PROTECCIÓN DE CULTIVOS CON DRONES

FUNDAMENTOS TÉCNICOS Y BUENAS PRÁCTICAS



Revisión bibliográfica y experiencias prácticas

2026

casafe
Cámara de Sanidad Agropecuaria y Fertilizantes

INTA
Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria
Argentina

senasa
SERVICIO NACIONAL DE SANIDAD Y CALIDAD AGROALIMENTARIA

EFA
EDITORIAL FACULTAD AGRONOMÍA
UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES

Elorza, Federico Martín
Protección de cultivos con drones : fundamentos técnicos y buenas prácticas / Federico Martín Elorza.
1a ed. - Ciudad Autónoma de Buenos Aires : Editorial Facultad de Agronomía, 2026.
Libro digital, PDF

Archivo Digital: descarga y online
ISBN 978-987-3738-77-7

1. Cultivos. 2. Agricultura. I. Título.
CDD 630

EDITORIAL FACULTAD DE AGRONOMÍA
Universidad de Buenos Aires
Directora: Dra. Betina Kruk

Reservados todos los derechos.
Permitida la reproducción o uso tanto en español o en cualquier otro idioma, para uso público o privado, siempre que se cite la fuente y se comunique a la editorial y sus autores.
ISBN 978-987-3738-77-7

EFA
EDITORIAL FACULTAD AGRONOMÍA
UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES

Email: efa@agro.uba.ar | Teléfono: 54-11-5287-0221
Av. San Martín 4453, Buenos Aires, Argentina | Pabellón Parodi
Sitio web: efa.agro.uba.ar

AUTOR Y EDITOR:

Ing. Agr. Esp. Federico Martín Elorza (CASAFE)

COLABORADORES ESPECIALES:

Lic. María Belén Aguer (RIZOBACTER), **Ing. Agr. Juan Pablo Timpone** (RIZOBACTER), **Ing. Agr. Martín Rainaudo** (BANBURUBÍ) e **Ing. Agr. Eduardo Vita Larrieu** (INTA – FCA-UNR).

REVISIÓN Y EDICIÓN TÉCNICA:

Dra. Magdalena Sosa Beláustegui (BASF), **Ing. Agr. Pablo Benedit** (BAYER), **Ing. Agr. Alejandro Brunori** (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria - INTA), **Ing. Agr. Alejandra Casella** (INTA), **Ing. Agr. Ramiro Cid** (Red BPA), **Ing. Agr. Marcelo Hoyos** (BASF), **Ing. Agr. Betina Kruk** (FAUBA), **Ing. Agr. Mariana López** (BAYER), **Lic. Magalí López Manetto** (CASAFE), **Ing. Agr. Emilio Martini** (SYNGENTA), **Ing. Agr. Eduardo Moavro** (Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación), **Ing. Agr. Matías Molteni** (CORTEVA), **Ing. Agr. Jorgelina Montoya** (INTA), **Ing. Agr. Pablo Reyna** (TECNOMYL), **Ing. Agr. María Sol Muñoz** (CASAFE), **Lic. (Mg) Gabriela Tallarico** (INTA), **IRNyMA (Mg) Luis Emanuel Visentini** (INTA), **Ing. Agr. Eduardo Vita Larrieu** (INTA – FCA-UNR), **Equipo técnico DIRABIO** (SENASA) y **Task Force de Drones** de CASAFE.

DISEÑO GRÁFICO Y EDITORIAL:

Sol Boechi y **Diego Pousadela** (ESTUDIO SOMA).

CITA SUGERIDA:

Elorza, F.M. (2026). *Protección de Cultivos con Drones: Fundamentos Técnicos y Buenas Prácticas. Revisión bibliográfica y experiencias prácticas. Editorial de la Facultad de Agronomía, UBA (EFA).*

casafe Cámara de Sanidad Agropecuaria y Fertilizantes

INTA Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria Argentina

senasa SERVICIO NACIONAL DE SANIDAD Y CALIDAD AGROALIMENTARIA

APOYOS:

BOLSA DE COMERCIO DE ROSARIO

BPA RED DE BUENAS PRÁCTICAS AGROPECUARIAS

CPIA Consejo Profesional de Ingeniería Agronómica de la República Argentina

FeDIA Federación de Distribuidores de Insumos Agropecuarios

Resumen

Este documento constituye el primer esfuerzo integral en la República Argentina para codificar las Buenas Prácticas Agrícolas (BPA) aplicadas a Aeronaves Pilotadas a Distancia (RPA). Su valor reside en la convergencia de una revisión bibliográfica exhaustiva de la literatura científica internacional, como puede ser la OECD, ASABE o ISO, entre otros, con la validación operativa de campo realizada por expertos nacionales. Esta revisión bibliográfica analizó variables críticas como la dinámica del flujo descendente *(downwash)*, el régimen de vuelo traslacional y la supervivencia de la gota bajo condiciones micrometeorológicas variables. De la revisión realizada, se concluye que el éxito de la aplicación no depende únicamente de la precisión espacial del dron, sino de la armonización de ocho parámetros fundamentales: altura de vuelo, velocidad de avance, número y tamaño de gota, volumen de aplicación, ancho de faja, condiciones meteorológicas y compatibilidad y preparación de la mezcla. Se establece que el *downwash* es el principal vector de transporte de las gotas producidas hacia el objetivo, sin embargo, su eficacia disminuye con el aumento de la altura de vuelo y con velocidades de avance excesivas. Se ha validado un rango de altura de 2 a 4 m sobre el canopeo y velocidades que varían según el tamaño del equipo, evitando siempre superar el umbral del vuelo traslacional (30-45 km/h) donde se reduce la penetración vertical en el cultivo. En términos de seguridad ambiental, esta publicación define límites operativos estrictos: vientos de 3 a 15 km/h, un Delta T entre 2 y 8, y la prohibición absoluta de aplicar bajo condiciones de inversión térmica. Respecto al número y el tamaño de las gotas, se establece que el número de gotas por cm^2 es el definido por Syngenta (2002) y SENASA (2014), mientras que el tamaño de las gotas debe ser siempre mayor a 200 micrones, evitando superar los 450 micrones como límite máximo. En cuanto a la gestión de la deriva, tanto la evidencia científica recopilada (Xue *et al.*, 2014; Wang *et al.*, 2020a; Wang *et al.*, 2020b; OECD, 2021; Bonds *et al.*, 2024) como la experiencia personal y de los expertos de las compañías registrantes de los fitosanitarios permite recomendar una zona de seguridad de 30 m. Esta distancia asegura que, bajo el cumplimiento de las BPA y el uso de configuraciones conservadoras, el perfil de deriva de un dron sea equiparable al de una pulverizadora terrestre convencional. Finalmente, el documento subraya la necesidad de una trazabilidad documental rigurosa y la profesionalización del personal a cargo de la operación. La implementación de protocolos de validación en campo mediante tarjetas hidrosensibles y el registro de telemetría son presentados como los pilares para garantizar la transparencia, la seguridad de los operarios y la convivencia social en entornos productivos. Este libro proporciona, por tanto, el marco técnico necesario para estandarizar una tecnología que promete transformar la sanidad vegetal con criterios de precisión y sostenibilidad ambiental.

