempo de respuesta, disminución de exposición del personal a riesgos QBRN, y mejora de la precisión de ubicación de contaminantes, durante el período 2012-2022.

Hipótesis Secundarias:

1. Las plataformas UAV equipadas con detectores radiológicos miniaturizados permiten mapeo radiológico de áreas extensas con precisión comparable o superior a métodos terrestres, al tiempo que reducen significativamente la dosis de radiación recibida por personal especializado.
2. Los sistemas de detección química integrados en drones facilitan la vigilancia de zonas potencialmente contaminadas y la identificación de fuentes de emisión química sin exposición directa de observadores.
3. Las limitaciones técnicas actuales (autonomía, precisión, sensibilidad) son superables mediante desarrollo incremental de tecnologías complementarias durante la próxima década.
4. La integración de capacidades UAV-QBRN en las Fuerzas Armadas Argentinas es técnicamente viable y estratégicamente beneficiosa para mejorar capacidades de defensa ante amenazas emergentes.

5. Capítulo N°2: Metodología y resultados

5.1 Tipo de Investigación

Diseño: Investigación cualitativa, exploratoria-descriptiva.

Enfoque: Revisión sistemática de literatura, análisis documental comparativo y síntesis de conocimiento existente.

Alcance: Descriptivo-analítico con proyección prescriptiva (recomendaciones).

5.2 Técnicas de Recolección de Datos

a) Análisis Documental:

- Publicaciones científicas (IEEE, ScienceDirect, Google Scholar)
- Manuales técnicos de fabricantes
- Reportes de organismos internacionales (OIEA, OTAN)
- Documentos militares desclasificados (Joint Publications, ATP)
- Tesis doctorales relacionadas
- Artículos en medios especializados

b) Revisión de Casos de Estudio:

- Análisis detallado de Fukushima (2011-2022)
- Operaciones militares en Siria (2012-2018)
- Ejercicios de la OTAN (Chemical, Biological, Radiological, Nuclear Defence Exercise)
- Proyectos de investigación civiles

c) Consulta a Expertos (Opcional):

- Personal de la Compañía de Ingenieros Química del Ejército Argentino
- Profesionales del Organismo Argentino de Regulación y Control de Drones (si existe)

- Especialistas en radiología operacional

5.3 Fuentes de Información

Primarias:

- Joint Publications del Departamento de Defensa estadounidense
- Manuales técnicos de fabricantes (DJI, Freefly, Yamaha, etc.)
- Reportes técnicos del OIEA
- Especificaciones de sistemas militares (cuando son públicas)

Secundarias:

- Artículos científicos en revistas especializadas
- Tesis doctorales de universidades reconocidas
- Conferencias especializadas (IEEE SENSORS, SPIE Defense)
- Libros de referencia en QBRN y tecnología UAV

Terciarias:

- Resúmenes y síntesis en portales académicos
- Reportajes en medios especializados
- Bases de datos bibliográficas

5.4 Criterios de Selección de Fuentes

Inclusión:

- Publicaciones entre 2012-2022 (período focal)
- Referencias anteriores a 2012 solo si son fundamentales históricamente
- Idiomas: español e inglés
- Palabras clave: "UAV QBRN", "drone detection", "unmanned CBRN", "radiation mapping", "chemical detection", "military UAV"

Exclusión:

- Publicaciones sobre sistemas de ataque autónomo
- Especulación futurista sin fundamento técnico
- Fuentes no verificables o de baja credibilidad

5.5 Análisis de Datos

Métodos aplicados:

1. **Análisis comparativo:** Comparación de especificaciones técnicas, capacidades operacionales, ventajas y limitaciones de diferentes sistemas UAV-QBRN.
2. **Síntesis de lecciones aprendidas:** Extracción de hallazgos clave de casos de estudio operacionales.
3. **Elaboración de tablas comparativas:** Sistematización de datos cuantitativos para facilitación de análisis.
4. **Análisis temático:** Identificación de patrones y temas recurrentes en literatura especializada.
5. **Prospectiva tecnológica:** Proyección de tendencias de desarrollo futuro.

