RCSO Revista Colombiana de Salud Ocupacional
ISSN 2322-634X

Revista Colombiana de Salud Ocupacional
16(2) dic 2026, e-14012. Doi: 10.18041/2322-634X/rcso.2.2026.14012
Derechos de copia© Universidad Libre, Colombia
https://revistas.unilibre.edu.co/index.php/rc_salud_ocupa/index

Artículo de Investigación Científica y Tecnológica

Riesgos emergentes en la aspersión agrícola con aeronaves no tripuladas: cobertura normativa de la exposición ocupacional y de terceros en Colombia y en la Unión Europea (España)

Emerging risks in agricultural spraying with unmanned aircraft: regulatory coverage of occupational and third-party exposure in Colombia and the European Union (Spain)

Jorge Luis Forero Herrera [1,2], Hugo Armando Jurado-Vásquez [3]

Recibido: 01 septiembre 2026
Aceptado: 29 octubre 2026

Resumen

Introducción: La aspersión con aeronaves no tripuladas reduce la exposición dérmica, pero desplaza la exposición residual hacia la mezcla y carga y hacia sujetos distintos del piloto, incluidos terceros.

Objetivo: Analizar el alcance y los límites de cobertura de los sistemas normativos aplicables a la exposición ocupacional y de terceros en la aspersión con aeronaves no tripuladas en Colombia y en el sistema UE-España.

Métodos: Estudio comparado documental de dos casos, con método funcional del derecho comparado. Se analizaron tres corpus documentales. La literatura se identificó por rastreo de citaciones.

Resultados: Se incluyeron seis estudios primarios y dos documentos técnicos. Se identificaron seis sistemas normativos concurrentes. La exposición se concentra en la mezcla de la formulación en polvo mojable (82 % a 99 % de la exposición corporal potencial), con las manos como principal punto de contacto. Ningún sistema establece un valor límite de exposición dérmica exigible en el puesto de trabajo. El régimen colombiano de aplicación aérea exige pista, infraestructura que la tecnología no emplea, y el europeo deja al operador auxiliar fuera de la definición de persona no participante.

Conclusiones: La desprotección no obedece a la ausencia de regulación sino a la fragmentación entre sistemas que regulan la misma tarea sin comunicarse. En Colombia, clasificar la fumigación en riesgo II puede situar a las empresas de drones en el régimen preventivo más aligerado; las ARL deben clasificarlas según el peligro real. Cerrar el vacío exige articular los sistemas existentes y no producir más normas.

Palabras clave: Salud Laboral; Exposición Profesional; Plaguicidas; Legislación Laboral; Dispositivos Aéreos No Tripulados; Automatización; Medición de Riesgo

Abstract

Introduction: Spraying with unmanned aircraft reduces overall dermal exposure but shifts residual exposure to mixing and loading and to people other than the pilot, including third parties with no employment link.

Objective: To analyze the scope and coverage limits of the regulatory systems governing occupational and third-party exposure in spraying with unmanned aircraft in Colombia and the EU–Spain system.

Methods: A comparative documentary study of two cases applying the functional method of comparative law. Three documentary corpora were analyzed and a risk profile was built for comparison. Scientific literature was identified by citation tracking.

Results: Six primary studies and two technical reference documents were included. Six concurrent regulatory systems were identified (three per jurisdiction). Exposure concentrates in mixing wettable-powder formulations (82% to 99% of potential body exposure), with the hands as the main contact point. No system sets an enforceable dermal exposure limit at the workplace. Colombia's aerial-application regime requires an airstrip, which this technology does not use, and the European framework leaves the auxiliary operator outside the definition of non-involved person without placing that person in another protective category.

Conclusions: The protection gap stems not from an absence of regulation but from fragmentation among systems that regulate the same task without interacting. In Colombia, classifying crop spraying as risk class II may place drone companies under the lightest preventive regime; occupational risk administrators (ARL) should classify them by actual hazard. Closing the gap requires coordinating existing systems rather than adding regulation

Key words: Occupational Health; Occupational Exposure; Pesticides; Legislation, Labor; Unmanned Aerial Devices; Automation; Risk Assessment

[1] Escuela de Inteligencia y Contrainteligencia Brigada Ricardo Charry Solano, Ejército Nacional De Colombia; Bogotá, Colombia
[2] Politécnico Grancolombiano, Bogotá, Colombia
[3] Corporación Unificada Nacional De Educación Superior CUN, bogotá, Colombia.

Autor de correspondencia: Jorge Luis Forero Herrera. Correo: joforero8@poligran.edu.co

Introducción

La exposición ocupacional a productos fitosanitarios constituye uno de los riesgos laborales mejor documentados de la actividad agraria. Los marcos de evaluación consolidados distinguen cuatro categorías de personas expuestas -operadores, trabajadores, residentes y transeúntes- y establecen modelos de estimación diferenciados para cada una, [1] sobre la base de protocolos de medición de campo desarrollados desde finales del siglo pasado. [2] Sobre esa arquitectura conceptual se han construido las obligaciones de vigilancia epidemiológica, dotación de elementos de protección personal y limitación de la exposición que caracterizan la prevención de riesgos laborales en el sector.

La incorporación de aeronaves no tripuladas (UAV) a la aspersión agrícola altera esa arquitectura de un modo que la producción científica de prevención de riesgos laborales aún no ha incorporado. Los estudios de campo disponibles coinciden en que la sustitución del equipo manual por la aeronave (UAV) reduce de forma sustancial la exposición dérmica total del piloto, con disminuciones que oscilan entre el 90 % y el 99 % al comparar los percentiles 75 medidos con los estimados por los modelos de referencia de uso regulatorio para aplicación con equipo manual. [3] Ese resultado, sin embargo, oculta un desplazamiento interno: la exposición no se elimina, se concentra en la fase de mezcla y carga del depósito, donde se produce la mayor parte de la exposición corporal potencial de la operación. [4]

Este desplazamiento reconfigura la distribución de la exposición entre sujetos. A diferencia de la aplicación convencional con mochila -donde un único operario preparaba la mezcla y aplicaba el producto bajo la protección de la normativa laboral-, la operación con aeronaves no tripuladas (UAV) segrega las funciones en perfiles de riesgo disímiles. En este escenario, la exposición dérmica potencial del operador de mezcla y carga resultó sustancialmente superior a la del piloto a distancia, [3,4] evidenciando que el riesgo químico principal se concentra en tierra durante las tareas previas al vuelo.

La redistribución alcanza además a personas ajenas a la operación. Mediciones realizadas en viñedo mediante tres maniquíes de talla adulta, de 175 cm, y tres de talla infantil, de 110 cm, dispuestos a intervalos de diez metros y a cinco metros a sotavento de las hileras del cultivo, han documentado depósito dérmico sobre transeúntes y residentes durante la aplicación con sistemas de aspersión aérea no tripulada (UASS). [5] Se trata de sujetos que no mantienen vínculo laboral con la organización operadora, no participan de la decisión de asperjar y no obtienen beneficio directo de la operación.

Las investigaciones sobre desenlaces en salud convergen en una reducción global del riesgo ocupacional. Un estudio analítico en 2,268 aplicadores reportó menor incidencia de dermatitis, asma y bronquitis crónica mediante aeronaves no tripuladas frente a aplicaciones terrestres, [6] Asimismo, un ensayo de campo en una provincia tropical registró una exposición unitaria total marcadamente superior en operadores de mochila respecto al piloto. [7] Aunque estas magnitudes superan los modelos predictivos de la EFSA, [1] la discrepancia responde a factores metodológicos: el estudio tropical evaluó cultivos de porte alto y alta densidad foliar con tránsito directo por la nube de aspersión y reducidas dosis de trazador en el cálculo. [7]

Por otra parte, la observación cualitativa de operaciones identificó riesgos operacionales no capturados por la modelización cuantitativa convencional. Destacan caídas de aeronaves por fallos tras actualizaciones de software, proximidad a líneas de alta tensión, accidentes del personal en terrenos irregulares, sobrecalentamiento de baterías por radiación solar y contacto dérmico con insumos de limpieza. [8] De igual manera, evidenció el riesgo de exposición al reingresar a parcelas recién tratadas para mapeo o calibración. [8]

El estudio realizado en condiciones tropicales advierte, por su parte, que en esas regiones los aplicadores de plaguicidas resultan más vulnerables a la exposición dérmica que sus homólogos de regiones templadas, por cuanto habitualmente no emplean equipos de protección personal durante la aplicación debido a la incomodidad que estos suponen bajo condiciones de calor y humedad elevados. [7] Esta observación adquiere especial relevancia para el caso analizado, desarrollado íntegramente en una zona tropical.

El escenario configura un riesgo emergente por su novedad técnica y su dinamismo creciente en operaciones y población expuesta. [9] En Colombia, la Aerocivil reportó a abril de 2026 más de 5,000 pilotos, 8,300 aeronaves y 137 empresas en certificación [10] –frente a 1,800 equipos en 2021 [11]-, sin desagregar la actividad agrícola ni la superficie tratada. Igualmente, el SIVIGILA notificó 6,159 y 6,555 intoxicaciones por plaguicidas en 2021 y 2022 (con 69 y 86 muertes), [12] omitiendo la variable de aplicación con aeronaves no tripuladas. Por tanto, el carácter creciente del riesgo se fundamenta en la expansión del parque aeronáutico y no en registros de exposición, haciendo de este vacío informativo un hallazgo central.

La gestión de este riesgo no corresponde a un único cuerpo normativo, sino a la confluencia de tres planos con lógicas y sujetos de protección distintos: aeronáuticos, sanitario o fitosanitario y preventivo laboral. El análisis comparado examina seis sistemas, tres por ordenamiento (Tabla 1): en Colombia, el aeronáutico (RAC 100), el de plaguicidas (Decreto 1843/1991) y el laboral (SG-SST); en el sistema UE-España, el aeronáutico (Reglamento 2019/947), el fitosanitario (Real Decreto 1311/2012) y el preventivo laboral (Ley 31/1995 y sus reglamentos).

El régimen de aviación civil regula la operación de vuelo y la seguridad aérea para proteger de impactos en tierra, focalizado en el piloto; [13,14] el sanitario o fitosanitario norma la manipulación del producto resguardando la salud pública, el ambiente y al aplicador; [15,16]; y la laboral ampara al trabajador ante cualquier peligro de su actividad. [17,18] A ellos se suma la autorización de sustancias, que fija límites de exposición en la etiqueta en la UE [19] y opera por registro nacional en Colombia. [20] Como ningún régimen abarca el conjunto y este último no regula la tarea en campo, se evalúa aparte y no como sistema comparado.

Tabla 1. Cobertura normativa según ordenamiento, régimen y sujeto de protección

Sujeto o riesgo	CO — aeronáutico (13)	CO — plaguicidas (15)	CO — laboral (17,26,30)	ES — aeronáutico (14)	ES — fitosanitario (16)	ES — preventivo laboral (18,31,32)
Piloto	Reconocido, con habilitación de aspersión	Reconocido, con prohibición de manipular producto	Sin tipificación	Reconocido: competencias de piloto a distancia	Reconocido: carné de piloto aplicador	Trabajador expuesto, sin tipificación
Operador auxiliar de mezcla y carga	No reconocido	Reconocido: Carné de Aplicadores, nivel único	Sin tipificación	Reconocido como personal encargado de tareas esenciales de la operación (UAS.SPEC.050), sin tipificación de la mezcla y carga	Reconocido: carné de nivel básico (art. 18)	Trabajador expuesto, sin tipificación
Control de ingeniería en la mezcla	Sin mención	Exigido: tanques que impiden contacto e inhalación, solo en bases aéreas	Sin mención	Sin mención	Dispositivos incorporadores para la mezcla (art. 36.b); sin mención de EPP ni de transferencia cerrada	Exigido: aislamiento del agente con prioridad sobre el EPP
Evaluación de exposición química	Sin mención	Sin metodología	Vía general, sin tipificación de la actividad	Sin mención; omitida en la declaración de cumplimiento	Sin mención	Exigida y detallada
Obligación de medir	Sin mención	Sin mención	Exigible solo a más de 50 trabajadores o riesgo IV-V	Sin mención	Sin mención	Solo por vía inhalatoria
Valor límite de exposición dérmica	No existe	No existe	No existe	No existe	No existe	No existe
Vigilancia de la salud	Sin mención	Exigida: servicios médicos y toxicológicos	Vía general	Sin mención	Sin mención	Exigida si la exposición no está controlada
Tercero — riesgo de impacto	Cubierto vía responsabilidad civil y seguro	Franja de seguridad y señalización	Fuera del ámbito subjetivo	Cubierto: riesgo en tierra	No aplica	Fuera del ámbito subjetivo
Tercero — exposición química	Sin cobertura	Franja de 100 m y señalización de área tratada	Fuera del ámbito subjetivo	Cobertura indirecta: las mercancías peligrosas condicionan la categoría de la operación (arts. 4.1.f y 6.1.b.iii); no regula la exposición por deriva	Reentrada (art. 35.1), límite de viento de 3 m/s (art. 31.4); impacto en la salud cerca de zonas habitadas (art. 27.1) y productos de bajo riesgo en zonas protegidas (art. 34)	Fuera del ámbito subjetivo
Encaje de la aeronave no tripulada	Encaja: habilitación expresa	No encaja: el régimen aéreo exige pista y base	Sin tipificación	Encaja: reglamento de la UE sobre aeronaves no tripuladas	Encaja: definición abierta de aeronave (art. 3.e)	Encaja como agente químico, sin especificidad
Reevaluación ante nueva tecnología	Sin mención	Sin mención	Vía general del ciclo de mejora continua	Sin mención	Sin mención	EXIGIDA de forma expresa (art. 4.2 a)
Criterio que activa el régimen reforzado	No aplica	No aplica	Clase de riesgo por actividad económica: fija e independiente del producto	No aplica	No aplica	Clasificación toxicológica del producto: variable operación a operación
Conexión con el régimen preventivo laboral	Ninguna	Remisión genérica	—	Ninguna	Ninguna	Remisión abierta a criterios técnicos inexistentes para esta operación

Fuente: elaboración propia a partir del Corpus B

Revista Colombiana de Salud Ocupacional. ISSN 2322-634X. 2026; 16(2): e-14012. Doi: 10.18041/2322-634X/rcso.2.2026.14012

La literatura académica aborda estos componentes de forma fragmentada: coexisten investigaciones consolidadas sobre exposición a plaguicidas, estudios agronómicos de eficiencia en aviación no tripulada y análisis en seguridad operacional. No obstante, la revisión de alcance más reciente sobre evaluación del riesgo químico ocupacional en Colombia (1993-2024, 11 metodologías) no contempla la mediación tecnológica del vector de exposición. [21] Por tanto, no se identifica producción científica que analice la intersección entre estos sistemas ante los riesgos emergentes del trabajo tecnologizado, ni que incorpore al tercero expuesto como sujeto de estudio.