Palabras claves: **Buenas Prácticas Agrícolas (BPA); Aeronaves Pilotadas a Distancia (RPA); tecnología de aplicación; deriva; downwash.**

Índice



Resumen | PÁG. 03

Prólogo | PÁG. 06

1 De qué hablamos cuando hablamos de "aplicar bien" | PÁG. 08

2 Normativa argentina | PÁG. 11

2.1 Rol de ANAC | PÁG. 11
2.2 Categoría Abierta | PÁG. 13
2.3 Consideraciones clave para la operación segura | PÁG. 14
2.4 Rol del SENASA | PÁG. 14
2.5 Normativa provincial y municipal | PÁG. 15
2.6 Registro de aplicaciones | PÁG. 16
2.7 Consideración normativa | PÁG. 16

3 Sistemas de aspersión y selección de boquillas | PÁG. 18

3.1 Boquillas hidráulicas (Sistemas por presión) | PÁG. 18
3.2 Atomizadores rotativos (Sistemas centrífugos) | PÁG. 20
3.3 Interacción con el objetivo y el ambiente | PÁG. 19

4 Introducción al control remoto de un dron pulverizador | PÁG. 24

5 Fundamentos físicos esenciales para una toma de decisiones | PÁG. 27

6 Parámetros que afectan la eficiencia y eficacia de las aplicaciones | PÁG. 30

6.1 Altura de vuelo | PÁG. 30
6.2 Velocidad de avance | PÁG. 32
6.3 Tamaño de gotas | PÁG. 34
6.4 Número de impactos por centímetro cuadrado (gotas/cm^2) | PÁG. 36
6.5 Compatibilidad y Preparación de Mezclas para RPA | PÁG. 37
6.6 Volumen de aplicación | PÁG. 40
6.7 Ancho de franja o faja | PÁG. 43

Índice



7 Condiciones meteorológicas y ventanas de aplicación | PÁG. 46

7.1 El comportamiento dinámico de los parámetros meteorológicos | PÁG. 46

7.2 Temperatura y Humedad Relativa (HR) | PÁG. 47

7.3 Delta T: el indicador de supervivencia de la gota | PÁG. 47

7.4 Velocidad del viento | PÁG. 48

7.5 El índice Kp y la seguridad de navegación | PÁG. 49

7.6 Gestión de ventanas operativas y eficiencia agronómica | PÁG. 51

8 Cómo se ejecuta una misión prolija | PÁG. 53

8.1 Estructura del equipo operativo y la gestión de la seguridad | PÁG. 53

8.2 Validación operativa: el ensayo en campo | PÁG. 54

9 Gestión del riesgo de deriva en aplicaciones con RPA | PÁG. 57

9.1 Altura de vuelo: la variable de mayor sensibilidad | PÁG. 57

9.2 Velocidad de avance y estabilidad del viento | PÁG. 58

9.3 Tamaño de gotas y atomización | PÁG. 58

9.4 Volumen de aplicación, tamaño de gotas y uso de coadyuvantes | PÁG. 59

9.5 Ancho de faja | PÁG. 60

9.6 Gestión de condiciones meteorológicas críticas | PÁG. 60

9.7 Recomendaciones de distancias de seguridad | PÁG. 61

10 Seguridad del operador | PÁG. 64

10.1 Seguridad con baterías de litio | PÁG. 65

10.2 Criterios de selección y delimitación del sitio operativo | PÁG. 66

10.3 Organización de la estación de trabajo y comunicación | PÁG. 66

10.4 Responsabilidad social y transparencia | PÁG. 67

10.5 Resguardo documental y la mejora continua | PÁG. 67

11 Consideraciones finales | PÁG. 70

12 Bibliografía | PÁG. 74

Prólogo

Existen numerosas ocasiones en las cuales la intervención convencional sobre un lote se dificulta. Ya sea por la falta de piso, oportunidades de control estrechas o las limitaciones de la maquinaria de pulverización terrestre (por su peso, daño mecánico o complejidad logística), muchas veces el uso de las herramientas tradicionales se ve limitado o tiene restricciones operativas, por lo que no resulta eficaz. Lo mismo ocurre en terrenos irregulares con pendientes pronunciadas, en cultivos de gran porte como frutales y forestales, o cuando los aviones o los equipos terrestres no están disponibles. Asimismo, es una alternativa eficaz si el uso de la mochila resulta insuficiente o se busca disminuir la exposición del operario.

En estos escenarios el dron[1] -un sistema de aplicación aérea no tripulado, que la normativa argentina llama RPA (Aeronave Pilotada a Distancia, por sus siglas en inglés)- ofrece una respuesta concreta. Alcanza los lugares donde otros no llegan e interviene cuando la oportunidad agronómica es pequeña o el terreno es complejo. Todo esto lo realiza con una precisión espacial que evita el pisoteo, la compactación y las trayectorias innecesarias. Pero cabe una advertencia: un dron no es "una licencia para improvisar". Es un vector de aplicación y, por lo tanto, exige parámetros precisos para su empleo seguro y eficaz. Toda aplicación, independientemente del tipo de equipo elegido, debe descansar en siete decisiones simultáneas: el tamaño (µm - micrones) y número de gotas (gotas/cm^2), el volumen de caldo (L/ha), la altura (m), la velocidad de vuelo (km/h), el ancho de faja (m) y la ventana meteorológica que permite que esas gotas lleguen al blanco con mayor probabilidad. A esto se suma un factor menos vistoso, pero igual de decisivo: la mezcla de tanque. La eficacia de un tratamiento comienza, en gran medida, dentro del tanque.

Este texto busca orientar sobre las Buenas Prácticas Agrícolas (BPA) en el empleo de drones e identificar puntos sensibles: qué mirar, por qué hacerlo y cómo decidir tanto en "días fáciles", cuando las condiciones, tanto meteorológicas como micrometeorológicas son óptimas y, sobre todo, cómo no equivocarse en "días difíciles". Este documento está dirigido a aplicadores, productores y asesores de la República Argentina; no tiene fines comerciales ni busca promover marcas de equipos o accesorios.