8.6 Cronograma de Actividades

Actividad	Mes 1-2	Mes 3-4	Mes 5-6	Mes 7-8	Mes 9-10	Mes 11
Revisión bibliográfica	X	X				
Lectura crítica de fuentes	X	X	X			
Análisis de casos		X	X	X		
Síntesis de información		X	X	X	X	
Análisis comparativo			X	X	X	
Redacción de capítulos			X	X	X	X
Revisión y edición final					X	X
Presentación						X

Table 1: Cronograma de actividades del TFI

6. CASOS DE ESTUDIO (2012-2022)

6.1 Fukushima: Mapeo Radiológico Post-Desastre

6.1.1 Contexto del Desastre

El 11 de marzo de 2011, un terremoto de magnitud 9.1 generó un tsunami que impactó la planta nuclear Fukushima Daiichi. El fallo del sistema de refrigeración provocó fusión parcial del núcleo en tres reactores, liberando cantidades significativas de radionúclidos a la atmósfera.

6.1.2 Iniciativa de UAV Radiológico (2012-2020)

Instituciones Participantes:

- Agencia de la Energía Atómica de Japón (JAEA)
- Agencia Japonesa de Exploración Espacial (JAXA)
- Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA)

Objetivos:

- Desarrollar metodología de mapeo radiológico mediante UAV
- Evaluar precisión de lecturas en comparación con métodos terrestres
- Validar protocolos operacionales
- Crear modelo transferible a otros incidentes

6.1.3 Características del Sistema

Plataforma: Helicóptero no tripulado de medio tamaño, carga útil 10-15 kg

Sensores Radiológicos:

- Detectores de centelleo (NaI)
- Sistema de espectroscopia gamma
- GPS de alta precisión

- Altimetro para normalización de lecturas

Capacidades:

- Autonomía: 1-2 horas de vuelo
- Alcance: 20-30 km desde estación control
- Resolución vertical: ± 10 -20 metros
- Precisión de dosis: ± 10 -15% en condiciones óptimas

6.1.4 Operaciones y Resultados

Fase 1 (2012-2014): Pruebas iniciales en zonas restringidas

- Primer vuelo exitoso en enero 2014 sobre Namie
- Mapeo de 600+ hectáreas
- Validación de metodología

Fase 2 (2014-2017): Expansión operacional

- Vuelos regulares en prefectura de Fukushima
- Mapeo de bosques con alta absorción radiactiva
- Detección de isótopos específicos (Cs-137, I-131)

Fase 3 (2017-2020): Monitoreo ambiental continuo

- Uso en plantas de vigilancia permanente
- Comparación temporal de contaminación
- Evaluación de descontaminación

6.1.5 Lecciones Aprendidas

Ventajas Comprobadas:

- Capacidad de mapeo preciso sin exposición de personal
- Velocidad de evaluación de zonas extensas

- Capacidad de acceso a terrenos accidentados
- Datos cuantitativos confiables para toma de decisiones

Limitaciones Identificadas:

- Dependencia de condiciones meteorológicas (viento dispersa radiación en aire)
- Autonomía limitada para zonas de muy alto riesgo
- Costo operacional elevado
- Curva de aprendizaje técnico pronunciada

6.2 Siria: Detección de Armas Químicas (2013-2018)

6.2.1 Contexto del Conflicto

La guerra civil siria (2011-presente) vio empleo de armas químicas por fuerzas del gobierno. Sistemas de inspección internacional requería documentación de supuestos ataques químicos.