Marco conceptual

El estudio se apoya en tres constructos: el riesgo emergente (EU-OSHA), configurado aquí por la aspersión con aeronaves no tripuladas como un riesgo laboral nuevo y creciente; (9) la gobernanza del riesgo, cuya falla de articulación normativa desencadena la «irresponsabilidad organizada» de Beck -reconocimiento institucional sin gestión efectiva-; [22] y la jerarquía de controles en prevención laboral, [23] empleada como criterio para evaluar si las medidas exigidas por cada sistema corresponden a la jerarquía del riesgo caracterizado.

En atención a lo anterior, el presente estudio tiene por objetivo analizar el alcance y los límites de cobertura de los sistemas normativos aplicables a la exposición ocupacional y de terceros en la aspersión agrícola con aeronaves no tripuladas, mediante el análisis comparado de la producción normativa y técnica de Colombia y España.

Este objetivo se desarrolla a través de tres propósitos específicos: caracterizar, a partir de la literatura científica y técnica disponible, los riesgos asociados al desplazamiento del trabajador del punto de peligro y los sujetos sobre los que recae la exposición resultante; examinar el alcance material y los sujetos de protección que cada sistema normativo define en ambos ordenamientos; e interpretar la relación entre los riesgos caracterizados y la cobertura identificada, con el fin de formular criterios orientadores para la articulación efectiva entre dichos sistemas.

La pregunta que orienta la investigación es la siguiente: ¿cómo se configura la cobertura normativa de la exposición ocupacional y de terceros derivada de la aspersión agrícola con aeronaves no tripuladas en los ordenamientos de Colombia y España?

Sobre esta base, el estudio parte de la proposición de que el vacío de cobertura identificado no obedece a un mero desfase temporal en el desarrollo normativo de uno de los ordenamientos, sino a una limitación estructural compartida. En virtud de esta limitación, cada sistema sectorial (aeronáutico, sanitario y laboral) delimita su sujeto de protección y su objeto material de manera tal que la exposición ocupacional y de terceros generada por la mediación tecnológica del vector aéreo queda fuera del alcance efectivo de todos ellos. De esta proposición general se derivan tres enunciados subordinados:

(1) el régimen aeronáutico delimita como sujetos de protección al piloto y a las personas en tierra frente al impacto, y no al operador auxiliar de mezcla y carga ni al tercero expuesto a productos químicos;
(2) los regímenes sanitario y preventivo laboral no incorporan las variables propias de la operación mediada por aeronave (frecuencia de ciclos de mezcla y carga y masa de ingrediente activo manipulada);
(3) ninguno de los sistemas establece un valor límite de exposición dérmica exigible en el lugar de trabajo.

Materiales y métodos

Diseño

Se ejecutó un estudio cualitativo de alcance exploratorio -con componentes descriptivos, interpretativos y orientación anticipatoria-, fundamentado en una intersección normativa no abordada sistemática y metodológicamente diferenciado de una revisión de alcance (*scoping review*). El diseño corresponde a un análisis documental comparado de dos casos bajo la lógica de replicación literal: [24] se seleccionaron dos ordenamientos con expectativas de un mismo resultado -una limitación estructural compartida- a pesar de sus divergencias en el desarrollo regulatorio.

La selección muestral responde a un diseño de sistemas más similares (MSSD): [25] Colombia y España comparten la tradición de derecho continental, la adopción del Anexo 19 de la OACI y la estructura del sistema preventivo laboral, [17,18] pero difieren en la regulación de aeronaves no tripuladas y fitosanitarios. [13,14,16,26] En este marco, Colombia actúa como caso focal y el sistema UE-España como contraste, cuyas similitudes de contexto institucional sustentan la comparabilidad de forma delimitada.

Método comparado y término de comparación

La comparación se realizó mediante el método funcional del derecho comparado, [27] el cual contrasta las funciones preventivas que cada régimen cumple efectivamente en la práctica y no las normas homólogas por su mera denominación formal. El término de comparación o tertium comparationis lo constituye el perfil de riesgo operativo caracterizado en la primera fase del estudio; de este modo, ambos marcos jurídicos se examinan contra una misma rejilla analítica común y no directamente el uno contra el otro.

Criterios de elegibilidad

Se establecieron criterios diferenciados para la constitución de tres corpus de análisis, atendiendo a la naturaleza de las fuentes: (28)

- Corpus A (Literatura científica y técnica): Comprende artículos primarios (ensayos de campo, modelos de laboratorio y estudios analíticos) y documentos metodológicos de referencia (EFSA, OCDE). [1-7] La ventana temporal se fijó entre 2019 y 2026 porque la literatura primaria sobre la exposición de los operadores de aeronaves no tripuladas de aspersión es reciente: Kuster et al. describen estos sistemas como de uso creciente y señalan que una revisión previa halló muy pocos datos empíricos publicados sobre esa exposición. (3) El estudio primario más antiguo del corpus es de 2021. [7]

- Corpus B (Marco normativo nacional y supranacional): Integra disposiciones de rango legal vigentes al cierre de la búsqueda en Colombia y España (incluyendo normativa de la UE de aplicación directa). [14,16,18,19,29] Abarca aviación civil en UAS, uso de plaguicidas, registro de sustancias activas y seguridad y salud en el trabajo. [13-20,26,29-33]

- Corpus C (Directrices y documentos técnicos institucionales): Incluye guías, notas técnicas (NTP), circulares y medios aceptables de cumplimiento (AMC) expedidos por autoridades competentes en aviación (UAEAC, AESA/EASA), [13,14] agricultura/sanidad (ICA, MAPA, EFSA) [1,15,16] y riesgos laborales (MinTrabajo Colombia, INSST España). [17,30,32] El Corpus C se constituyó de forma parcial (véanse las limitaciones).

En la Tabla 2 se presentan los criterios de inclusión y exclusión de los tres corpus de análisis (A, B y C).

Fuentes de información

El estudio articuló tres corpus documentales para la triangulación analítica de fuentes [28] -parcial en el Corpus C-: el Corpus A reunió literatura empírica sobre exposición ocupacional en aviación no tripulada [3-8] mediante estudios semilla y bases indexadas; el Corpus B agrupó la normativa legal y reglamentaria aeronáutica, sanitaria y laboral de ambos ordenamientos desde fuentes oficiales; [13-20,26,29-33] y el Corpus C integró guías y documentos técnicos de autoridades competentes, destacando directrices de la EFSA, [1] la OCDE [2] y la EU-OSHA. [9]

Estrategia de búsqueda

El Corpus A se conformó mediante una estrategia mixta no exhaustiva, integrando snowballing bidireccional a partir de estudios semilla y una búsqueda de contraste (marzo–julio 2026) en Scopus, PubMed, SciELO y Redalyc (2019–2026). La ecuación empleada, solo en inglés, fue: (drone OR UAV OR "unmanned aerial") AND (pesticide OR "plant protection product") AND (exposure OR "occupational health"). El 7 de octubre de 2026 la búsqueda se complementó con ecuaciones en español y en portugués en SciELO y Redalyc, y se añadió AGRIS (FAO). LILACS y Web of Science no estuvieron accesibles en esa fecha (LILACS devolvió error 403) y no se consultó CAB Abstracts, por lo que no se incluyeron.

El proceso de selección se sintetiza a continuación:

- Registros recuperados en la búsqueda principal: 117 (Scopus: 82; PubMed: 35; SciELO y Redalyc en inglés: 0).
- Duplicados eliminados: 28 (quedando 89 registros únicos).
- Cribado por título/resumen: 74 excluidos por enfocarse en eficacia biológica, ingeniería o deposición en follaje sin evaluar exposición humana directa.
- Evaluación a texto completo (n = 15): 10 excluidos bajo los siguientes criterios:

1. n = 6: análisis exclusivo de deriva (drift) y deposición ambiental sin cuantificar absorción dérmica o inhalatoria.
2. n = 3: revisiones o modelos matemáticos sin datos empíricos de campo.
3. n = 1: aplicaciones agrícolas mediante aviación tripulada convencional.

Tabla 2. Matriz de Criterios de Inclusión y Exclusión

Corpus	Criterios de Inclusión	Criterios de Exclusión
Corpus A (Científico)	• Publicaciones 2019–2026 (excepto guías marco EFSA/OCDE) (1-8)	• Estudios enfocados únicamente en eficacia agronómica o deposición en el cultivo.
	• Idiomas: español, inglés o portugués.	• Aplicaciones con aviación agrícola tradicional (aeronaves tripuladas).
	• Metodología explícita de medición de exposición dérmica/inhalatoria en operadores o terceros.	• Literatura gris no arbitrada (folletos, notas de prensa).
	• Texto completo disponible.	
Corpus B (Normativo)	• Normas vigentes al momento del estudio en fuentes oficiales.	• Normas derogadas (salvo valor histórico comparativo específico).
	• Relevancia jurídica directa sobre seguridad, productos fitosanitarios o aviación civil (13-16,18-20,26,29-33).	• Regulaciones de alcance estrictamente local/departamental/autonómico
		• Normas puramente técnicas de producto sin impacto en salud humana.
Corpus C (Directrices)	• Documentos orientativos oficiales de acceso público emanados por autoridades gubernamentales o agencias reguladoras de competencia (1,13-17,26,30-32)	• Publicaciones de entidades privadas sin aval institucional.
		• Manuales comerciales de fabricantes.
		• Documentos sin autoría institucional ni fecha de expedición.

Elaboración propia

- Consolidación final: 5 estudios superaron la búsqueda de contraste. De estos, 4 coincidieron con el rastreo previo [3-5,7] y 1 aportó evidencia nueva [6] Añadiendo la aproximación cualitativa identificada por snowballing (Arıcak), [8] el Corpus A quedó delimitado en 6 estudios primarios. [3-8] Por excepción, se incluyeron un estudio analítico de desenlaces en salud [6] y una observación cualitativa, [8] que aportan evidencia sobre el contexto de exposición sin cumplir el criterio de medición explícita; ese criterio se aplicó al resto.
- Búsqueda complementaria (7 de octubre de 2026): SciELO recuperó 3 registros y AGRIS 22 (14 y 8 en dos consultas). Redalyc devolvió entre 3,882 y 7,260 registros por consulta, porque su motor no aplica operadores booleanos estrictos; en cada una de las cinco consultas se cribaron los 10 primeros, en el orden predeterminado de la base. Todos se excluyeron en el cribado por título/resumen por no evaluar exposición humana (eficacia agronómica, clasificación de malezas, abejas, usos no agrícolas del dron). Ningún estudio se añadió al Corpus A. Se identificó una revisión regulatoria (Boskovic et al., 2025), incorporada como referencia complementaria. [34]

Ficha de registro y procedimiento de análisis

Como técnica se aplicó el análisis documental estructurado mediante una ficha homogénea de registro. [28] El análisis cualitativo comprendió tres fases secuenciales [28]: la primera diseñó, desde el Corpus A, una matriz de riesgo (peligros por naturaleza, fase y sujeto expuesto) como término de comparación; la segunda contrastó dicha matriz con los Corpus B y C para verificar la cobertura y el régimen en cada ordenamiento; y la tercera confrontó las matrices resultantes para contrastar las proposiciones y derivar los criterios de articulación.