A lo largo de los capítulos, encontrarán una voz que habla desde la experiencia del lote, pero que simultáneamente se mantiene estrictamente alineado con la evidencia científica y la normativa regulatoria. Donde la norma y la etiqueta mandan, este libro lo acata; donde la meteorología condiciona, este libro propone criterios para adaptarse a la circunstancia; donde la convivencia social pide sensibilidad (periurbanos, escuelas, apiarios, cursos de agua, lotes vecinos), este libro brinda un modo de proceder que tiende a reducir conflictos potenciales. El texto no es un recetario, sino que propone criterios para tomar decisiones con la serenidad de las cosas bien hechas.

Esta publicación constituye una revisión bibliográfica exhaustiva de la literatura científica nacional e internacional, integrada y validada con la experiencia operativa de campo de sus autores y colaboradores.

[1] Las denominaciones Dron, RPA, VANT (Vehículo Aéreo No Tripulado) y UAVs (Unmanned Aerial Vehicules) se tomarán como sinónimos en este documento.



01 DE QUÉ HABLAMOS CUANDO HABLAMOS DE “APLICAR BIEN”

1. De qué hablamos cuando hablamos de “aplicar bien”

Aplicar bien no es sólo “pegarle a la plaga” (eficacia), sino también con mínima perdida de gotas por deriva (eficiencia). Es hacerlo cuando realmente es necesario, a tiempo, con eficacia de control biológico, reduciendo potenciales daños colaterales para las personas, cultivos vecinos, fauna o fuentes de agua. Además, requiere una trazabilidad documental rigurosa que registre el escenario de la operación: localización, metodología, condiciones meteorológicas y productos utilizados. En la operación con drones, la tentación es pensar que la electrónica y el software resolverán todo. No es así. El dron ofrece dos ventajas fundamentales: la oportunidad operativa y la precisión espacial. Lo demás depende de la gestión de las personas: la decisión agronómica de intervención, la interpretación meteorológica en tiempo real, la homogeneidad de la mezcla o caldo de pulverización, el criterio para elegir el espectro de gota y el volumen de la aplicación, la disciplina operativa para mantener la altura y velocidad configuradas, y la determinación profesional para abortar la operación cuando las condiciones ambientales dicen 'hoy no'.

El mapa mental del aplicador debe seguir una secuencia jerárquica:

1.	**EL OBJETIVO**	**el profesional de la agronomía debe identificar la adversidad que se pretende controlar y determinar dónde y cómo deberán depositarse las gotas.**
2.	**LA ETIQUETA (MARBETE)**	**considerada la "ley técnica" del producto.**
3.	**METEOROLOGÍA EN EL LOTE** (MICROMETEOROLOGÍA)	**para la toma de decisiones, la lectura de las condiciones ambientales debe realizarse en tiempo real en el sitio de aplicación y no en pronósticos previos.**
4.	**PARÁMETROS OPERATIVOS**	**el ajuste de las variables del equipo debe realizarse en función de la realidad ambiental imperante al momento de la intervención y de la técnica de aplicación propuesta en función de la necesidad de penetración en el cultivo, ubicación de la adversidad a controlar y el tipo de producto y/o mezcla a aplicar.**
5.	**VERIFICACIÓN**	**validación de los resultados obtenidos.**

Esta secuencia que parece obvia, no lo es cuando el tiempo apremia. El oficio se mide en cuántas veces se respeta la secuencia anterior, aun con el teléfono sonando.

En este punto, la regulación es clave para realizar una aplicación eficiente y eficaz. Para ello, el criterio agronómico es el que manda siempre. No se puede aplicar "de manual", sino que se debe con conocer la biología de la plaga y del cultivo, el equipo de aplicación con el que se cuenta y el momento del día en que se realizará dicha aplicación.

El cumplimiento de estos puntos asegura que se realice bien una aplicación o, dicho de otra manera, utilícense garantiza la implementación de las Buenas Prácticas Agrícolas en la aplicación de productos fitosanitarios con drones.



02 NORMATIVA ARGENTINA

2. Normativa argentina[2]

La aplicación de fitosanitarios con drones en la Argentina cuenta con un marco normativo tripartito que articula regulaciones aeronáuticas, fitosanitarias y provinciales. La **Resolución ANAC 550/2025**[3] habilita la operación en zona rural bajo la Categoría Abierta con requisitos simplificados, mientras que el SENASA y las jurisdicciones locales establecen condiciones técnicas y legales de cumplimiento. El cumplimiento de estas normativas no solo garantiza la legalidad de la operación, sino que constituye el primer pilar de las Buenas Prácticas Agrícolas (BPA).

2.1 Rol de ANAC

En la Argentina, es legal la pulverización agrícola de productos fitosanitarios con drones, y se encuentra regulada, entre otros, por la Administración Nacional de Aviación Civil (ANAC) a través de la Resolución 550/2025, que establece un marco normativo integral para las operaciones con aeronaves no tripuladas (RPA; anteriormente conocidas como VANT - Vehículos Aéreos No Tripulados).

Esta normativa se organiza actualmente en tres Partes de las Regulaciones Argentinas de Aviación Civil (RAAC):

- **RAAC Parte 100/2026 (requisitos generales);**
- **RAAC Parte 101/2025 (categoría abierta);**
- **RAAC Parte 102/2025 (categoría específica).**

En el Tabla 1 se presenta un resumen de los principales parámetros y condiciones establecidos por la Resolución ANAC N.º 550/2025 para cada categoría operativa.

[2] Este material refleja la normativa vigente al momento de su publicación. Se recomienda verificar actualizaciones en los organismos competentes.

[3] Resolución ANAC 550/2025: https://www.argentina.gob.ar/anac/nuevo-marco-normativo-para-la-operacion-de-drones.