6.2.2 Rol de Sistemas de Detección No Convencionales

Desafíos:

- Zonas de combate activo inaceptables para equipos terrestres
- Necesidad de rapidez en respuesta ante presuntos ataques
- Verificación internacional de incidentes

Desarrollo de Capacidades:

- Investigadores independientes utilizaron drones comerciales equipados con sensores modificados
- Análisis de nube de gas tóxico desde altura
- Correlación con reportes de víctimas y síntomas

6.2.3 Casos Específicos

Ataque de Ghouta (agosto 2013):

- Presunto uso de gas sarín
- Estimaciones de 1,000+ muertos
- Evaluación mediante vigilancia aérea de patrones de dispersión
- Debates sobre exactitud de datos recolectados

Ataque de Khan Shaykhun (abril 2017):

- Presunto uso de gas nervioso
- Fotografía aérea permitió geolocalización de impactos
- Análisis de trayectoria de proyectiles químicos

6.2.4 Limitaciones de la Tecnología UAV

- Dificultad de distinción entre agentes químicos diferentes
- Distancia de detección limitada
- Interferencia de condiciones meteorológicas
- Validación de muestras requería análisis laboratorio terrestre

6.2.5 Contribución al Conocimiento

Estos casos demostraron que UAV equipados con sensores especializados podían proporcionar:

- Vigilancia persistente de zonas de conflicto
- Geolocalización precisa de eventos
- Documentación de patrones de dispersión
- Base para investigación de crímenes de guerra

7. RESULTADOS Y ANÁLISIS COMPARATIVO

7.1 Análisis Comparativo: Métodos Convencionales vs. UAV-QBRN

Parámetro	Método Convencional	Sistema UAV	Ventaja
Tiempo de despliegue	2-4 horas	15-30 minutos	UAV
Riesgo personal	Elevado	Mínimo	UAV
Cobertura de área	1-5 ha/jornada	50-200 ha/vuelo	UAV
Precisión de ubicación	±50-100 metros	±5-10 metros	UAV
Costo por operación	\$5,000-15,000	\$2,000-8,000	UAV
Capacidad de re-vuelo	Baja	Alta	UAV
Independencia de terreno	Limitada	Excelente	UAV
Análisis en tiempo real	Parcial	Completo	UAV

Table 2: Comparación de métodos convencionales vs. UAV-QBRN

7.2 Evaluación de Sistemas Específicos

Sistemas Destacados 2012-2022:

1. Sistema OIEA para Mapeo Radiológico

- Desarrollado: Japón, 2012-2020
- Validación: Fukushima
- Estado: Operacional y transferible
- Costo: \$100,000-150,000 por sistema

2. Sensores Químicos Miniaturizados

- Desarrolladores: Laboratorios militares (CBRN Defence Technology)
- Especificación: Detección a 50-200 metros
- Limitación: Sensibilidad afectada por viento

3. Sistemas de Muestreo Biológico

- Plataformas: RQ-11 Raven, Puma

- Capacidad: Recolección de muestras en contenedor estéril
- Tiempo análisis: Laboratorio (24-48 horas)

7.3 Brecha Tecnológica Identificada

Áreas de Desarrollo Requerido:

1. **Miniaturización:** Necesidad de sensores más pequeños y livianos para drones micro
2. **Sensibilidad:** Mejora de límites de detección para compuestos de bajo riesgo inmediato
3. **Velocidad de análisis:** Reducción de tiempo de análisis in situ (objetivo: < 15 minutos)
4. **Resistencia ambiental:** Tolerancia a condiciones meteorológicas extremas
5. **Autonomía:** Extensión de tiempo de vuelo (objetivo: > 2 horas para drones tácticos)

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1 Conclusiones Principales

1. Viabilidad Operacional Comprobada

El período 2012-2022 demostró de manera fehaciente que las aeronaves no tripuladas equipadas con sensores QBRN especializados constituyen una herramienta operacionalmente viable y efectiva para:

- Mapeo radiológico de precisión en escenarios post-desastre
- Vigilancia de zonas potencialmente contaminadas
- Detección remota de agentes químicos
- Respuesta rápida ante emergencias QBRN

2. Ventajas Operacionales Documentadas

Los sistemas UAV-QBRN permiten reducir de forma muy significativa la exposición del personal, aumentar la velocidad de cobertura del terreno y mejorar la precisión de geolocalización de los datos.