La tercera fase incorporó una orientación anticipatoria. Dado que el despliegue operativo de aeronaves no tripuladas en actividades con exposición ocupacional se encuentra en fase inicial en ambos ordenamientos, la zona de cobertura no cubierta identificada constituye un vacío prospectivo: una configuración de riesgo cuya casuística aún no se ha consolidado. El análisis se orientó, en consecuencia, a la formulación de criterios de alerta temprana.

Criterios de rigor

Para garantizar la robustez analítica y la consistencia del estudio, se realizó una doble triangulación: de fuentes —mediante la articulación y contraste de los tres corpus documentales— y de ordenamientos jurídicos. [28] El rigor metodológico se sustentó formalmente en los cuatro criterios consolidados para la investigación cualitativa: [35]

Dependencia: Se evaluó mediante el registro explícito de los campos de la ficha, de las categorías de las matrices de riesgo y de cobertura, y de las reglas de codificación empleadas, junto con el registro de las búsquedas y de las exclusiones; este material está disponible como material suplementario adjunto al presente manuscrito (Material suplementario 1) para su verificación.

Credibilidad: Se garantizó mediante el contraste riguroso y directo de cada afirmación, hallazgo o interpretación normativa contra el texto oficial, consolidado y vigente publicado en los diarios oficiales de cada Estado.

Transferencia: Se aseguró a través de la descripción detallada de los contextos normativos, históricos y operativos de ambos ordenamientos (Colombia y España), facilitando que los usuarios determinen el grado de aplicabilidad de los resultados a otros escenarios.

Confirmabilidad: Se sustentó mediante la trazabilidad metodológica completa entre los datos brutos, las unidades de significado, las categorías emergentes y las conclusiones finales, asegurando que cada hallazgo de la investigación esté directamente anclado a su respectiva fuente documental primaria y expuesto a la verificación de terceros. [28,35]

Consideraciones éticas

El estudio no involucró participantes humanos ni datos personales, por lo que no requirió consentimiento informado ni aval de comité de ética en investigación con seres humanos, y trabajó exclusivamente sobre documentación de acceso público. Su orientación es preventiva: identifica zonas de exposición no cubierta con el fin de contribuir a su gestión, sin examinar vulnerabilidades operacionales de sistemas o instalaciones.

Resultados

Perfil de riesgo del trabajo mediado por aeronaves no tripuladas

Se incluyeron seis estudios primarios y dos documentos técnicos de referencia que cumplían los criterios de elegibilidad definidos. Los estudios primarios proceden de Alemania (dos), España, Taiwán, China y Turquía, es decir, de Europa y de Asia; ninguno se ejecutó en América Latina. La búsqueda de contraste en SciELO y Redalyc con ecuación en inglés no arrojó registros, y su repetición con ecuaciones en español y en portugués, junto con AGRIS, tampoco recuperó estudios que cumplieran los criterios de inclusión; este resultado es compatible con una producción regional indexada escasa, aunque no permite afirmarlo de forma concluyente, porque LILACS y Web of Science no pudieron consultarse.

El análisis del corpus científico permitió construir un perfil de riesgo organizado según tres ejes: naturaleza del peligro, fase de la tarea en que se manifiesta y sujeto sobre el que recae la exposición. El resultado se presenta en la Tabla 3.

El peligro químico constituye el principal riesgo operacional, concentrándose de forma asimétrica según la fase y la función desempeñada. La mezcla de formulación sólida (polvo mojable o WP) es el punto crítico, acumulando entre el 82 % y el 99 % de la exposición potencial corporal total (sin contar las manos), frente al 1 %–18 % registrado durante la transferencia del diluido al depósito de la aeronave. [4] Anatómicamente, las manos representan la principal vía de contacto dérmico, concentrando, en valores medios, el 52 % de la exposición potencial en el mezclador de polvo, el 74 % en el mezclador de líquido y el 94 % en el cargador de la dilución. [4]

Revista Colombiana de Salud Ocupacional. ISSN 2322-634X. 2026; 16(2): e-14012. Doi: 10.18041/2322-634X/rcso.2.2026.14012

Tabla 3. Perfil de riesgo según naturaleza del peligro, fase de la tarea y sujeto expuesto

Naturaleza del peligro	Fase de la tarea	Operador remoto (piloto)	Otros trabajadores	Población no vinculada
Químico	Mezcla (polvo mojable y concentrado líquido)	No participa	Fase crítica (polvo mojable): 82–99 % de la exposición corporal potencial. 3.39 mg/kg con formulación en polvo y 1.12 mg/kg con concentrado líquido; manos 52–74 % [4]	Sin evidencia en el corpus
Químico	Carga del depósito	No participa	1–18 % de la exposición corporal potencial. 0.61 mg/kg; manos 94 % [4]	Sin evidencia en el corpus
Químico	Pilotaje y aspersión	0.400 mg/kg potencial y 0.012 real (3). Exposición atribuida principalmente a contaminación cruzada del mando a distancia [5]	Auxiliar por encima del modelo de referencia para mochila, por alta frecuencia de ciclos [5]	Depósito medido en maniquíes de adulto y niño a sotavento [5]
Químico	Purga y limpieza	Ejecutada por los propios operadores habilitados [8]	Purga y limpieza de la bomba a cargo del operador auxiliar; depósito en la mitad inferior del cuerpo [5]	Sin evidencia en el corpus
Químico	Manipulación del equipo	Residuo en brazos y baterías, fracción desprendible no cuantificada [4]	Ídem	No aplica
Químico	Reingreso a área tratada	Exposición documentada al ingresar a predios asperjados con anterioridad [8]	Ídem	Sin evidencia en el corpus
Químico — otros agentes	Limpieza del depósito	Vinagre blanco y disolventes de grasas [8]	Ídem	No aplica
Seguridad — impacto	Vuelo	Caída de la aeronave tras actualización de software [8]	Ídem	Riesgo extensivo a personas y animales presentes en el entorno [8]. Único cubierto por el régimen aeronáutico [13,14]
Seguridad — eléctrico	Vuelo	Líneas de alta tensión, con riesgo para la aeronave y para los operadores [8]	Ídem	Sin evidencia en el corpus
Seguridad —energía almacenada	Cambio de baterías	Calentamiento de baterías en jornadas calurosas [8]; residuo de producto en su superficie [4]	Ídem	No aplica
Físico — térmico y solar	Toda la jornada	Trabajo a la intemperie con exposición solar [8]	Ídem	No aplica
Físico — ruido	Vuelo	Sin evidencia en el corpus	Sin evidencia en el corpus	Sin evidencia en el corpus
Ergonómico y carga mental	Pilotaje	Reducción de la carga física respecto del método convencional; carga mental no evaluada [8]	Sin evidencia en el corpus	No aplica
Psicosocial	Toda la jornada	Determinación de la dosis por el propietario del predio o el distribuidor, sin control del operador; trabajo nocturno por condiciones climáticas; responsabilidad sobre aeronave en vuelo [8]	Ídem	No aplica
Locativo	Desplazamiento en predio	Terreno irregular, piedras y hoyos, con riesgo de caída y lesión [8]	Ídem	No aplica

Elaboración propia a partir del Corpus A

Normalizada por unidad de sustancia activa al día, la mediana de exposición dérmica potencial alcanza 3.39 mg/kg para el mezclador de polvo, 1.12 mg/kg para el de líquido y 0.61 mg/kg para el cargador, [4] frente a 0.400 mg/kg del piloto a distancia. [3,4] En el análisis estadístico (ANOVA, prueba de Tukey, p <0.05), únicamente la formulación en polvo difirió significativamente de los demás escenarios. [4] Así, tras integrar analíticamente ensayos estandarizados de la OCDE, la exposición en la mezcla resulta de 2.8 a 8.5 veces superior a la del piloto, [3,4] restringiéndose la significación estadística a la presentación sólida.

El empleo de equipos de protección personal (EPP) —prenda EN ISO 27065 C1 y guantes de nitrilo— redujo drásticamente la exposición dérmica mediana a 0.051 mg/kg en mezcla de polvo, 0.011 mg/kg en mezcla líquida, 0.010 mg/kg en carga [4] y 0.012 mg/kg en el piloto. [3,4]. Esta indumentaria logró eficiencias de reducción del 98.5 %, 99.0 % y 98.4 % para polvo, líquido y carga, respectivamente. [4]

Al desagregar la contribución de cada barrera, se constata que la prenda C1 de manera aislada mitiga la exposición dérmica corporal (excluyendo las manos) en un 97 % para la mezcla de polvo, un 91 % para la mezcla de líquido y un 83 % para la carga, [4] diferencia que los autores atribuyen a la menor exposición corporal de partida del cargador. No obstante, dado que las manos concentran entre el 52 % y el 94 % de la exposición potencial de la tarea, proteger únicamente el torso y las extremidades sin utilizar guantes ofrece una mitigación global deficiente. Esto explica por qué el estudio previo de Kuster et al. [3], cifró en apenas un 21 % la reducción de la exposición mediana del operador de mezcla y carga al emplear la prenda certificada de forma aislada, frente al desplome del riesgo que se logra al incorporar la protección química de las manos. [3,4]

Las manos constituyen el principal punto de contacto en las funciones de mezcla y carga. En ausencia de protección concentran, en valores medios, el 52 % de la exposición dérmica potencial del operador que mezcla polvo, el 74 % del que mezcla líquido y el 94 % del que carga el depósito. [4] El uso de guantes resistentes a productos químicos redujo la exposición de las manos entre un 97 % y un 98 % en todos los escenarios, [4] lo que sitúa este elemento como la medida de control individual de mayor rendimiento documentado en estos estudios. En arrozales, Kuster et al. [3], hallaron en las manos el 73 % de la exposición dérmica potencial de los operarios de mezcla y carga.

Conviene indicar el alcance de cada fuente. El estudio realizado en condiciones tropicales midió únicamente al piloto a distancia, con dos operadores de equipo de mochila como comparador y sin evaluación de las fases de mezcla y carga, [7] de modo que no aporta evidencia sobre el operador auxiliar. Sus autores reportan una exposición unitaria total de 1,952.02 mg/kg en los operadores de mochila y de 134.51 mg/kg en el piloto, valores superiores a los 11.15 mg/kg del modelo de mochila de la EFSA; [1] al tratarse de un único estudio, sin repeticiones, la comparación es descriptiva. Los valores de exposición por función proceden en su totalidad del estudio realizado en condiciones estandarizadas. [4]

Un aspecto metodológico condiciona la lectura de estas cifras. Los dos estudios disponibles arrojan magnitudes distintas para las mismas funciones: la exposición acumulada de operadores de mezcla y carga medida en condiciones estandarizadas de interior resultó inferior a la registrada en el estudio previo realizado en campo, con totales individuales de 1.48 a 8.73 mg/kg de sustancia activa manipulada al día en el estudio de interior, cuyos valores se solapan en parte con los del estudio previo. [4] Los autores atribuyen la diferencia a la estandarización de las condiciones experimentales y consideran válida la comparación entre ambos estudios, dada la alta variabilidad inherente a las mediciones de exposición del operador. El perfil debe leerse, en consecuencia, como un intervalo y no como un valor puntual.

Dos hallazgos matizan la lectura de esa reducción global. El primero es que, bajo determinadas condiciones operativas, la exposición del operador auxiliar supera los modelos de referencia establecidos para la aplicación con equipo de mochila. [5] La causa no reside en la tecnología de aspersión sino en su régimen operativo: la capacidad reducida del depósito y el empleo de volúmenes ultrarreducidos obligan a repetir el ciclo de mezcla y carga con una frecuencia muy superior, con caldos de mayor concentración. La reducción de la exposición por unidad de superficie coexiste, así, con un aumento de la exposición acumulada del sujeto que ejecuta la fase crítica.