Tabla 1. *Resumen de los parámetros y condiciones establecidos en la Resolución ANAC Nro. 550/2025, según cada categoría. Fuente: Elaboración propia en base a la Resolución ANAC 550/2025 y las RAAC 100/2026, 101/2025 y 102/2025. CTR: Zona de control (Aeródromos Controlados y no Controlados). VLOS: Operación con visibilidad directa. BVLOS: Operación sin visibilidad directa. AGL: Altura sobre el nivel del terreno.*

PARÁMETRO /CONDICIÓN (según RAAC 100)	CATEGORÍA ABIERTA (RAAC 101)	CATEGORÍA ESPECÍFICA (RAAC 102)	CATEGORÍA CERTIFICADA (FALTA RAAC)
MTOW (peso máximo al despegue)	< 25 kg o sin límite de peso si es en zona rural, excluyendo espacios aéreos restringidos o prohibidos.	≥ 25 kg y < 150 kg. También aplica a RPAS de menos de 25 kg que no cumplan los requisitos de la categoría Abierta.	≥ 150 kg
Zona de operación	**Rural exclusiva, fuera de CTR, restringidas, prohibidas**	**CTR, restringidas, prohibidas, áreas cercanas a aeródromos controlados o no**	**Cualquiera (pero requiere certificación de aeronave)**
Altura máxima	≤ 122 mts. (400 ft) AGL en espacio aéreo no controlado	> 122 mts. (400 ft) AGL en espacio aéreo controlado (con coordinación)	Según certificado
Tipo de vuelo	VLOS (contacto visual)	BVLOS (fuera de línea visual) o VLOS con condiciones especiales	Cualquiera según certificación
Sobre personas	Solo con consentimiento o si participan de la operación	Multitudes o personas no participantes (con autorización)	Según certificación
Autorización previa ANAC	No	Sí, **basada en evaluación de riesgos** (escenario estándar o específico)	Sí, más certificación de aeronave
Uso típico	**Uso Recreativo y Bajo Riesgo**	**Profesional y Alto Riesgo**	**Carga Pesada**
Registro	**Declaración Jurada Digital** gratuita y voluntaria ante el Registro Nacional de Aeronaves	**Obligatorio** y previo al inicio de las operaciones	**Obligatorio** a través de la registración convencional de aeronaves tripulados
Licencia de piloto remoto	Voluntaria	Obligatoria	Obligatoria
Certificado Médico Aeronáutico (CMA)	Opcional	Obligatorio	Obligatorio
Registro aeronave	Voluntario (DJ digital gratuita con matrícula LV-R)	Obligatorio (matrícula LV-R)	Obligatorio (matrícula LV-RC)
Seguro (Responsabilidad civil)	No obligatorio y Voluntario	Obligatorio	Obligatorio
CETA (Certificado Explotador Trabajo Aéreo)	No aplica	Obligatorio si es operación comercial	Obligatorio
Manual de Operaciones (MO) y SGR	No aplica	Obligatorio si se requiere CETA	Obligatorio
Responsabilidad	El piloto, explotador y propietario son responsables por los daños, incluso si la certificación es voluntaria	El explotador, propietario y tripulación remota tienen la responsabilidad de acuerdo al Código Aeronáutico	El explotador, propietario y tripulación remota tienen la responsabilidad de acuerdo al Código Aeronáutico
Ejemplo típicos	Fotografía aérea recreativa en campo rural, inspección de cultivos VLOS	Inspección de infraestructura en ciudad, aplicación agrícola BVLOS, vuelos cerca de aeródromos	Operaciones con drones pesados de gran porte

2.2 Categoría Abierta

Una de las principales novedades incorporadas por esta regulación es la creación de la Categoría Abierta, pensada para operaciones realizadas en zonas rurales, salvo que operen en espacios restringidos y/o prohibidos y de las zonas de control (Controlled Traffic Region o CTR, por sus siglas en inglés) de los aeródromos controlados y no controlados; lejos de personas que no están involucradas en este proceso y de áreas urbanas o sensibles.

Dentro de esta categoría, la normativa establece que no se requiere licencia de piloto, matrícula de la aeronave, Certificado de Explotador de Trabajo Aéreo (CETA) ni la presentación de un Manual de Operaciones (MOE). No exige licencia de piloto remoto, pero sí conocimientos básicos de espacio aéreo y normativa, los cuales podrán adquirirse de forma gratuita a través de la ANAC. El cumplimiento normativo para esta modalidad se limita al registro de la aeronave ante la ANAC a través de su plataforma digital. No obstante, ello, al solo efecto declarativo los explotadores deberán consignar los datos técnicos del RPA/RPAS y los datos personales del operador, mediante una declaración jurada digital ante el Registro Nacional de Aeronaves, con carácter gratuito" (100.04 - Categorías operacionales con RPA/RPAS).

Aunque la normativa permite operar sin mayores exigencias en esta categoría, se recomienda, pero no se exige, que los operadores cuenten con ciertos elementos, los cuales tienen carácter voluntario:

➔ **Licencia de Piloto de RPA (Remotely Piloted Aircraft):** recomendada para profesionalizar la actividad y acreditar competencias técnicas.

➔ **Matrícula del dron:** permite identificar formalmente el equipo ante la ANAC.

➔ **Seguro de Responsabilidad Civil:** la normativa establece que el propietario del dron será responsable económica y penalmente por lo que pueda suceder con el RPA, por lo que se recomienda fuertemente contar con este seguro.

Se debe aclarar que muchas aseguradoras pueden declinar un siniestro si el operador no cumple con los requisitos de idoneidad (licencia de piloto vigente y CMA).

Requisitos para volar en espacio aéreo controlado

Estos requisitos son obligatorios si se desea operar en la Categoría Específica (RAAC Parte 102), que aplica a escenarios con mayores riesgos o en zonas urbanas, cerca de personas o infraestructura crítica. A estos se le adiciona el Certificado de Explotador de Trabajo Aéreo (CETA), para lo cual se deberá presentar, además de lo expresado anteriormente, el MOE (Manual de Operaciones del Explotador), que es un documento que detalla los procedimientos internos, especialmente relevante para actividades comerciales a gran escala y un Sistema de gestión de riesgos (SGR), que establece cómo responderán los empleados y la empresa frente a un incidente/accidente (Tabla 1).

En todos los casos es responsabilidad del explotador asegurarse que la aeronave, sus sistemas, equipos, accesorios y demás componentes se mantengan en condiciones seguras de operación, conforme las indicaciones de los fabricantes y los estándares técnicos aplicables (RAAC Sub-parte 100.23)

2.3 Consideraciones clave para la operación segura

El apartado 137.100, inciso b), de la RAAC 137 (2026), establece como principio fundamental que toda operación de aplicación debe realizarse sin generar riesgos para personas ni bienes en superficie. Asimismo, impone la obligación de respetar las instrucciones de uso establecidas en la etiqueta o marbete del producto fitosanitario. En consecuencia, la implementación de las Buenas Prácticas Agrícolas (BPA) en las aplicaciones de fitosanitarios realizadas con drones constituye un elemento esencial para garantizar tanto la seguridad operacional como el cumplimiento de las disposiciones regulatorias vigentes.