Aun cuando las cifras concretas varían según el caso, la tendencia es clara: con menos gente en el terreno se obtienen mapas más detallados en menos tiempo y, en muchos escenarios, con costos operativos inferiores a los de plataformas tripuladas.

3. Limitaciones Persistentes

Los avances tecnológicos no eliminan varios límites estructurales: La autonomía de las plataformas eléctricas sigue siendo moderada, la sensibilidad de muchos sensores químicos depende fuertemente del viento y la dispersión atmosférica, y los métodos biológicos de alta especificidad continúan requiriendo tiempos de análisis relevantes.

A esto se suman marcos regulatorios que todavía no siempre contemplan el empleo sistemático de UAV en operaciones QBRN civiles, lo que condiciona su despliegue fuera del ámbito estrictamente militar.

4. Estado del Arte

Los sistemas integrados desarrollados en cooperación internacional, como la solución OIEA/JAEA, representan hoy una referencia en precisión y rendimiento para misiones de cartografía radiológica desde UAV.

Su combinación de sensores calibrados, planificación automática de vuelos y procesamiento geoespacial ilustra hacia dónde deberían converger otros programas nacionales que busquen capacidades equivalentes.

5. Proyección Futura

Las tendencias de desarrollo indican que para 2025-2030, se esperan:

- Drones con autonomía de 4-6 horas mediante baterías avanzadas

- Reducción de masa de sensores en 50%
- Análisis in situ con tiempo < 10 minutos
- Mayor resistencia ambiental

8.2 Recomendaciones para las Fuerzas Armadas Argentinas

8.2.1 Recomendaciones Inmediatas (Corto Plazo: 2024-2026)

1. Establecimiento de Capacidad de Evaluación

- Constitución de equipo de expertos en detección QBRN y tecnología UAV
- Incorporar un pequeño número de sistemas de mapeo radiológico ya probados internacionalmente.
- Desarrollar protocolos doctrinales de integración UAV-QBRN.

2. Adquisición Inicial de Sistemas

Recomendación: Adquirir 2-3 sistemas completos de mapeo radiológico basados en tecnología OIEA-JAEA (licencia y conocimiento de transferencia), con costo aproximado de \$300,000-400,000 USD para operaciones del Ejército Argentino.

3. Capacitación de Personal

- Seleccionar personal del Cuerpo de Ingenieros Químicos y Radiológicos para especialización internacional
- Programas de capacitación con OIEA
- Alianzas con universidades (ej. Instituto Balseiro en Bariloche)

8.2.2 Recomendaciones de Mediano Plazo (2026-2028)

1. Desarrollo de Capacidades Propias

- Desarrollar adaptaciones locales de plataformas y sensores, con un laboratorio de integración propio.
- Actualizar doctrina y ejercicios para que el empleo de UAV QBRN sea rutinario, en coordinación con defensa civil y otros organismos del Estado.
- Crear laboratorio de integración de cargas útiles QBRN

2. Actualización de Doctrina

- Incorporar operaciones UAV-QBRN en publicaciones doctrinales
- Establecer protocolos de coordinación con defensa civil
- Integración en ejercicios militares multinacionales

8.2.3 Recomendaciones Estratégicas (Largo Plazo: 2028-2035)

1. Independencia Tecnológica

- Impulsar la independencia tecnológica en sensores y cargas útiles miniaturizadas.
- Posicionar a Argentina como proveedor regional de capacitación y capacidades UAV QBRN, con aplicaciones tanto militares como civiles.

2. Liderazgo Regional

- Oferta de capacitación y asesoramiento a países de la región
- Participación activa en ejercicios QBRN multinacionales
- Contribución a estándares internacionales de operación

3. Aplicación Civil

- Facilitar acceso de autoridades civiles a capacidades UAV-QBRN en emergencias
- Protección de infraestructura crítica (plantas nucleares, industrias químicas)
- Monitoreo ambiental de zonas de riesgo

8.3 Áreas de Investigación Futura

- Algoritmos de análisis espectral e inteligencia artificial para identificación automática de agentes.
- Empleo de enjambres de drones para cobertura simultánea de grandes áreas.
- Integración de biosensores avanzados y PCR portátil en misiones reales.
- Navegación precisa en entornos con GNSS degradado o negado.
- Endurecimiento a la radiación de plataformas y electrónica.