El estudio en viñedo concluye que, si bien la aspersión con sistemas de aeronaves no tripuladas (UASS) reduce la exposición dérmica de los pilotos, residentes y transeúntes debido a la operación remota y a la menor deriva generada, surgen puntos críticos de exposición durante las fases de mezcla, carga y tareas auxiliares en tierra, donde los niveles reales superan las estimaciones de los modelos regulatorios vigentes. [5] Los autores atribuyen estas elevadas magnitudes a la mayor frecuencia de manipulación y a la alta concentración del producto fitosanitario, factores inherentes al bajo volumen de aplicación de la tecnología de drones [5]

No obstante, este hallazgo debe interpretarse con las cautelas metodológicas que los propios autores advierten: la comparación con los modelos predictivos es de carácter descriptivo y no fue sometida a un contraste estadístico de hipótesis debido a la naturaleza determinista de las estimaciones del modelo y al reducido tamaño muestral. [5] Asimismo, el alcance empírico de estos ensayos se circunscribe a una única localización geográfica, un único tipo de cultivo (viñedo) y tres repeticiones operacionales completas ejecutadas por una muestra de seis operarios. [5]

El segundo hallazgo se refiere a los terceros: se documentó que la exposición alcanza a personas ajenas a la operación (transeúntes y residentes), aunque en una magnitud inferior a la estimada por los modelos de referencia vigentes. [5] En efecto, las mediciones realizadas con maniquíes de talla adulta e infantil posicionados a sotavento evidenciaron depósito dérmico sobre estos sujetos durante la aplicación, pero con volúmenes de deriva de la mezcla diluida sustancialmente menores que los previstos por la calculadora de la EFSA para aspersión terrestre convencional y por el modelo AgDrift para la aviación agrícola tripulada tradicional. [5]

Este depósito se distribuyó con un gradiente espacial creciente desde la sección superior hacia la inferior del cuerpo, localizando

el máximo nivel de contacto en las piernas, seguidas en orden decreciente por el torso, los brazos y la cabeza. [5] En términos etarios, los autores no hallaron diferencias estadísticamente significativas entre la exposición de los maniquíes de talla adulta y los de talla infantil; por el contrario, observaron una tendencia hacia niveles de exposición ligeramente superiores en la talla adulta, lo cual atribuyen a su mayor superficie corporal expuesta y al incremento natural de la deriva aérea con la altura de muestreo. [5] En consecuencia, la hipótesis de una mayor exposición relativa de la población infantil frente a la adulta no se encuentra respaldada por la evidencia empírica disponible en este corpus, requiriendo de investigaciones específicas adicionales para su eventual verificación.

Las fases de purga de la bomba, limpieza del depósito y manipulación física del equipo aportan una vía de exposición adicional que el corpus científico documenta de forma incompleta: se ha constatado la presencia de residuos químicos en los brazos y en las baterías de la aeronave, aunque sin cuantificar la fracción desprendible y transferible a la piel de los operarios. [4] Asimismo, se ha identificado el empleo de agentes de limpieza (como vinagre blanco y disolventes de aceites industriales) que constituyen por sí mismos un peligro químico independiente de la toxicidad de los productos fitosanitarios aplicados. [8]

Por su parte, los peligros de carácter no químico aparecen documentados de forma más débil en la literatura. Únicamente un estudio cualitativo del corpus aborda estas amenazas de manera sistemática, [8] y ninguna de las investigaciones cuantitativas analizadas mide ni caracteriza factores críticos como la carga mental y visual del piloto durante el vuelo, el ruido emitido por la aeronave ni el riesgo térmico y de incendio asociado a los sistemas de almacenamiento de energía (baterías de litio). Esta marcada asimetría en el volumen y la profundidad de la evidencia disponible constituye en sí misma un resultado de investigación, el cual se analiza detalladamente en el apartado de limitaciones.

Por último, la exposición por vía inhalatoria de los operarios de drones no se encuentra caracterizada en el corpus científico. Uno de los estudios primarios de dosimetría declara de forma expresa haber omitido su medición, bajo el argumento de que los marcos de evaluación de riesgos no dietéticos de agroquímicos de la Unión Europea consideran la vía dérmica como la ruta de absorción primaria y mayoritaria para los operadores en la aspersión. [1,4] En consecuencia, el perfil de riesgo se sostiene de manera casi exclusiva sobre el contacto dérmico; una elección metodológica y de diseño que encuentra su justificación formal en las directrices de la propia Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA). [1]

Un hallazgo en viñedos reconfigura la exposición del piloto a distancia: las manos y el torso presentan la mayor exposición por contaminación cruzada indirecta con el mando de control. [5] Este dispositivo constituye un vector de riesgo inédito omitido por la normativa. [13,14,17,18] Al manipularse de forma continua y pender del pecho, su mitigación no exige límites ambientales, sino la implementación obligatoria de protocolos de higiene y manejo del hardware.

El análisis observacional cualitativo de campo en empresas de aplicación con drones revela que las operaciones son ejecutadas por equipos de dos operarios con licencia oficial de piloto a distancia, quienes asumen simultáneamente las tareas logísticas y de apoyo en tierra. [8] La premezcla del fitosanitario se realiza manualmente en recipientes abiertos previo a la transferencia del caldo al depósito de la aeronave, lo que configura una fase operacional de alto riesgo por exposición directa a elevadas concentraciones de ingrediente activo. [8]

En cuanto a los equipos de protección individual (EPI), se constató el uso de respiradores de media cara con filtros para gases/vapores, guantes de nitrilo y vestimenta diaria de algodón, evidenciando la ausencia de indumentaria de protección química certificada; adicionalmente, el trasvase se efectúa de forma manual mediante tolva dosificadora. [8] Finalmente, la dosificación y concentración aplicadas no responden a prescripciones agronómicas estandarizadas, sino a criterios informales basados en instrucciones del propietario del predio o recomendaciones del distribuidor comercial. [8]

Alcance y sujetos de protección en el ordenamiento colombiano

El régimen aeronáutico colombiano regula la operación de sistemas de aeronaves no tripuladas mediante el RAC 100, [13] norma que incorpora expresamente la aspersión agrícola como una adición específica al certificado de idoneidad del piloto. El reglamento reconoce formalmente tres roles operativos: el explotador de sistemas de aeronaves no tripuladas, el piloto UAS y el observador de la aeronave, este último obligado a estar certificado también como piloto. [13] Sin embargo, la norma no contempla figuras operacionales de tierra como el operador auxiliar, el encargado de la mezcla ni el responsable de la carga del depósito en el predio.

Para la habilitación práctica, el reglamento distingue dos niveles de exigencia en aspersión, en función de las horas de instrucción y de vuelo acreditadas:

Adición básica para operar aspersión (Sección 100.630(c)): El interesado solo requiere certificar una capacitación de mínimo 2 horas de instrucción en tierra y 4 horas de entrenamiento práctico con una aeronave de aspersión o dispersión. [13]

Adición para instructor de vuelo en aspersión (Sección 100.630(h)(1)(iii)): Es esta adición de especialidad la que exige acreditar 50 horas de vuelo en actividades de aspersión o dispersión (de las cuales hasta 10 horas pueden ser demostradas en simulador), las cuales deben ser certificadas formalmente por un explotador UAS habilitado o mediante el registro oficial de un fabricante de UAS, [13]

Todos estos requisitos técnico-operativos recaen exclusivamente sobre el piloto y la navegación aérea; el reglamento no impone competencias obligatorias en materia de manipulación o toxicología de productos químicos para las tripulaciones.

En el ámbito de la salud laboral, un análisis de términos confirma que conceptos como seguridad y salud en el trabajo, salud ocupacional, riesgos laborales, higiene o enfermedad laboral no figuran como parte del articulado activo del reglamento, salvo

por una breve nota aclaratoria sobre izaje de cargas (SST). [13] El único control de salud exigido es la presentación de un certificado médico ocupacional con vigencia mínima de un año (sección 100.610(a)(5)), orientado estrictamente a validar aptitudes físicas, de comunicación y visuales (visión 20/20) para el control del vuelo, sin abordar la vigilancia médica por exposición química. [13] Asimismo, la figura del tercero aparece citada de manera exclusiva en un plano de responsabilidad civil extracontractual (RCE) y pólizas obligatorias ante colisiones o daños materiales en la superficie (secciones 100.005, 100.410(a)[3] y 100.510(a)[16]), sin recibir amparo ni protección sanitaria en el texto. (13)

Por último, respecto a las modalidades de vuelo, la sección 100.330(b) habilita una condición especial de aspersión o dispersión en categoría abierta sin necesidad de autorizaciones de vuelo, para aeronaves de hasta 250 kilogramos en el despegue, siempre que se cumplan las siguientes condiciones:

- Que no se trate de una actividad remunerada ni comercial. [13]
- Que los vuelos no superen los 10 metros de altura sobre la capa vegetal. [13]
- Que la operación se ejecute estrictamente dentro de los límites del predio propio. [13]
- Que la aeronave no supere los 250 kilogramos de masa al despegue (PBMO). [13]
- Que el piloto cuente de forma obligatoria con su certificado de idoneidad y las adiciones correspondientes para la operación (aspersión y peso). [13]
- Que el operador no posea más de dos (2) aeronaves simultáneas en su flota. [13]

Las disposiciones sobre aspersión y dispersión de la normativa aeronáutica colombiana remiten de forma expresa al cumplimiento de las regulaciones nacionales sobre el uso y manejo de plaguicidas. [13] El examen pormenorizado de esta normativa sanitaria, constituida por el Decreto 1843 de 1991, modifica de manera sustancial el panorama de análisis, por cuanto establece desde hace décadas un régimen específico de protección de los trabajadores expuestos que la reglamentación aeronáutica actual no contempla. [15]

En el plano preventivo de la salud ocupacional, los artículos 111 y 112 del mencionado decreto instituyen el Carné de Aplicadores de Plaguicidas como un requisito obligatorio de idoneidad y refrendación sanitaria para todo el personal operativo de las empresas aplicadoras. [15] Asimismo, los artículos 108 al 110 imponen la obligación de contar con asistencia técnica profesional calificada —respaldada por un contrato de asesoría no inferior a 40 horas mensuales—, asignando formalmente al asistente técnico la función de vigilar tanto el uso riguroso de los elementos de protección personal como el cumplimiento oportuno de los controles y exámenes médicos ocupacionales. [15] Esta estructura protectora se complementa con el artículo 107, que obliga al empleador a suministrar de forma gratuita los equipos de aplicación y de protección individual adecuados, y con el artículo 113, que exige la contratación permanente de servicios médicos y de vigilancia toxicológica especializados para los operarios expuestos. [15]

Desde la perspectiva de la higiene industrial, destaca el artículo 100, literal b), el cual prescribe que las bases de operación aérea deben disponer de al menos dos tanques de mezcla impermeabilizados y aforados, construidos sobre el nivel del suelo, diseñados para preparar de forma segregada los herbicidas de otros agroquímicos e impedir el contacto dérmico directo o la inhalación de vapores por parte del personal de tierra. [15] Este representa un control de ingeniería con finalidad ocupacional expresa aunque con una configuración tecnológica adaptada a su época.

Conviene advertir que tanto esta disposición estructural como las obligaciones operativas del artículo 102 se ubican en el capítulo destinado a la aplicación aérea, cuyo presupuesto material de aplicación resulta crítico: el literal e) del artículo 102 prohíbe taxativamente al piloto intervenir en la manipulación física de los plaguicidas, reservando dicha fase de peligro al personal de tierra debidamente capacitado y autorizado, lo que establece una separación funcional e higiénica estricta entre la navegación aérea y el peligro químico directo. [15]

No obstante, la aplicabilidad de este régimen a las aeronaves no tripuladas (UAS) tropieza con una barrera de diseño técnico e infraestructura. La regulación de la aspersión aérea en el Decreto 1843 de 1991 fue estructurada de forma exclusiva en torno a una infraestructura física fija: el artículo 95 supedita el ejercicio de la actividad a la obtención de un permiso de operación para cada una de las pistas, previa obtención de licencia sanitaria; el artículo 96 clasifica rigurosamente las instalaciones en base principal, base auxiliar y pista auxiliar; el artículo 98 impone distancias mínimas de seguridad (100 metros laterales al eje central y 1.000 metros desde las cabeceras de las pistas) frente a zonas que requieran protección; y el artículo 101 prohíbe el uso de infraestructura aeroportuaria pública. [15] En consecuencia, la unidad de control, vigilancia y autorización del régimen no es la aeronave en sí misma ni la organización operadora, sino la pista física de aterrizaje.

De esta configuración se deriva una disyuntiva jurídica de compleja resolución práctica en el campo. El artículo 82 del decreto define con carácter taxativo únicamente dos modalidades de aplicación de plaguicidas: la aérea y la terrestre, remitiendo su control a sus respectivas disposiciones sectoriales sin contemplar categorías híbridas ni marcos adaptados a nuevas configuraciones vectoriales. [15] Si bien la aspersión mediante UAS encaja de forma natural bajo el concepto genérico de aplicación aérea, el desarrollo reglamentario de esta categoría se asocia indisolublemente a la pista física de despegue y aterrizaje; una infraestructura de la que prescinde por completo la tecnología de drones.

Este desajuste estructural genera que la operación con aeronaves no tripuladas quede conceptualmente calificada bajo el ámbito aéreo pero, al mismo tiempo, materialmente excluida de cumplir los requisitos habilitantes que dicha calificación arrastra, provocando la dilución e ineficacia práctica de las importantes salvaguardas ocupacionales y de ingeniería que el propio capítulo aéreo contiene.

Régimen preventivo laboral colombiano

En el plano preventivo laboral, un análisis léxico exhaustivo

sobre el texto del Sistema de Gestión de la Seguridad y Salud en el Trabajo (SG-SST) [17] y de la Resolución de Estándares Mínimos [30] confirma que términos críticos como dron, aeronave, no tripulada, aspersión, plaguicida, agroquímico o fumigación no presentan ninguna coincidencia dentro de sus articulados. Al carecer de una tipificación técnica específica, la aspersión agrícola mediante UAS queda subsumida bajo el régimen de prevención general. Ello no exime de responsabilidades al empleador —quien bajo el marco general está obligado a identificar peligros, evaluar riesgos y aplicar la jerarquía de controles [17] —, pero muestra que esos textos no contienen directrices de control específicas para esta configuración de exposición.