Por ende, se recomienda que los operadores respeten los principios de seguridad aérea y agrícola incluyendo:

- **Realizar vuelos lejos de viviendas, escuelas y poblaciones, lo cual dependerá de las normativas locales vigentes.**
- **No superar la altura de 120 metros, ni operar más allá del alcance visual del piloto (VLOS[4] 200 m).**
- **Aplicar productos fitosanitarios únicamente en condiciones meteorológicas adecuadas (considerando la dirección e intensidad del viento, humedad relativa y temperatura, Delta T).**
- **Garantizar el uso de equipos de protección personal (EPP) durante el manejo de los productos fitosanitarios.**

2.4 Rol del SENASA

Una parte fundamental del marco regulatorio que rige la autorización de uso de productos fitosanitarios con drones en Argentina corresponde al SENASA (Servicio Nacional de Sanidad y Calidad Agroalimentaria).

Este organismo establece con precisión qué usos de los productos fitosanitarios están autorizados y cuáles no, a través de la información consignada en los marbetes o etiquetas de cada producto registrado **(Res. SENASA 373/2026[5])**. Es importante remarcar que las especificaciones allí detalladas, tales como el tamaño de gota requerido, el volumen de aplicación, las condiciones de viento permitidas o la obligatoriedad de utilizar determinados coadyuvantes, entre otras, no constituyen recomendaciones, sino **condiciones técnicas de cumplimiento obligatorio.**

A su vez, la Resolución 869 (2026) de este ente regulador, sobre «Nuevas autorizaciones para el uso de fitosanitarios», faculta a las provincias a solicitar la extensión de uso de un determinado producto fitosanitario no contemplado en su etiqueta para habilitar la aplicación mediante RPA. Dicha autorización no se incorporará en el etiquetado físico, sino que el SENASA la aprobará por vía administrativa y publicará periódicamente los listados autorizados en su página web.

[4] VLOS (Visual Line of Sight o Línea de Vista Visual, en español): es la normativa básica que obliga al piloto a mantener contacto visual directo y continuo con el dron a simple vista, sin ayuda de prismáticos ni cámaras, para garantizar la seguridad. El piloto debe ver el dron en todo momento para evitar obstáculos (árboles, cables, personas) y reaccionar ante emergencias.

[5] Resolución SENASA 373/2026: https://www.argentina.gob.ar/normativa/nacional/norma-425153.

En consecuencia, **si la etiqueta no contempla de manera expresa la posibilidad de aplicar el producto mediante sistemas con RPA/RPAs (aeronaves pilotadas a distancia o Sistemas de aeronaves pilotadas a distancia), y no se encuentra en el listado publicado por SENASA, dicha modalidad de aplicación no se encuentra legalmente habilitada**, más allá de que sería técnicamente incorrecto extrapolar usos de otros sistemas de aplicación (revisar normativas vigentes al respecto). El respeto estricto de estas disposiciones resulta esencial tanto desde el punto de vista normativo como técnico-operativo.

2.5 Normativa provincial y municipal

Además del marco normativo nacional, existen regulaciones complementarias dictadas a nivel provincial y/o municipal que pueden establecer exigencias adicionales para la realización de aplicaciones. Estas jurisdicciones están facultadas para fijar condiciones específicas tales como:

- **Distancias mínimas de resguardo respecto de zonas sensibles (por ejemplo, establecimientos educativos, áreas urbanizadas o cursos de agua);**
- **Horarios habilitados para pulverizar;**
- **Obligación de realizar avisos previos a autoridades o vecinos;**
- **Colocación de cartelería informativa en el área de trabajo;**
- **La presencia de un sistema de fiscalización, a través de un fiscalizador/observador de la aplicación o un sistema electrónico inteligente que realice la tarea.**

En consecuencia, es necesario que se revisen específicamente los requisitos que cada provincia/municipio establece, a fines de evitar controversias interprovinciales.

Un aspecto central que depende de la normativa provincial es la Receta Agronómica Obligatoria. En las provincias donde se encuentra reglamentada, funciona un Colegio o Consejo Profesional de Ingenieros Agrónomos, cuyos matriculados son los únicos habilitados para emitir dicha receta. Este documento constituye un requisito indispensable tanto para la adquisición como para la aplicación de productos fitosanitarios y su tenencia resulta obligatoria en toda operación alcanzada por la normativa vigente.

Debido es todos estos puntos, resulta necesario que se revisen específicamente los requisitos que cada provincia establece antes de realizar una operación de aplicación de fitosanitarios con RPAs, con el fin de evitar controversias interprovinciales.

Diferenciación técnica frente a la aviación agrícola tripulada

Un punto importante para tener en cuenta es la diferencia que existe entre un sistema de aplicación con drones y uno con aviones. Tanto la aerodinámica de vuelo como los efectos sobre la distribución de las gotas son particulares en cada caso; la generación de los vórtices, que proyectan activamente el caldo hacia el objetivo responde a distintas dinámicas.

Esta diferencia mecánica, sumada a una altura de vuelo y a velocidades de avance diferentes, hace que el perfil de deriva de un RPA sea distinto al de una aeronave de ala fija. Por lo tanto, **la legislación no debe equiparar ambas tecnologías bajo un mismo marco regulatorio sobre distancias**. Tratar al dron como un avión deja de lado la evidencia técnica y/o científica que demuestra que, bajo condiciones de BPA, el comportamiento de la gota de un RPA es más cercano al de una pulverización terrestre que al de la aviación convencional, justificando así zonas de amortiguamiento técnicas, específicas y diferenciadas (Xue *et al.*, 2014; Elorza y Moavro, 2020; Wang *et al.*, 2020a; Wang *et al.*, 2020b; OECD, 2021; Antuniassi *et al.*, 2022; Donaldson, 2023; Bonds *et al.*, 2024).

2.6 Registro de aplicaciones

Finalmente, se recomienda que toda operación de aplicación con drones cuente con una carpeta de misión debidamente conformada y actualizada.
Esta documentación debería incluir:

- **Habilitaciones correspondientes;**
- **Pólizas de seguro vigentes;**
- **Manuales técnicos del equipo;**
- **Receta agronómica emitida por el profesional interviniente;**
- **Marbete del producto a aplicar;**
- **Plan de vuelo programado;**
- **Registros meteorológicos del día (temperatura, humedad relativa, velocidad y dirección del viento y Delta T).**

Al cierre de la jornada se deberá incorporar el registro detallado de la actividad efectivamente realizada, incluyendo:

- **Fotografías de tarjetas hidrosensibles;**
- **Mapas o reportes de vuelo generados por el sistema;**
- **Cualquier otra documentación técnica relevante.**

La adecuada organización y conservación de esta carpeta no solo refleja profesionalismo y cumplimiento normativo, sino que constituye una herramienta clave ante eventuales inspecciones o reclamos, ya que posibilita demostrar que la aplicación se efectuó conforme a la normativa vigente y bajo criterios técnicos adecuados.