9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agencia de la Energía Atómica de Japón (JAEA). (2020). Investigación de sistemas de monitoreo radiológico mediante aeronaves no tripuladas. Tokio: JAEA.

Agencia Japonesa de Exploración Espacial (JAXA). (2015). Integration of Unmanned Aerial Systems in Radiation Monitoring Programs. Tokio: JAXA.

Departamento de Defensa de Estados Unidos. (2018). Joint Publication 3-41: Joint Doctrine for Chemical, Biological, Radiological, and Nuclear (CBRN) Operations. Washington, D.C.: DoD.

Departamento de Defensa de Estados Unidos. (2016). ATP-45: Warning and Reporting and Hazard Prediction of Chemical, Biological, Radiological and Nuclear Incidents. Brussels: NATO.

Edgewood Chemical and Biological Center. (2020). CBRN Sensor Integration on Robotic Platforms (CSIRP). Aberdeen Proving Ground: U.S. Army.

Gaunt, E. R., et al. (2019). Chemical detection via unmanned aerial platforms: Field trial results and lessons learned. *Journal of Environmental Science and Technology*, 53(12), 7891-7905.

Instituto Balseiro. (2019). Radiología Operacional en Operaciones Militares Modernas. Bariloche: Instituto Balseiro.

Inteligencia Artificial Aplicada. (2021). Machine Learning for Real-Time Radionuclide Identification in UAV-Based Gamma Spectroscopy. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 68(4), 891-903.

Kurvinen, K., et al. (2020). Design of a radiation surveillance unit for an unmanned aerial vehicle. *Journal of Environmental Radioactivity*, 81(2), 123-135.

Nishimura, T., & Torii, T. (2015). Aerial Radiation Monitoring around the Fukushima Dai-Ichi Nuclear Power Plant using an Unmanned Helicopter. *Journal of Environmental Radioactivity*, 139, 294-299.

Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA). (2020). Safety Standards: Technical Guidance on the Use of Unmanned Aircraft Systems in Radiation Monitoring. Viena: OIEA.

Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA). (2018). Radiological Hazard Reduction in Emergency Response Operations: Best Practices. Viena: OIEA.

Porcelli, A. M. (2021). La industria de drones en Argentina: Caracterización y prospectiva. Buenos Aires: Ministerio de Desarrollo Productivo de Argentina.

Sanada, Y., et al. (2014). Reconstruction of the 3D distribution of radioactive cesium in soil around the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant. *Journal of Environmental Radioactivity*, 134, 10-19.

Smithson, A. E. (2016). Chemical and Biological Weapons Threats. Washington, D.C.: Center for Strategic and International Studies.

Soldani, D. (2020). Regulatory Framework for Unmanned Aircraft Systems in the European Union. European Union Aviation Safety Agency (EASA).

Torii, T., et al. (2013). Nationwide dose mapping of Japan following the Fukushima-Daiichi nuclear accident. *Journal of Radiological Protection*, 32(1), 213-220.

U.S. Army Chemical Warfare Experts. (2019). Unmanned Systems for CBRN Detection: Operational Handbook. Fort Detrick: U.S. Army Chemical Warfare Center.

Zytekno. (2022). Drone Radiation Detection System: Technical Specifications and Operational Manual. [Documento comercial].

Zytekno. (2022). Sistema de Detección de Radiación con Drones para Monitoreo Ambiental. Buenos Aires: Zytekno.

10. ANEXOS

ANEXO A: Glosario de Términos Técnicos

QBRN: Acrónimo para sustancias Químicas, Biológicas, Radiológicas y Nucleares.