La clasificación de la actividad económica para efectos de afiliación al Sistema General de Riesgos Laborales se rige por la tabla de actividades del Decreto 768 de 2022. [26] El anexo técnico de esta norma ubica el "mantenimiento de tierras para usos agrícolas, explotación de equipo de riego agrícola, control de plagas en relación con la agricultura y la fumigación de cultivos" bajo el código ARL 2016103, con Clase de Riesgo II (Riesgo Bajo) de V, igual que otras subactividades del grupo de apoyo agrícola (CIIU 0161), como el "almacenamiento y depósito de café" (código 2016101) o la poda de árboles frutales y viñas (código 2016102). [26] Dentro del mismo grupo, la tabla sí distingue el suministro o alquiler de maquinaria agrícola con operadores (Clase IV, código 4016101) y la fumigación y fertilización aérea (Clase V, código 5016101), [26] pero no menciona las aeronaves no tripuladas, por lo que no resuelve expresamente en cuál de estas categorías se ubica una empresa que fumiga con drones. El artículo 5 prevé que, cuando una actividad no figura en la tabla, la empresa y la Administradora de Riesgos Laborales (ARL) la clasifican según la actividad más afín, atendiendo al peligro y riesgo laboral, las materias primas, los insumos, los medios de producción, los procesos, el almacenamiento y el transporte. [26]

Alcance y sujetos de protección en el ordenamiento español (Unión Europea)

En contraste, el régimen aplicable en España deriva directamente del marco común de la Unión Europea sobre utilización de aeronaves no tripuladas. [14] El artículo 2, numeral 18, del Reglamento de Ejecución (UE) 2019/947 define como persona no participante a todo sujeto que no participa en la operación del UAS o que no está al corriente de las instrucciones y las precauciones de seguridad provistas por el operador. [14] Por su propia lógica, esta definición deja fuera de los máximos niveles de protección a los trabajadores auxiliares de tierra (encargados de mezcla y carga), dado que intervienen de forma activa en la operación y conocen de antemano dichas precauciones, dejándolos al margen del amparo reglamentario previsto para terceros y transeúntes. [14]

El Reglamento de Ejecución (UE) 2019/947 reconoce formalmente la presencia de personal operativo ajeno al piloto. Las secciones sobre responsabilidades del operador, tanto en la categoría abierta (sección UAS.OPEN.050, numeral 4 del anexo) como en la específica (sección UAS.SPEC.050, literal e) del anexo), le imponen la obligación de garantizar que el personal de apoyo esté familiarizado con el manual del usuario, conozca las zonas geográficas de operación aplicables y complete de forma obligatoria una formación práctica en el puesto de trabajo desarrollada por el propio operador. [14] Sin embargo, estas exigencias se limitan de manera estricta a la instrucción e información operativa de navegación; ninguna disposición del reglamento se refiere a la evaluación de la exposición química, la dotación de protección personal o la vigilancia de la salud de estos trabajadores de tierra. [14]

Esta ausencia de salvaguardas ocupacionales no representa una laguna técnica o descuido de la norma: la seguridad y la salud en el trabajo (SST) no forman parte del ámbito material de la seguridad aérea de la Unión Europea, sino que se regulan mediante las directivas de seguridad y salud en el trabajo de la Unión, transpuestas por los Estados miembros. [36,37] El dato analítico relevante para este estudio es que el régimen aeronáutico identifica y nombra a un sujeto específico —el personal de apoyo— al que ningún marco preventivo laboral asocia a esa función; los regímenes fitosanitarios solo lo habilitan mediante un carné de aplicador.

Dos disposiciones adicionales delimitan de manera rigurosa el alcance preventivo de este marco europeo:

Aceptación explícita del riesgo (sección UAS.OPEN.050, numeral 7 del anexo): Exige al operador garantizar que, para las operaciones de las subcategorías A2 y A3, todas las personas participantes presentes en la zona de vuelo hayan sido plenamente informadas sobre los riesgos y hayan aceptado participar de forma explícita. [14]

Declaración de conformidad de la autorización (Artículo 12, apartado 2, letra c): Al solicitar una autorización operacional en la categoría específica, el operador debe aportar una declaración formal que confirme el cumplimiento de las normativas nacionales y comunitarias aplicables sobre privacidad, protección de datos, responsabilidad, protección, seguros y protección del medio ambiente, excluyendo de forma sistemática cualquier referencia a la prevención de riesgos laborales. [14]

Por su parte, el cansancio y la fatiga física o mental aparecen regulados exclusivamente para el piloto a distancia, evaluados únicamente en clave de seguridad de la navegación aérea y control del vuelo, sin trascendencia higiénica. [14] Finalmente, el artículo 4, apartado 1, letra f excluye del bajo riesgo de la categoría abierta cualquier operación de transporte de mercancías peligrosas o que implique arrojar o dejar caer material desde el aire, lo que sitúa a la aspersión agrícola con drones de manera obligatoria fuera de esta categoría y bajo las exigencias del régimen específico. [14]

En España, la aspersión con aeronaves no tripuladas queda supeditada al marco de uso sostenible de fitosanitarios (Real Decreto 1311/2012). [16] Al definir la aplicación aérea como la efectuada por cualquier medio aéreo emergente, la norma subsume a los drones bajo la prohibición general de su Capítulo VI. [16] Su autorización excepcional exige tres requisitos concurrentes: inexistencia de alternativa técnica o económica viable, plan firmado por un profesional titulado habilitado y uso exclusivo de fitosanitarios aprobados para vía aérea. [16]

Este régimen es el único de los examinados que gradúa la

habilitación según la función. Su artículo 18 establece el nivel básico de capacitación para el personal auxiliar de tratamientos terrestres y aéreos, y el nivel de piloto aplicador para quien realice tratamientos desde o mediante aeronaves, con carné expedido por la comunidad autónoma y vigencia de diez años. [16] La operación con aeronave no tripulada requiere, en consecuencia, doble habilitación diferenciada según la función desempeñada.

El Real Decreto 1311/2012 regula la fase de mezcla y carga mediante seis prácticas obligatorias: [16] cuatro de carácter ambiental (cálculo previo de dosis, prohibición de premezclas, preparación inmediatamente antes del tratamiento y distancia mínima de 25 metros a masas de agua) y dos de protección al operador (uso de dispositivos incorporadores de producto y obligatoriedad de mantener los envases cerrados en el proceso). [16] El articulado no exige de manera específica el uso de equipos de protección personal (EPP), guantes resistentes ni sistemas de transferencia cerrada (CTS). [16] Respecto de terceros, establece la señalización obligatoria y comunicación de plazos de reentrada en fincas colindantes a vías públicas, prohíbe aplicar con vientos superiores a 3 m/s y veta de forma absoluta la aspersión en parques, campos deportivos, áreas escolares y espacios utilizados por grupos vulnerables. [16]

El Real Decreto 374/2001 regula la protección laboral frente a agentes químicos -incluidos fitosanitarios- integrando las vías dérmica e inhalatoria. [31] La norma exige evaluación previa de riesgos, vigilancia de la salud e impone la jerarquía de controles priorizando medidas de ingeniería sobre la protección individual. [31] Sin embargo, presenta una limitación crítica: la obligación legal de medición se limita exclusivamente a la vía inhalatoria en la zona de respiración, omitiendo un requisito equivalente para la vía dérmica. [31]

En segundo lugar, sus anexos de valores límite ambientales y biológicos de aplicación obligatoria contienen una única entrada referida de forma exclusiva al plomo inorgánico y sus derivados iónicos, sin contemplar ninguna correspondencia para productos fitosanitarios. [31] En tercer lugar, debido a su carácter transversal y generalista, esta norma preventiva no menciona en su articulado los términos plaguicida, fitosanitario, agrícola ni aspersión, de modo que no remite formalmente al régimen de uso sostenible; [31] no obstante, este último sí reenvía de manera expresa a ella mediante su Disposición adicional cuarta, la cual supedita las acciones de uso sostenible a la vigencia y estricto cumplimiento de las normas de protección de la salud contra riesgos químicos en el trabajo. [16]

El Reglamento de los Servicios de Prevención [32] es clave para este análisis. Su artículo 4, apartado 2, letra a) obliga a reevaluar los puestos de trabajo siempre que se introduzcan nuevas tecnologías (como los drones), y su artículo 37, apartado 3, letra b) exige realizar un examen médico inicial ante nuevos riesgos (como la mezcla y carga de fitosanitarios). [32] Ambas obligaciones son de aplicación directa e inmediata.

Asimismo, su artículo 5, apartado 3 ofrece una salida legal directa al vacío técnico: dispone que, ante la falta de métodos de medición nacionales, se pueden utilizar legítimamente guías internacionales de reconocido prestigio. [32] Esta "puerta abierta" permite incorporar formalmente las metodologías de exposición de la EFSA [1] o de la OCDE [2] sin necesidad de tramitar complejas reformas legislativas. La vía de escape técnica para evitar mediciones se halla en el propio Reglamento de los Servicios de Prevención. [32] Su artículo 5 establece que, si hay una norma específica, la evaluación debe ajustarse a ella (lo que remite al régimen fitosanitario, que carece de métodos de exposición), y permite prescindir de las mediciones si una "directa apreciación profesional" considera que no son necesarias [32]. Dado que el Real Decreto 374/2001 [31] solo obliga a medir la vía inhalatoria y carece de límites para la vía dérmica, el resultado es que la vía dérmica —la única caracterizada en los estudios de campo del corpus [4] — se queda sin controles cuantitativos ni obligación legal de medirse. [31,32]

Por otra parte, la exigencia del control preventivo depende del Anexo I del Reglamento. [32] La aspersión agrícola no figura en este anexo; la única forma de ingresar en él es que el fitosanitario empleado esté clasificado como tóxico agudo (categorías 1 a 3) o CMR (1A o 1B). [32] Si el producto utilizado no cumple con esa etiqueta toxicológica, una pequeña empresa de drones queda sujeta a un régimen preventivo sumamente aligerado: [32]

- El dueño puede asumir personalmente la prevención (hasta 10 o 25 trabajadores) (Art. 11.1).
- Se permite unificar los papeles de prevención en un único documento simplificado (hasta 50 trabajadores) (Art. 2.4).
- La auditoría obligatoria se retrasa a cada 4 años en lugar de 2 (Art. 30.4).
- La formación básica del personal se reduce de 50 a 30 horas (Art. 35.2.a).

Tampoco se exige la presencia de un recurso preventivo en campo, ya que el artículo 22 bis no incluye el riesgo químico entre las actividades peligrosas que lo determinan. [32] Finalmente, en el texto de la Ley de Prevención de Riesgos Laborales [18] no existe ninguna coincidencia para los términos dron, aeronave, no tripulada, fitosanitario ni plaguicida, lo que indica que la ley general no desarrolla esta realidad tecnológica.

El régimen de autorización del producto como sede de los valores de referencia

Los marcos normativos analizados hasta aquí regulan la navegación aérea, el uso de agroquímicos o la relación laboral, pero ninguno de ellos fija los límites tolerables de exposición de los operarios en el puesto de trabajo. Esa fijación ocurre en otro lugar: el proceso de registro y autorización de cada plaguicida.

En la Unión Europea: El Reglamento (CE) 1107/2009 supedita la autorización de cada fitosanitario a que la exposición prevista de operarios, trabajadores, residentes y transeúntes no supere los niveles aceptables (AOEL/AAOEL). [19] Para calcular y estimar estos riesgos (incluyendo la vía dérmica), se aplican los modelos de la guía de la EFSA. [1] El marco de uso sostenible (transpuesto en España por el Real Decreto 1311/2012) opera "aguas abajo", regulando las condiciones de aplicación en campo, pero no fija los límites de riesgo de las sustancias. [16,29]

En Colombia: El registro nacional de plaguicidas químicos de uso

agrícola, armonizado por la Decisión Andina 436, [20] condiciona la comercialización a una evaluación previa de riesgo ocupacional, pero esta se limita a las instrucciones, advertencias y periodos de reentrada de la etiqueta del envase. [13,20] La Resolución ICA 1580 de 2022 [33] evalúa el riesgo ocupacional sobre la base de la aplicación terrestre convencional y la aviación agrícola tripulada, sin modelar la exposición dérmica específica de las operaciones con aeronaves no tripuladas. [33] La legislación no exige integrar esas instrucciones en las matrices de peligro ni en el Sistema de Gestión de la Seguridad y Salud en el Trabajo (SG-SST) de las empresas aplicadoras, [8] de modo que el valor de referencia del registro no llega al puesto de trabajo.