En este contexto, el uso responsable de la tecnología, el respeto por la normativa vigente y la adecuada documentación de cada operación constituyen pilares fundamentales para garantizar aplicaciones seguras, legales y técnicamente respaldadas.

2.7 Consideración normativa

Las referencias normativas incluidas en esta publicación corresponden a la legislación vigente al momento de su elaboración. Dado que el marco regulatorio aplicable a las aplicaciones con drones puede modificarse o actualizarse con el tiempo, se recomienda a los lectores verificar periódicamente la normativa vigente antes de realizar cualquier operación. Esta revisión resulta fundamental para asegurar el cumplimiento de las disposiciones legales aplicables y de los principios establecidos por las Buenas Prácticas Agrícolas (BPA).



03 SISTEMAS DE ASPERSIÓN Y SELECCIÓN DE BOQUILLAS

3. Sistemas de aspersión y selección de boquillas

La elección del sistema de aspersión es el punto crítico donde la prescripción técnica se transforma en gotas físicas. En la tecnología de RPA actual, coexisten dos sistemas con dinámicas de fluidos, formas de calibración y regulación completamente distintas: las boquillas hidráulicas de presión y los atomizadores rotativos (centrífugos), aunque actualmente, en su mayoría, los equipos que están pulverizando y los diseños que actualmente propone el mercado cuentan con atomizadores rotativos, de distintos diseños entre marcas y dentro de modelos para la misma marca.

3.1 Boquillas hidráulicas (Sistemas por presión)

Tradicionalmente utilizadas en modelos más antiguos y de porte pequeño y medio, (ej. DJI Agras T20 o T30, ver Imagen 1), estas boquillas funcionan forzando el paso del líquido a través de un orificio cerámico, plástico o metálico. El tamaño de gota está directamente ligado a la presión de la bomba y al diámetro y forma del orificio.

Estas boquillas se rigen por el estándar internacional ASABE S572.3, el cual clasifica el espectro de gotas en categorías, desde "Extra Fina" hasta "Ultra Gruesa" (ASABE, 2025). Para modificar el espectro de gotas, el operador debe intervenir físicamente el equipo mediante el recambio de la boquilla. Cabe mencionar que este tipo de Unidades Formadoras de Gotas (UFG), pueden producir un espectro de gotas de mayor tamaño que los sistemas centrífugos de pulverización.

La velocidad de avance del RPA influye directamente en la atomización; cuando la aeronave se desplaza a velocidades elevadas, el flujo de aire relativo impacta sobre el patrón de abanico, pudiendo generar una rotura o fragmentación secundaria de las gotas (Lefebvre y McDonell, 2017) y aumentando el riesgo de deriva. Por este motivo, para estabilizar la trayectoria del caldo frente a la turbulencia generada por los rotores y el desplazamiento, se recomienda el uso de boquillas de inducción de aire (antideriva), siempre que el equipo lo permita. Bajo este criterio técnico, el empleo de diámetros de gota "Extremadamente Gruesos" permite contrarrestar las fuerzas de fricción y ruptura del aire. Esta configuración asegura que la aplicación se mantenga dentro de los parámetros de seguridad ambiental, siempre que se respete el límite máximo operativo de 15 km/h de viento establecido en este libro para el cumplimiento de las BPA.