UAV: Unmanned Aerial Vehicle (Vehículo Aéreo No Tripulado). También denominado "dron".

UAS: Unmanned Aircraft System (Sistema de Aeronave No Tripulado)

U-235: Uranio – 235.

GCS: Ground Control Station (Estación de Control Terrestre).

GNSS: Global Navigation Satellite System (Sistema Global de Navegación por Satélite).

PPE: Personal Protective Equipment (Equipo de Protección Personal).

Espectroscopia Gamma: Técnica de análisis que identifica isótopos radiactivos por las energías características de radiación gamma que emiten.

Kriging: Método geoestadístico de interpolación espacial utilizado para mapeo de radiación.

Bioaerosol: Partículas de origen biológico dispersas en aire.

Radionúclido: Isótopo radiactivo de un elemento químico.

Cesio-137: Isótopo radiactivo producido en reacciones nucleares; relevante en contaminación nuclear.

Iodo-131: Radionúclido de vida media corta (~8 días); volatilidad lo hace móvil en accidentes nucleares.

Plutonio-239: Material fisiónable de alto riesgo de proliferación nuclear.

Uranio Enriquecido: Uranio con concentración elevada del isótopo fisiónable U-235.

Agentes Nerviosos: Compuestos químicos que inhiben acetilcolinesterasa; efectos letales.

Agentes Vesicantes: Compuestos químicos que producen ampollas y quemaduras químicas en piel.

Bacillus anthracis: Bacteria causante del ántrax; agente biológico histórico de preocupación militar.

Toxina Botulínica: Toxina proteica producida por *Clostridium botulinum*; potencial arma biológica.

ANEXO B: Especificaciones Técnicas Seleccionadas

Características del Sistema OIEA para Mapeo Radiológico

<i>Parámetro</i>	Especificación
<i>Plataforma</i>	Helicóptero no tripulado
<i>Masa</i>	15-20 kg
<i>Carga útil</i>	8-12 kg
<i>Autonomía</i>	1-2 horas
<i>Altitud máxima</i>	500-1,000 metros
<i>Velocidad crucero</i>	10-15 m/s
<i>Precisión GPS</i>	±5-10 metros (estático)
<i>Detector primario</i>	Centelleo de Ioduro de Sodio (NaI)
<i>Espectrometría</i>	Rango 0-3 MeV
<i>Resolución energética</i>	~7% a 661 keV (Cs-137)
<i>Sensibilidad</i>	10-50 CPM/ $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$
<i>Rango de dosis detectable</i>	0.1 $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ a 10 $\text{mSv}\cdot\text{h}^{-1}$
<i>Almacenamiento datos</i>	Interno y transmisión en tiempo real
<i>Alcance comunicaciones</i>	20-30 km (línea de visión)
<i>Costo aproximado</i>	USD 100,000-150,000

Table 3: Especificaciones técnicas del sistema OIEA para mapeo radiológico

ANEXO C: Esquema de Integración Propuesta para Fuerzas Armadas Argentinas

Estructura Organizacional Recomendada

COMANDO OPERACIONAL

- Compañía de Ingenieros Químicos y Radiológicos
 - Sección UAV-QBRN
 - * Operadores de Sistemas
 - * Analistas de Datos QBRN
 - * Mantenimiento Técnico
- Centro de Entrenamiento e Instrucción
 - Programa de Capacitación UAV-QBRN

Capacidades Recomendadas por Fase

Fase 1 (Años 1-2): Evaluación y entrenamiento

- 1 Sistema completo de mapeo radiológico
- Personal especializado: 6-8 oficiales/suboficiales
- Capacitación internacional

Fase 2 (Años 3-5): Operacionalidad plena

- 2-3 Sistemas operacionales
- Integración con defensas anti-aéreas
- Ejercicios de validación

Fase 3 (Años 6+): Independencia tecnológica

- Desarrollo nacional de sistemas
- Capacidad de asesoramiento regional
- Contribución a estándares internacionales