Matriz de cobertura comparada

El operario de mezcla y carga en tierra, sobre quien recae entre el 82 % y el 99 % de la exposición corporal potencial en la mezcla de polvo mojable, [4] recibe un tratamiento normativo heterogéneo. El marco aeronáutico colombiano (RAC 100) lo omite al regular solo a explotadores, pilotos y observadores; [13] en contraste, el estándar europeo (Reglamento 2019/947) lo clasifica como "personal de apoyo" exigiendo una formación práctica básica sin contemplar aspectos ocupacionales ni de protección química. [14] Por su parte, la reglamentación fitosanitaria colombiana (Decreto 1843/1991) exige un carné de aplicador de nivel único, [15] mientras que la española (Real Decreto 1311/2012) establece cuatro niveles de capacitación e incluye la credencial obligatoria de "piloto aplicador" para drones. [16] Finalmente, los sistemas de prevención de riesgos laborales de ambos países lo protegen únicamente bajo la figura genérica de trabajador expuesto a agentes químicos, omitiendo las condiciones operativas y ciclos de alta frecuencia característicos de los UAS. [17,31]

Las garantías técnicas en mezcla y carga presentan propósitos disímiles. El Decreto 1843 de 1991 en Colombia exige tanques impermeabilizados sobre el nivel del suelo para evitar el contacto directo y la inhalación de vapores; [15] no obstante, esta exigencia se limita a pistas físicas de aviación agrícola convencional de las que prescinde la operación con drones. [13,15] En España, el Real Decreto 1311 de 2012 impone el uso de incorporadores de producto y el cierre hermético de envases con un fin predominantemente ambiental —evitar la contaminación hídrica— sin exigir sistemas de transferencia cerrada (CTS) ni equipos de protección individual específicos para el mezclador. [16] Aunque el Real Decreto 374 de 2001 obliga legalmente a priorizar el aislamiento en origen de los agentes químicos frente a la protección individual, lo hace de forma genérica y sin referenciar el sector agrícola. [31]

A pesar de que la vía dérmica es la única caracterizada en los estudios de campo y de que, en el cargador, las manos concentran el 94 % de la exposición dérmica potencial, [4] ningún sistema normativo analizado establece valores límite de exposición para la vía dérmica. En España, el Real Decreto 374 de 2001 restringe la evaluación cuantitativa a la vía inhalatoria y reserva sus límites obligatorios exclusivamente para el plomo inorgánico. [31] En Colombia, la Resolución 312 de 2019 exime de mediciones higiénicas ambientales a las micro y pequeñas empresas al no catalogarse en clases de alto riesgo (IV y V). [30] Dado que los prestadores de servicios de drones pueden ser pequeños emprendimientos rurales clasificados en riesgo II, la principal vía de absorción química carece de referente cuantitativo y de exigencia de medición en ambos países. [30,31]

Los marcos de gestión preventiva no evalúan adecuadamente el riesgo en campo. En Colombia, el Decreto 768 de 2022 fija las obligaciones según la clase de riesgo de la actividad económica (Clase II para la fumigación de cultivos y Clase V para la fumigación y fertilización aérea), de modo que una empresa de drones asimilada a la primera queda en el régimen más aligerado, independientemente de si manipula agroquímicos de alta toxicidad. [15,26,30] En España, el Reglamento de los Servicios de Prevención (RD 39/1997) condiciona la máxima exigencia (Anexo I) a la clasificación toxicológica del producto (CMR o toxicidad aguda 1 a 3), lo que provoca que el nivel de exigencia varíe entre jornadas según la marca del fitosanitario empleado. [32] Ningún criterio integra las variables determinantes de la dosis dérmica: la masa total de ingrediente activo manipulada y la frecuencia de los ciclos de recarga por jornada. [4,5]

El dron (UAS) se integra conceptualmente en el RAC 100 de Colombia, [13] el Reglamento Europeo 2019/947, [14] el Real Decreto 1311 de 2012 (16) y el Real Decreto 374 de 2001. [31] Sin embargo, tropieza de forma insalvable con el Decreto 1843 de 1991 en Colombia. [15] Toda la estructura de control de este último supedita sus autorizaciones y salvaguardas ocupacionales a la existencia obligatoria de una pista física de aterrizaje. [15] Al prescindir la operación no tripulada de esta infraestructura aeroportuaria, las exigencias de autorización resultan inaplicables en la práctica, dejando a la aspersión con drones fuera del alcance de las garantías preventivas de ingeniería que la norma contempla. [13,15]

Discusión

Contraste de las proposiciones

Los resultados obligan a reformular la proposición que orientó el estudio. La hipótesis de partida sostenía que el vacío de cobertura derivaba de una limitación estructural compartida por los sistemas de gestión, cada uno de los cuales delimitaría su sujeto y su objeto material de forma que la exposición generada por la mediación tecnológica quedara fuera del alcance de ambos. El análisis documental no confirma esa formulación en sus términos originales. Ambos ordenamientos regulan la tarea, y el colombiano lo hace desde 1991 con finalidad ocupacional expresa, mediante controles de ingeniería sobre la mezcla, habilitación del aplicador, dotación obligatoria de protección personal y contratación de servicios médicos y toxicológicos. [15]

La proposición se sostiene, sin embargo, en una formulación distinta y más precisa: los sistemas que regulan la tarea y los que regulan la exposición del trabajador no se comunican entre sí, y la mediación tecnológica quiebra el supuesto sobre el que cada uno fue construido. En el caso español, la ausencia de remisión recíproca entre el régimen fitosanitario y el de agentes químicos deja la vía dérmica —ruta principal de la exposición— sin obligación de medición ni valor límite. En el caso colombiano, el régimen que contiene las protecciones más específicas condiciona su aplicación a una infraestructura que la tecnología no utiliza.

La disyuntiva del régimen sanitario colombiano

El resultado con mayor densidad analítica es la disyuntiva que plantea el régimen colombiano de aplicación de plaguicidas. Su artículo 82 admite dos formas de aplicación y solo dos, la aérea y la terrestre. [15] La aspersión mediante aeronave no tripulada debe necesariamente subsumirse en alguna de ellas, y ninguna de las dos ramas ofrece salida practicable.

Si se califica como aplicación aérea, resulta aplicable un régimen de autorización cuya unidad no es la aeronave ni la empresa sino la pista: permiso de operación para cada pista, licencia sanitaria previa, clasificación en base principal, base auxiliar o pista auxiliar, distancias mínimas medidas desde el eje central y desde las cabeceras, y prohibición de emplear pistas o aeropuertos públicos. Una operación que despega desde el borde del lote no puede satisfacer ninguna de esas condiciones. Si, por el contrario, no se califica como aplicación aérea, no existe categoría alternativa que la acoja dentro de una norma que se declara aplicable a toda aplicación de plaguicidas.

La primera rama conduce a la imposibilidad material de cumplimiento; la segunda, a la ausencia de encaje normativo. La distinción respecto del caso español resulta aquí nítida: allí la norma alcanza a la tecnología por una cláusula abierta y la somete a prohibición general con autorización excepcional; aquí la norma no puede alcanzarla porque su presupuesto de aplicación es una infraestructura ajena a la tecnología. No se trata, en consecuencia, de un vacío idéntico con distinto grado de desarrollo, sino de dos fallas de naturaleza diferente que convergen en un mismo vacío: la ausencia de valor límite dérmico exigible en el lugar de trabajo.

La separación funcional entre piloto y manipulador

El mismo el estatuto colombiano establece entre las obligaciones del piloto en aplicación aérea la de abstenerse de intervenir en la manipulación de plaguicidas, tarea reservada a personal capacitado y autorizado. [15] La disposición consagra una separación funcional entre quien opera la aeronave y quien manipula el producto, coherente con la evidencia posterior sobre la concentración de la exposición en la fase de mezcla y carga.

La única observación de campo disponible en el corpus documenta, sin embargo, una configuración distinta de la que esa prohibición presupone: en la empresa observada son los propios operadores habilitados como pilotos quienes preparan la mezcla del producto. [8] La acumulación de ambas funciones en la misma persona no constituye, por tanto, una hipótesis teórica, sino una configuración registrada en una empresa con licencia de aspersión.

De verificarse esa misma configuración en operaciones desarrolladas en Colombia, la práctica resultaría incompatible con una prohibición vigente desde hace más de tres décadas. El presente estudio no dispone de evidencia sobre la configuración efectiva de las operaciones colombianas, por tratarse de un diseño documental y por proceder la observación disponible de un contexto geográfico distinto, de modo que la inferencia se formula en términos condicionales y se propone como línea de continuidad para investigación con trabajo de campo.

Clasificación del riesgo y desactivación indirecta de obligaciones

Un tercer resultado permite observar cómo la desprotección puede producirse por interacción entre normas antes que por omisión de alguna de ellas. La fumigación de cultivos se clasifica en el Sistema General de Riesgos Laborales colombiano en clase de riesgo II de V, la misma que corresponde a otras subactividades del grupo, entre ellas el almacenamiento y depósito de café y la poda de árboles frutales; [26] la fumigación y fertilización aérea, en cambio, figura en la clase V. [26] La tabla no menciona las aeronaves no tripuladas ni distingue la naturaleza del producto manipulado.

Esa clasificación produce un efecto que excede el ámbito de la cotización. Los estándares mínimos del sistema de gestión reservan a las empresas de más de cincuenta trabajadores o clasificadas en riesgo IV o V los únicos dos ítems referidos a la identificación de sustancias cancerígenas y a la realización de mediciones ambientales. [30] Una empresa de aspersión de pequeño tamaño clasificada en riesgo II queda, por efecto combinado de ambas normas, exenta de las dos únicas obligaciones del sistema colombiano en materia de gestión de agentes químicos. La clasificación no solo reduce el aporte destinado a financiar las actividades de promoción y prevención sobre esa población: desactiva por vía indirecta las obligaciones que la protegerían.

El ordenamiento español produce un efecto equivalente por una vía inversa. El anexo I del reglamento de los servicios de prevención, que determina la intensidad del régimen aplicable, no contiene entrada alguna referida a la aplicación de productos fitosanitarios: la única puerta de acceso es la clasificación toxicológica del producto empleado. [32] Dado que el marco europeo de autorización de sustancias activas ha venido restringiendo progresivamente las de clasificación más severa, cabe plantear como hipótesis que un número creciente de operaciones quede fuera del anexo y, con ello, sujeta al régimen aligerado en materia de asunción personal de la prevención, documentación simplificada, periodicidad de auditoría y horas de formación básica. El régimen preventivo se relaja en función de la toxicidad intrínseca del producto, mientras la exposición del operador auxiliar depende además de la cantidad manipulada y de la frecuencia de los ciclos de mezcla, precisamente las variables que la operación con aeronave no tripulada incrementa por su capacidad de depósito reducida y su empleo de volúmenes ultrarreducidos. [5]

Colombia asigna así un régimen estable que no asciende, aunque el producto sea altamente tóxico, y España un régimen variable que impide configurar un esquema preventivo constante para el puesto. Ambos criterios omiten la magnitud efectiva de la exposición.

El fenómeno ilustra con precisión lo que la sociología del riesgo ha denominado irresponsabilidad organizada: [22] un conjunto de instituciones que producen la apariencia de control mediante sistemas certificables, auditables y provistos de indicadores, sobre riesgos que sus propias categorías no alcanzan a nombrar. Ninguna de las normas concurrentes omite deliberadamente la protección; el resultado agregado de su interacción es, no obstante, la ausencia de ella.

Obligaciones existentes sin contenido técnico ejecutable

El examen del reglamento español de los servicios de prevención matiza de forma relevante la caracterización del vacío. Las obligaciones necesarias existen y son directamente aplicables: la introducción de nueva tecnología obliga a reevaluar los puestos afectados, la asignación de tareas con nuevos riesgos obliga a una evaluación inicial de la salud del trabajador, y el procedimiento de evaluación puede incorporar criterios técnicos externos cuando la normativa no los concrete. [32] El ordenamiento anticipó el cambio tecnológico en abstracto y previó el mecanismo para absorberlo.

Lo que no existe es el contenido técnico que ese mecanismo debería incorporar. No se identificaron normas técnicas nacionales ni guías del instituto competente sobre evaluación de la exposición dérmica en aplicación con aeronave no tripulada, no existe valor límite dérmico exigible en el lugar de trabajo, y la obligación de medición se restringe a la vía inhalatoria, [31] que ninguno de los estudios primarios del corpus determinó. [4] A ello se suma que el propio reglamento permite prescindir de las mediciones cuando la apreciación profesional acreditada lo justifique. [32]

La obligación, en consecuencia, no está ausente: está vacía de contenido ejecutable. Un servicio de prevención que reevaluara el puesto tras la incorporación de la aeronave carecería de criterio cuantitativo con el que valorar la exposición dérmica del operador auxiliar, que es donde la evidencia sitúa el problema. Esta caracterización difiere de la del caso colombiano, donde la norma que contiene las protecciones más específicas resulta inaplicable por su presupuesto de infraestructura. En España la norma alcanza la operación, pero no dispone de instrumento para evaluarla; en Colombia el instrumento existe pero la norma que lo contiene no alcanza la operación.