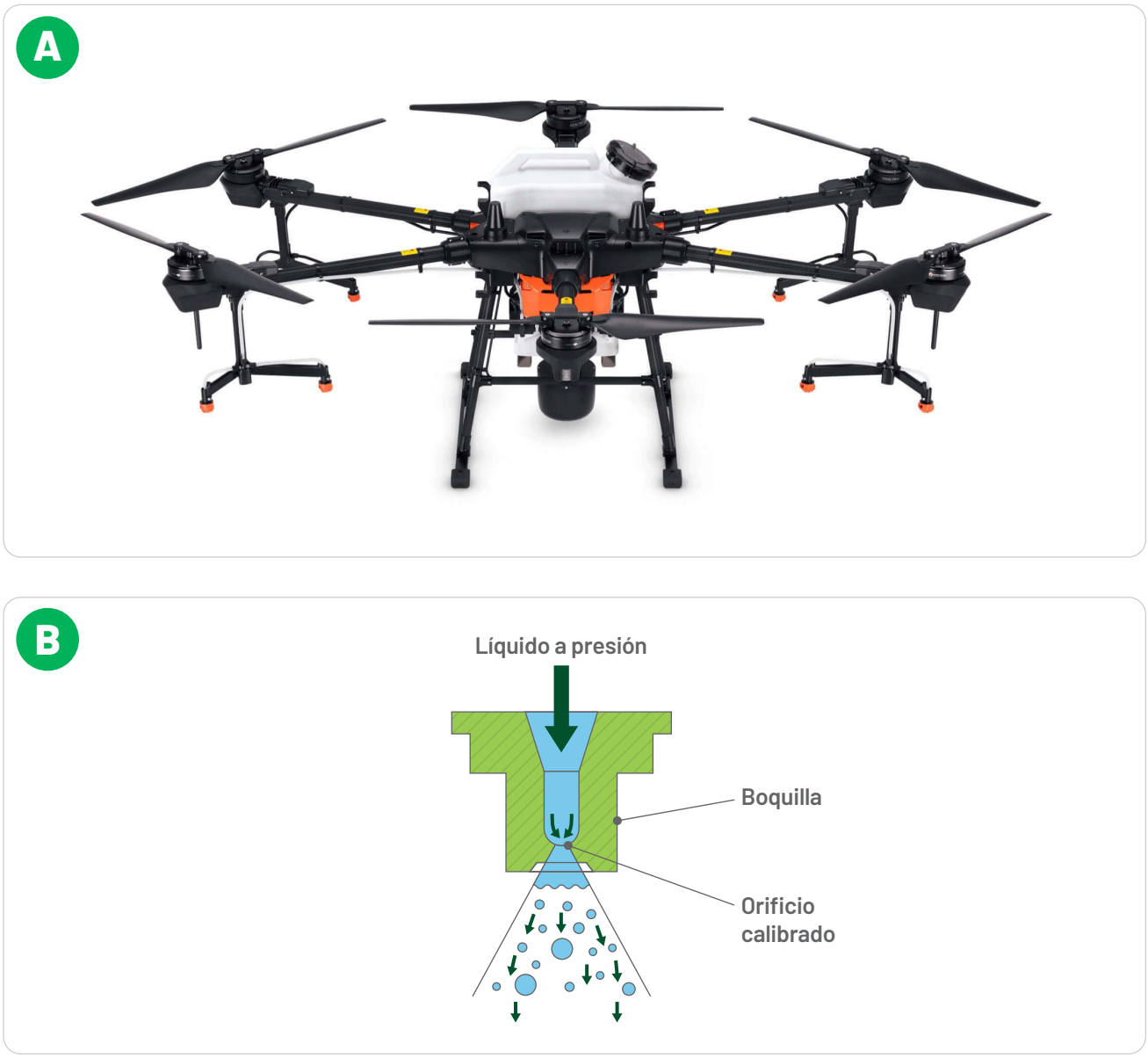


Imagen 1. *Sistemas hidráulicos de pulverización. a) Dron hexacóptero DJI AGRAS T20 con sistemas hidráulicos de pulverización. b) Esquema de un corte transversal de una pastilla o boquilla hidráulica de pulverización donde se observa la rotura del líquido de aplicación y la producción de gotas, por presión. Fuente: a) DJI. b) Teejet (2023).*

3.2 Atomizadores rotativos (Sistemas centrífugos)

Esta tecnología es la predominante en drones de nueva generación y porte medio y grande, como por ejemplo el DJI Agras T40, T50, T100 (ver Imagen 2) Los modelos de XAG, vienen, la mayoría con la capacidad de tener atomizadores rotativos, incluso los de menor porte. En este sistema, el líquido se deposita sobre un disco dentado que gira a altas revoluciones.

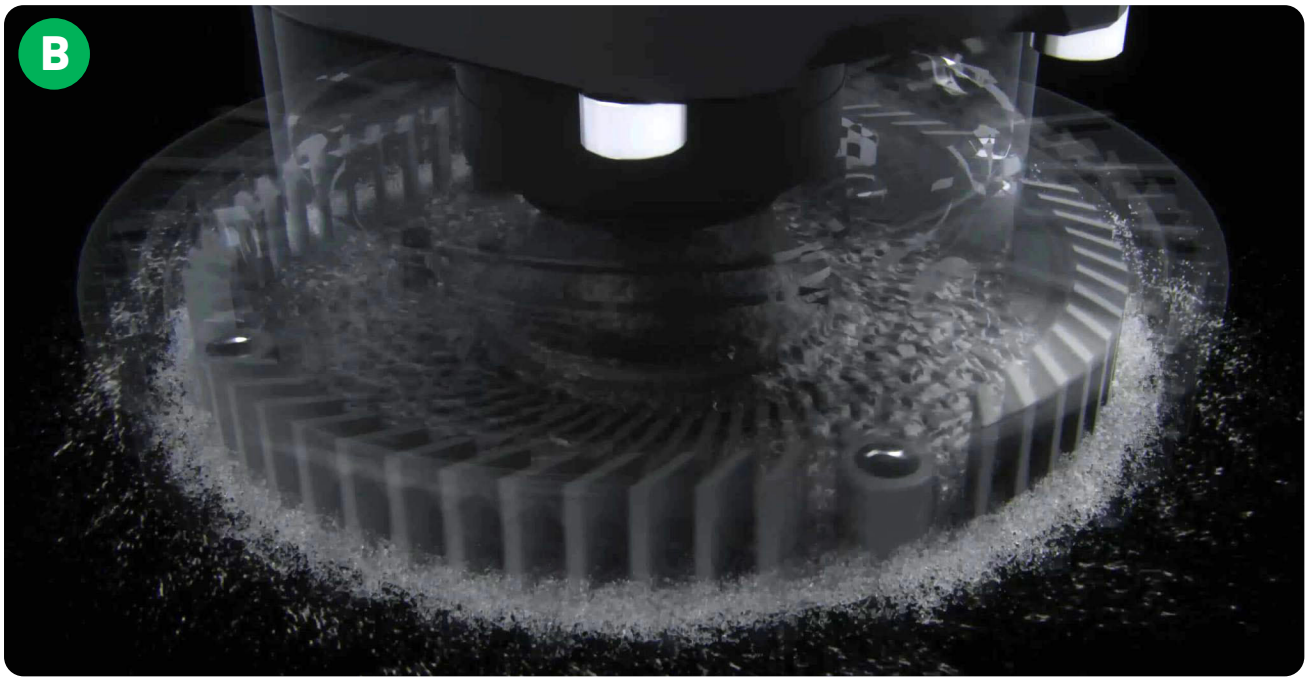
A diferencia del sistema hidráulico, los atomizadores rotativos permiten controlar el tamaño de gota o diámetro volumétrico mediano (DVM) variando la velocidad de giro del disco (las revoluciones por minuto - RPM). Esto se realiza modificando el DVM desde el software de control, de forma independiente al caudal de la bomba. Asimismo, el tamaño de gota puede modificarse, también, mediante el cambio de los discos rotativos, de los cuales hay distintos diseños que varían en forma y tamaño. En definitiva, una mayor separación entre los dientes del disco produce gotas más gruesas, mientras que dientes más próximos reducen su tamaño (Imagen 2b y 2c).

Si bien, los sistemas centrífugos generan un espectro de gota más uniforme que las Unidades Formadoras de Gotas (UFG) hidráulicas, presentan una menor capacidad para producir gotas "Gruesas" a "Muy Gruesas" (ASABE, 2025). Sin embargo, la mayor uniformidad del espectro no implica la generación de gotas de tamaño único, sino de una población de gotas distribuida alrededor de un valor central. En este contexto, la caracterización del espectro no debería limitarse al Diámetro Volumétrico Mediano (DVM o DV50), sino complementarse con los valores de DV10 y DV90, los cuales permiten cuantificar la amplitud de la distribución y describir con mayor precisión la variabilidad de tamaños presentes en la pulverización.

Esta tecnología de sistemas centrífugos resulta más robusta frente a las turbulencias generadas por drones de mayor porte. Investigaciones recientes con el modelo DJI AGRAS T50 indican que el uso de atomizadores rotativos, combinados con velocidades de avance de entre 20 y 25 km/h, ayuda a mitigar los picos de sobredosificación debajo de los rotores, logrando una faja de aplicación más uniforme y predecible (Pagliai *et al.*, 2025).