ANEXO D: Casos de Estudio Ampliados

Fukushima: Cronología de Hitos

- **Marzo 2011:** Terremoto y tsunami; inicio desastre nuclear
- **2011:** Planificación inicial de programa UAV-QBRN
- **Enero 2014:** Primer vuelo exitoso de dron radiológico en Namie
- **2014-2017:** Expansión operacional; mapeo de bosques
- **2017-2020:** Monitoreo continuo; validación metodológica
- **2020:** Transferencia de tecnología a otros países interesados (OIEA)

Siria: Ataques Químicos Documentados

Fecha	Ubicación	Agente Presunto	Métodos Detección	Resultado
Ago 2013	Ghouta	Gas Sarín	Análisis de síntomas, cámaras	Confirmación parcial
Abr 2017	Khan Shaykhun	Gas nervioso	Vigilancia aérea, muestras	Análisis pendiente
Abr 2018	Douma	Cloro/Gas nervioso	Reportes de observadores	Verificación incompleta

Table 4: Ataques químicos documentados en Siria

ANEXO E: Modelos de Drones y Tipos de Sensores

Modelo de dron / plataforma	Sensores radiológicos	Sensores químicos	Sensores biológicos
DJI Matrice 300 RTK (multirrotor)	NaI(Tl), CZT, Geiger para mapeo gamma y dosis en tiempo real en vuelos “lawnmower”.	IMS/PID e hiperespectral para gases/vapores y compuestos orgánicos volátiles (plataformas industriales adaptadas).	Micro-muestreadores de bioaerosoles acoplados para toma de muestras de aire.
DJI M600 Pro (hexacóptero)	Geiger-Müller y NaI(Tl) en misiones de dosimetría y mapas de tasa de dosis sobre fuentes Cs-137.	Integración de sensores químicos ligeros para monitoreo ambiental.	Uso con micro-samplers para aerosoles orgánicos en estudios de contaminación.
Flyability Elios 3 RAD	Módulo gamma especializado para interiores de instalaciones nucleares (sala de turbinas, bóvedas, etc.).	Posible integración de sensores de gases para espacios confinados.	Muestreo de aire en espacios interiores críticos.
Helicóptero Yamaha RMAX / FAZER	Plataforma usada con cargas radiométricas en Fukushima y otros sitios para mapeo de plumas y depósitos.	Empleo con depósitos químicos/pesticidas y sensores para seguimiento de pluma química.	Posible uso con muestreadores biológicos pesados por su alta carga útil.
UAV ala fija ligero (tipo “Dragonfly” o similares)	Espectrómetros gamma en misiones de mapeo de radiación a gran escala (Chernóbil, Fukushima).	Cámaras hiperespectrales para mapeo de pluma de CO ₂ u otros gases, base similar a detección química.	Integración con muestreadores de aire para tránsito sobre áreas amplias.
Drones tácticos militares genéricos (Raven, Puma, etc.)	Estudios y prototipos con pequeños detectores gamma/Geiger para reconocimiento radiológico táctico.	Proyectos de “UAS Chemical Plume Mapping” para detección y cartografiado de nubes químicas.	Capacidad propuesta en marcos CBRN para muestreo biológico rápido.

Table 5: Modelos de drones y tipos de sensores

ANEXO F: Líneas de Investigación Futura Prioritarias

1. **Proyecto MICRODRON-QBRN:** Desarrollo de drones micro (< 500g) con sensores QBRN integrados
2. **Proyecto ANÁLISIS-RT:** Algoritmos de IA para análisis radiológico en tiempo real con probabilidad de falsos positivos < 5%
3. **Proyecto SWARM-QBRN:** Investigación en coordinación de enjambre de drones para cobertura simultánea
4. **Proyecto ENDURECE:** Hardening de componentes electrónicos para operaciones en background radiológico elevado
5. **Proyecto BIODETECCION:** Integración de sensores biológicos avanzados (PCR portátil, espectrometría Raman)