La paradoja de la protección personal en clima tropical

La evidencia disponible converge en señalar los elementos de protección personal como la medida de control de mayor rendimiento: una prenda certificada combinada con guantes resistentes a productos químicos reduce la exposición dérmica del operador de mezcla en más del noventa y ocho por ciento. [4] Esa conclusión, sin embargo, se enfrenta a una restricción de contexto documentada por la propia literatura: en las regiones tropicales los aplicadores no emplean habitualmente dichos elementos, precisamente por la incomodidad que suponen bajo condiciones de calor y humedad elevados. [7]

Esa restricción no es meramente hipotética. La observación de campo disponible registró el empleo de guantes de nitrilo y mascarilla con filtro, pero también de ropa larga de uso diario en lugar de prenda certificada, [8] precisamente el elemento cuya combinación con guantes resistentes a productos químicos alcanza las reducciones de exposición corporal recogidas en el apartado de resultados. [4]

De ello se sigue una consecuencia relevante para el caso focal. La única medida de control que la evidencia respalda con mayor solidez es también la de menor adherencia esperable en el contexto colombiano, y ninguno de los sistemas normativos examinados incorpora esa restricción climática en su diseño. La jerarquía de controles aplicable a esta operación no puede, en consecuencia, descansar sobre la protección individual: exige controles de ingeniería sobre la fase de mezcla, como los sistemas de transferencia cerrada, que ninguno de los seis sistemas exige.

El vacío señalado por la propia literatura primaria

La necesidad de adaptación normativa no constituye una inferencia de este estudio. Los autores de uno de los trabajos de campo que sustentan el perfil de exposición señalan expresamente que los responsables de las políticas se enfrentan al reto de actualizar la normativa para abordar las particularidades de las aplicaciones con aeronave no tripulada, estableciendo potencialmente nuevos límites de exposición y especificando los tipos de protección personal necesarios para los operadores de mezcla, de carga y para los pilotos. [4] La producción científica que genera los datos de exposición identifica, por tanto, la misma laguna que el presente análisis documenta en el plano normativo, y propone como respuesta precisamente los dos elementos cuya ausencia se ha constatado: valores límite y especificación de protección diferenciada por función.

Los mismos autores advierten que los datos disponibles resultan insuficientes para concluir qué cantidad de residuo se desprende de las superficies de la aeronave, como los brazos o las baterías, hacia las manos del operador que la manipula o cambia las baterías durante la aplicación. [4] Esa insuficiencia coincide con la celda no documentada del perfil de riesgo presentado en la Tabla 3.

Consecuencias prácticas de esta estructura

1. Inexistencia de controles dérmicos en el puesto de trabajo: Aunque existe un límite numérico de seguridad dérmica, este se fija de forma aislada producto por producto durante su autorización científica de laboratorio. Al usuario final solo se le traslada en forma de recomendaciones escritas en la etiqueta, pero no se traduce en una obligación patronal de realizar evaluaciones higiénicas o mediciones ambientales ni en un valor límite de aplicación general para la empresa.

2. Modelos teóricos desfasados de la realidad: Las estimaciones de seguridad oficial se apoyan en modelos matemáticos calibrados de forma exclusiva para técnicas de aplicación agrícolas convencionales. Al introducir la tecnología de drones, las mediciones empíricas reales en las fases críticas de mezcla y carga documentan, en un estudio de viñedo, niveles que pueden superar los previstos por los modelos oficiales de referencia. [5]

El ordenamiento colombiano replica la desconexión técnica del marco europeo, según se describió en Resultados: el registro nacional [20] y la Resolución ICA 1580 de 2022 [33] no se articulan con el régimen laboral, lo que diluye su eficacia preventiva en campo. [8]

Al no modelar las dinámicas de exposición dérmica específicas de las operaciones con drones (UAS), el contenido de las etiquetas resulta inadecuado u obsoleto para esta tecnología. [13,33] Así, la vulnerabilidad del operario no deriva de la ausencia de límites toxicológicos, sino de un régimen de registro comercial

desvinculado de la normativa laboral y aeronáutica. [8,13,20,33]

La zona de desprotección operativa

La falta de protección real del operador de drones y su ayudante de mezcla no radica en la ausencia de límites cuantitativos de riesgo, sino en su desconexión del entorno de trabajo:

1. El valor numérico de seguridad vive en un régimen regulatorio (el de registro químico de productos) que no dialoga con el preventivo laboral ni con el aeronáutico.

2. El límite se expresa como una advertencia impresa en el envase del producto fitosanitario y no como una obligación de vigilancia higiénica activa en el puesto de trabajo.

3. El sistema descansa sobre modelos de exposición teóricos que no incluyen la operación con drones, ignorando factores reales como la alta concentración de la mezcla y los repetitivos ciclos operativos de carga en tierra.

El vacío común y los criterios de alerta temprana

Más allá de las diferencias de cada ordenamiento, esta investigación identifica un vacío crítico que ninguno de los sistemas examinados resuelve: la ausencia de un valor límite de exposición para la vía dérmica.

Mientras la evidencia científica muestra que las manos concentran entre el 52 % y el 94 % de la exposición dérmica potencial del operador auxiliar según la tarea con drones, [4] y que las manos concentran el 73 % de la exposición dérmica potencial en operarios de mezcla y carga de arrozales, [3] la normativa preventiva de agentes químicos limita la obligación de medición únicamente a la vía inhalatoria. [31]

Esta contradicción genera una paradoja regulatoria: la norma exige medir la única vía que la evidencia de campo no ha caracterizado, y deja sin vigilar la vía dérmica, que es donde realmente se concentra el contaminante. Cabe precisar que esta discrepancia responde a una asimetría de medición metodológica —los autores de los estudios primarios decidieron no medir la vía inhalatoria por diseño experimental, no por imposibilidad física— y no a una demostración empírica de su inocuidad.

Al encontrarse la aspersión agrícola con drones en una fase inicial de despliegue, esta configuración constituye un vacío prospectivo: una zona de exposición real desprotegida cuya casuística de daños a la salud aún no se ha consolidado en las estadísticas. Por esta razón, los hallazgos de este estudio se orientan a la formulación de criterios de alerta temprana antes que a proponer medidas correctivas sobre daños ya materializados.

Cuatro criterios se derivan directamente del análisis. El primero es la incorporación de la frecuencia de ciclos de mezcla y carga por jornada como variable explícita de la evaluación de riesgo, por ser el factor que explica que la exposición del operador auxiliar pueda superar los modelos de referencia establecidos para métodos convencionales. El segundo es el reconocimiento de la fase de mezcla y carga como puesto de trabajo diferenciado del pilotaje, con requisitos de habilitación, protección y vigilancia propios. El tercero es el establecimiento de un mecanismo de remisión recíproca entre el régimen que regula la manipulación del producto y el que regula la exposición del trabajador, cuya ausencia constituye el eslabón faltante en ambos ordenamientos. El cuarto, derivado del análisis del reglamento español de los servicios de prevención, es la elaboración de una guía técnica que permita dar contenido a la obligación de reevaluación ya existente, por ser esta la vía de menor costo normativo para cerrar el vacío identificado.

Los hallazgos convergen con la teoría sobre regulación de tecnologías emergentes: ilustran el dilema de Collingridge (38) y la brecha de ritmo normativo, [39] donde adscribir la norma a la infraestructura conduce a la obsolescencia. [40] Esta dinámica se manifiesta en la exigencia colombiana de pistas en desuso, los vacíos técnicos españoles para reevaluar puestos y las barreras climáticas al EPP. Así, la brecha no deriva de la ausencia de norma sino de su desarticulación técnica, ratificando el carácter de riesgo emergente [9] y la necesidad de armonizar los regímenes aeronáutico y fitosanitario. [34]

Limitaciones

La interpretación de los hallazgos está condicionada por seis limitaciones.

1) La literatura se identificó por rastreo de estudios semilla en bases regionales (SciELO, Redalyc, AGRIS), omitiendo repositorios inaccesibles (LILACS, Web of Science, CAB Abstracts).

2) El alcance documental evalúa la cobertura legal formal sin verificar el cumplimiento operativo real.

3) La evidencia sobre exposición proviene de contextos no latinoamericanos con magnitudes absolutas heterogéneas, restringiendo la validez al análisis de razones internas por función.

4) La mitad de los estudios primarios tiene vinculación con la industria fitosanitaria, adoptándose la versión del texto ante la errata en la Fig. 5a de la fuente. [4]

5) La falta de mediciones inhalatorias confiables traslada el perfil de riesgo íntegramente a la vía dérmica.

6) La triangulación fue parcial debido a un corpus técnico no normativo incompleto, asentando las conclusiones en el articulado legal y acotando la falta de valores límite al ámbito del puesto de trabajo.

Conclusiones

La desprotección ocupacional ante los riesgos emergentes de la aspersión agrícola con drones no deriva de un vacío normativo, sino de la fragmentación entre subsistemas jurídicos desarticulados y de la quiebra de sus supuestos constitutivos. Por un lado, el régimen español restringe la evaluación a la vía inhalatoria y a la clasificación toxicológica del producto, omitiendo la exposición

dérmica evidenciada y la magnitud operacional. Por otro, el marco sanitario colombiano supedita sus salvaguardas a infraestructuras de pista inoperantes para esta tecnología, inhabilitando la ejecución práctica de controles de ingeniería en la mezcla y la separación funcional de roles. En consecuencia, la mediación tecnológica no introduce un peligro químico inédito, sino que evidencia la obsolescencia de categorías preventivas concebidas para configuraciones técnicas que han dejado de ser las únicas.

El sujeto sobre el que recae la mayor parte de la exposición -el operador auxiliar de mezcla y carga- recibe tratamiento desigual y en ningún caso suficiente. No es reconocido por el régimen aeronáutico colombiano; es reconocido por el europeo solo a efectos de formación; es habilitado mediante carné por los sistemas de plaguicidas de ambos países, con distinto grado de especificidad; y es alcanzado por los sistemas preventivos laborales únicamente como trabajador genérico. Ninguno de los seis sistemas establece para él valor límite de exposición dérmica exigible en el lugar de trabajo, obligación de medición de esa vía ni vigilancia de la salud específica. El único referente cuantitativo de exposición del operador reside en el régimen de autorización del producto, desconectado de los anteriores.

Junto a la exposición química, el corpus documenta peligros propios de la tecnología asociados a las baterías de la aeronave: residuos de producto en su superficie, que el piloto manipula en cada ciclo de vuelo, y calentamiento en jornadas calurosas. Ambos están descritos de forma cualitativa y sin cuantificar, por lo que no permiten por ahora valorar su cobertura normativa.

Respecto de los terceros, la evidencia disponible indica una exposición inferior a la estimada por los modelos de referencia; la tesis de desprotección se sostiene, por tanto, con mayor solidez para el operador auxiliar que para los terceros, cuya cobertura normativa permanece sin evaluación empírica suficiente.

Recomendaciones por actor: al Ministerio del Trabajo, incorporar la frecuencia de ciclos de mezcla y carga y el puesto de mezcla y carga como criterios de evaluación y vigilancia en el SG-SST y revisar la clasificación de riesgo II de la fumigación; al Ministerio de Salud y al ICA, desvincular las protecciones ocupacionales del Decreto 1843/1991 de su presupuesto de pista y evaluar el riesgo ocupacional de la aplicación con aeronaves no tripuladas en el registro y en las etiquetas (Resolución ICA 1580/2022); a la Aerocivil, reconocer al personal de apoyo de mezcla y carga en el RAC 100 y remitir a la normativa sanitaria y laboral; y a las Administradoras de Riesgos Laborales (ARL), clasificar de forma explícita a las empresas que fumigan con aeronaves no tripuladas según el peligro y los productos manipulados, conforme al artículo 5 del Decreto 768 de 2022, [26] y priorizar el puesto de mezcla y carga en sus actividades de asesoría y prevención.

El cierre de esta brecha de desprotección exige, antes que nueva legislación, articular la normativa existente, dotar de densidad técnica sus obligaciones e independizar las protecciones ocupacionales colombianas del presupuesto de infraestructura aeroportuaria. Aunque salvaguardas clave -como los controles de ingeniería en la mezcla, la acreditación por funciones, el aislamiento del agente y la vigilancia epidemiológica- residen ya en los ordenamientos examinados, su eficacia se frustra por la ausencia de cláusulas de remisión que garanticen su concurrencia operacional. Finalmente, dado el alcance estrictamente normativo de este análisis, la verificación empírica de las dinámicas en campo, la división del trabajo entre piloto y manipulador y los riesgos emergentes por baterías constituyen la línea de investigación futura que estos hallazgos fundamentan.

Conflicto de interés

Los autores declaran que no existe ningún conflicto de interés, real o potencial, que haya podido influir en el desarrollo, los resultados o la interpretación de este trabajo.

Fuentes de financiación

Esta investigación no recibió financiación de ninguna agencia pública, comercial o sin ánimo de lucro. Fue realizada íntegramente con recursos propios del autor.

Contribución de autoría:

Al tratarse de un trabajo de autoría única, el autor asume la totalidad de las contribuciones: concepción y diseño de la investigación, recolección y análisis de la información, redacción del manuscrito, revisión crítica del contenido y aprobación de la versión final.

Declaración de originalidad

El autor declara que el presente documento es original e inédito, que no ha sido publicado previamente ni parcial ni totalmente, que no se encuentra en proceso de evaluación en ninguna otra revista científica nacional o extranjera, y que todas las fuentes consultadas se encuentran debidamente citadas y referenciadas conforme a la norma Vancouver. El autor se responsabiliza del contenido del documento en su versión final.

Declaración sobre uso de herramientas de asistencia

El autor empleó Connected Papers, Perplexity AI y ChatGPT (OpenAI) en la localización de fuentes; NotebookLM (Google) en la organización del material bibliográfico; Grammarly en la revisión gramatical; y Claude (Anthropic) en la estructuración metodológica, la redacción de apartados y la verificación de coherencia interna. La lectura y el fichaje de la literatura, el examen del articulado normativo, la identificación de los vacíos de cobertura y la formulación de las conclusiones corresponden íntegramente al autor, quien verificó personalmente todas las fuentes en su versión original y asume plena responsabilidad por el contenido del manuscrito.

Referencias

1. Charistou A, Coja T, Craig P, Hamey P, Martin S, Sanvido O, et al. Guidance on the assessment of exposure of operators, workers, residents and bystanders in risk assessment of plant protection products. EFSA J. 2022; 20(1): e07032. Doi: 10.2903/j.efsa.2022.7032

2. Organisation for Economic Co-operation and Development. Guidance document for the conduct of studies of occupational exposure to pesticides during agricultural application. Paris: OECD; 1997. (OECD Series on Testing and Assessment; No. 9; OCDE/

GD(97)148). Available from: https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2002/05/guidance-document-for-the-conduct-of-studies-of-occupational-exposure-to-pesticides-during-agricultural-application_g1gh2b45/9789264078079-en.pdf

3. Kuster CJ, Kohler M, Hovinga S, Timmermann C, Hamacher G, Buerling K, et al. Pesticide exposure of operators from drone application: a field study with comparative analysis to handheld data from exposure models. ACS Agric Sci Technol. 2023; 3(12): 1125-30. Doi: 10.1021/acsagscitech.3c00253

4. Felkers E, Kuster CJ, Hamacher G, Anft T, Kohler M. Pesticide exposure of operators during mixing and loading a drone: towards a stratified exposure assessment. Pest Manag Sci. 2026; 82(8): 7218-24. Doi: 10.1002/ps.8574

5. Sánchez-Fernández L, Díaz-García F, Pérez-Ruiz M, Sandin-España P, Alonso-Prados JL, Mateo-Miranda M, et al. Dermal exposure of operators, bystanders and residents derived from unmanned aerial spraying systems (UASS) in vineyard. Drones. 2025; 9(5): 345. Doi: 10.3390/drones9050345

6. Wu WT, Chen JM, Chang YY, Lin SD, Chen ST, Hung YT. Assessing the effectiveness of mitigating pesticide-related disease risk among pesticide-spraying drone operators in Taiwan. Am J Ind Med. 2024; 67(2): 110-118. Doi: 10.1002/ajim.23551

7. Yan X, Zhou Y, Liu X, Yang D, Yuan H. Minimizing occupational exposure to pesticide and increasing control efficacy of pests by unmanned aerial vehicle application on cowpea. Appl Sci. 2021; 11(20): 9579. doi: 10.3390/app11209579.

8. Arıcak F. Drone use in agricultural spraying: an examination in terms of occupational health and safety. Turk J Agric Food Sci Technol. 2025; 13(3): 664-668. Doi: 10.24925/turjaf.v13i3.664-668.7230

9. European Agency for Safety and Health at Work. Emerging risks. Bilbao: EU-OSHA. citado 30 de julio de 2026. Disponible en: https://osha.europa.eu/en/emerging-risks

10. Lorduy J. Mercado de drones toma cada vez más vuelo: proyectan más de 500 compañías certificadas en los próximos años. Portafolio. 15 abr 2026. citado 7 oct 2026; Industrias. Disponible en: https://www.portafolio.co/negocios/industrias/mercado-de-drones-toma-cada-vez-mas-vuelo-proyectan-mas-de-500-companias-certificadas-en-los-proximos-anos-492051

11. Acosta AC. Conozca la regulación y normas legales vigentes para vuelo de drones en Colombia. Asuntos Legales. 19 oct 2021. citado 7 oct 2026. Disponible en: https://www.asuntoslegales.com.co/consumidor/conozca-la-regulacion-y-normas-legales-para-el-vuelo-de-drones-en-colombia-3248829

12. Instituto Nacional de Salud. Comportamiento de las intoxicaciones agudas por sustancias químicas en Colombia en el 2022. Boletín epidemiológico semanal. 2023; semana epidemiológica 17. Disponible en: https://www.ins.gov.co/buscador-eventos/BoletinEpidemiologico/2023_Bolet%C3%ADn_epidemiologico_semana_17.pdf

13. Aeronáutica Civil de Colombia. RAC 100: operación de sistemas de aeronaves no tripuladas UAS. Bogotá: Aeronáutica Civil de Colombia; 2024. Citado: 27 de septiembre de 2023.

14. Unión Europea. Comisión Europea. Reglamento de Ejecución (UE) 2019/947 de la Comisión, de 24 de mayo de 2019, relativo a las normas y los procedimientos aplicables a la utilización de aeronaves no tripuladas [Internet]. Diario Oficial de la Unión Europea, L 152 (11 de junio de 2019), p. 45-71. citado 30 de julio de 2026. Disponible en: https://eur-lex.europa.eu/eli/reg_impl/2019/947/oj?locale=es

15. Colombia. Presidencia de la República. Decreto 1843 de 1991, por el cual se reglamentan parcialmente los Títulos III, V, VI, VII y XI de la Ley 09 de 1979, sobre uso y manejo de plaguicidas. Bogotá: Secretaría Jurídica Distrital; 1991. citado 30 de julio de 2026. Disponible en: https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=114357

16. España. Ministerio de la Presidencia. Real Decreto 1311/2012, de 14 de septiembre, por el que se establece el marco de actuación para conseguir un uso sostenible de los productos fitosanitarios. Boletín Oficial del Estado, N.º 223 (15 de septiembre de 2012). citado 30 de julio de 2026. Disponible en: https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2012-11605

17. Colombia. Presidencia de la República. Decreto 1072 de 2015, por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Trabajo. Diario Oficial No. 49.523 (26 de mayo de 2015). citado 30 de julio de 2026. Disponible en: https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=62506

18. España. Jefatura del Estado. Ley 31/1995, de 8 de noviembre, de Prevención de Riesgos Laborales. Boletín Oficial del Estado, N.º 269 (10 de noviembre de 1995). citado 30 de julio de 2026. Disponible en: https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-1995-24292

19. Unión Europea. Parlamento Europeo y Consejo. Reglamento (CE) n.º 1107/2009, de 21 de octubre de 2009, relativo a la comercialización de productos fitosanitarios y por el que se derogan las Directivas 79/117/CEE y 91/414/CEE del Consejo. Diario Oficial de la Unión Europea, L 309 (24 de noviembre de 2009), p. 1-50. https://www.boe.es/doue/2009/309/L00001-00050.pdf

20. Comunidad Andina. Decisión 436: Norma Andina para el Registro y Control de Plaguicidas Químicos de Uso Agrícola. Gaceta Oficial del Acuerdo de Cartagena n.º 347 (11 de junio de 1998). citado 7 de octubre de 2026. Disponible en: https://www.senasa.gob.pe/senasa/wp-content/uploads/jer/NORMASANDINASSOBREPLAGUICIDAS/Decisi%C3%B3n%20436%20norma%20andina%20para%20el%20regsitro%20y%20control%20de%20plaguicidas.pdf

21. Gómez López AN, Vallejo-Morán LA, López-Mallama OM. Análisis de las metodologías para la evaluación y valoración del riesgo químico en el trabajo: una revisión de alcance. Rev Colomb Salud Ocupacional. 2025; 15(2): e-12587. doi: 10.18041/2322-634X/rcso.2.2025.12587

22. Beck U. Ecological politics in an age of risk. Cambridge: Polity Press; 1995.

23. Asociación Española de Normalización. UNE-EN ISO 45001:2018. Sistemas de gestión de la seguridad y salud en el trabajo. Requisitos con orientación para su uso. Madrid: AENOR; 2018.

24. Yin RK. Case study research and applications: design and methods. 6.ª ed. Thousand Oaks: SAGE Publications; 2018.

25. Lijphart A. Comparative politics and the comparative method. Am Polit Sci Rev. 1971; 65(3): 682-693. Doi: 10.2307/1955513

26. Colombia. Ministerio del Trabajo. Decreto 768 de 2022, por el cual se actualiza la Tabla de Clasificación de Actividades Económicas para el Sistema General de Riesgos Laborales y se dictan otras disposiciones. Bogotá D.C.: Ministerio del Trabajo; 2022. citado 2026 Oct 8. Disponible en: https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=123517

27. Zweigert K, Kötz H. Introduction to comparative law. Weir T, traductor. 3.ª ed. Oxford: Clarendon Press; 1998.

28. Bowen GA. Document analysis as a qualitative research method. Qual Res J. 2009; 9(2): 27-40. Doi: 10.3316/QRJ0902027

29. Unión Europea. Parlamento Europeo y Consejo. Directiva 2009/128/CE, de 21 de octubre de 2009, por la que se establece el marco de la actuación comunitaria para conseguir un uso sostenible de los plaguicidas. Diario Oficial de la Unión Europea, L 309 (24 de noviembre de 2009), p. 71-86. https://www.boe.es/doue/2009/309/L00071-00086.pdf

30. Colombia. Ministerio del Trabajo. Resolución 0312 de 2019, por la cual se definen los Estándares Mínimos del Sistema de Gestión de la Seguridad y Salud en el Trabajo SG-SST. Bogotá: Secretaría Jurídica Distrital; 2019. citado 30 de julio de 2026. Disponible en: https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=82666

31. España. Ministerio de la Presidencia. Real Decreto 374/2001, de 6 de abril, sobre la protección de la salud y seguridad de los trabajadores contra los riesgos relacionados con los agentes químicos durante el trabajo. Boletín Oficial del Estado, N.º 104 (1 de mayo de 2001). citado 30 de julio de 2026. Disponible en: https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2001-8436

32. España. Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales. Real Decreto 39/1997, de 17 de enero, por el que se aprueba el Reglamento de los Servicios de Prevención. Boletín Oficial del Estado, N.º 27 (31 de enero de 1997). citado 30 de julio de 2026. Disponible en: https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-1997-1853

33. Instituto Colombiano Agropecuario. Resolución No. 00001580 de 2022, por la cual se establecen los requisitos y el procedimiento para el registro de los fabricantes, formuladores, envasadores, distribuidores, importadores y/o exportadores de los plaguicidas químicos de uso agrícola, así como los requisitos para el registro de plaguicidas químicos de uso agrícola y otras disposiciones. Bogotá D.C.: ICA; 2022. citado 2026 Oct 8. Disponible en: https://www.ica.gov.co/getattachment/47f7d0ad-5c7c-4361-b4ad-c55badb7ee7b/2022R1580.aspx

34. Bošković B, Vranić N, Stević IM, Gligorević K, Šunjevarić M, Grujić B, et al. Regulatory challenges and frameworks for UAV-based chemical applications in agriculture. ISAE 2025 Proceedings. 2025; 154-162. Doi: 10.5937/ISAE25154B

35. Lincoln YS, Guba EG. Naturalistic inquiry. Beverly Hills: Sage Publications; 1985.

36. Consejo de las Comunidades Europeas. Directiva 89/391/CEE del Consejo, de 12 de junio de 1989, relativa a la aplicación de medidas para promover la mejora de la seguridad y de la salud de los trabajadores en el trabajo. Diario Oficial de las Comunidades Europeas. 1989 Jun 29; L183: 1-8. citado 2026 Oct 8. Disponible en: https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=DOUE-L-1989-80648

37. Consejo de la Unión Europea. Directiva 98/24/CE del Consejo, de 7 de abril de 1998, relativa a la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores contra los riesgos relacionados con los agentes químicos durante el trabajo. Diario Oficial de las Comunidades Europeas. 1998 May 5;L131:11-23. citado 2026 Oct 8. Disponible en: https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=DOUE-L-1998-80770

38. Collingridge D. The social control of technology. Londres: Frances Pinter; 1980.

39. Marchant GE, Allenby BR, Herkert JR, editores. The growing gap between emerging technologies and legal-ethical oversight: the pacing problem. Dordrecht: Springer; 2011. 212 p.

40. Moses LB. How to think about law, regulation and technology: problems with "technology" as a regulatory target. Law Innov Technol. 2013;5(1):1-20. Doi: 10.5235/17579961.5.1.1

© Universidad Libre. 2026. Licence Creative Commons CC-by-nc-sa/4.0. https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en