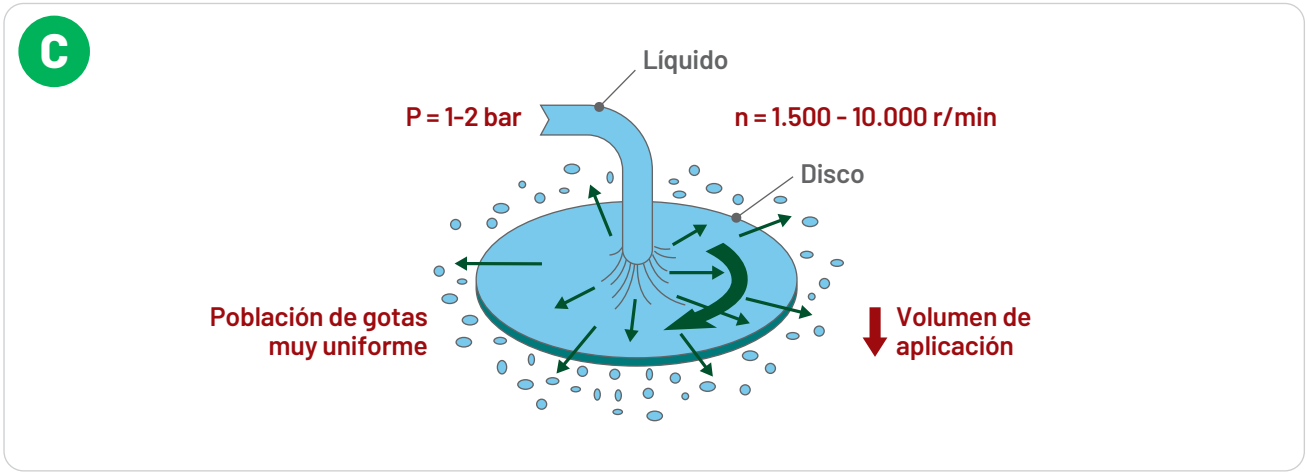


Imagen 2. *Sistema centrifugo de pulverización en un dron XAG P100. a)* Downwash *producido por un dron de aplicación con atomizadores rotativos. b) Detalle de los discos de los atomizadores rotativos, donde se observan las canaletas de distribución del caldo de pulverización. c) Esquema de funcionamiento de un atomizador rotativo. Fuente: XAG (https://xagatlas.com/).*

3.3 Interacción con el objetivo y el ambiente

La selección de la boquilla o el ajuste de las RPM, a través de la variación del tamaño de gota en el control, debe responder a la arquitectura del cultivo, la dinámica y movilidad de la plaga, el estado fenológico de esta y del cultivo y el tipo de producto a aplicar, entre otros factores. Por ejemplo, en cultivos densos y frutales, para lograr penetración efectiva en copas de árboles se han utilizado boquillas de niebla *(mist nozzles)*. No obstante, estas requieren velocidades de vuelo mínimas (menores a 1 m/s o 3,6 km/h) para que el flujo descendente *(downwash)* logre arrastrar las gotas finas hacia el interior del dosel (Liu, *et al.*, 2024a).

Independientemente del sistema, la incorporación de adyuvantes específicos es una estrategia validada para reducir la fracción de gotas satélites (finas), especialmente cuando el dron opera cerca del régimen de vuelo traslacional (ver Capítulo 5), donde la deriva por estela es mayor (Wang *et al.*, 2018a; Deveau, 2025).

Es vital que el operador garantice la integridad de los discos centrífugos. Un disco dañado o con acumulaciones de producto seco altera drásticamente no sólo el espectro de gotas, invalidando cualquier esfuerzo de calibración y regulación previa (Whitford *et al.*, 2025), sino que también puede representar un riesgo de seguridad de vuelo, pudiendo provocar vibraciones desequilibradas, descontrol en la aspersión y pérdida de control de la aeronave entre otros inconvenientes. Por ende, el lavado y el mantenimiento periódico de los sistemas de aplicación ya sean hidráulicos o centrífugos, resulta imprescindible para asegurar la eficacia y la eficiencia del tratamiento.



04 INTRODUCCIÓN AL CONTROL REMOTO DE UN DRON PULVERIZADOR

4. Introducción al control remoto de un dron pulverizador

(Escrito por el Ing. Agr. Martín Rainaudo)

El control remoto de un dron agrícola es el centro de comando operativo desde el cual se planifican, ejecutan y supervisan todas las tareas de aplicación (Imagen 3). Según la marca y el modelo, el equipo puede integrarse en un control propiamente dicho, o gestionarse mediante una *tablet* externa.

A continuación, se detallan las funcionalidades más importantes para desarrollar una operación segura y automática.

A | Configuración de parámetros operativos y de seguridad

Es el primer paso de la operación y consiste en fijar una serie de parámetros operativos y de seguridad que determinan el accionar del dron en distintas situaciones de trabajo. Por ejemplo, cómo actuará el dron al vaciar el tanque, al finalizar una tarea o ante la pérdida de señal. También se configura la lógica de reanudación de ruta de trabajo luego de hacer una carga de caldo, lo cual, a lo largo de un día, resulta un factor determinante de la eficiencia operativa diaria. También será muy importante determinar la respuesta del dron ante obstáculos detectados.

B | Planificación y gestión de misiones

A través de la estación de control es posible importar mapas de prescripción (archivos en formato .shp o .xml), definir los límites del área de trabajo, identificar obstáculos y zonas de no aplicación, y configurar diversas funciones de seguridad y eficiencia incorporadas en el software de gestión de misiones. El operador establece variables como altura de vuelo, velocidad, caudal y distancia entre pasadas. Es importante destacar que algunos de los parámetros pueden ajustarse en tiempo real durante el vuelo, permitiendo al operador adaptarse a cambios en las condiciones meteorológicas, a la necesidad de reducir la deriva o ante la cercanía a un área con más obstáculos.

C | Monitoreo en tiempo real

Durante la operación, el control remoto proporciona información crítica como el nivel de batería (dron y control), volumen remanente en el tanque, caudal instantáneo, velocidad de vuelo, altura sobre el cultivo, intensidad de señal GNSS[6] y estado del sistema de pulverización.

D | Seguridad operacional

El sistema integra alertas basadas en radares y sensores visuales, que detectan baja batería, pérdida de señal, obstáculos, condiciones anómalas de presión o caudal. En equipos compatibles, es posible recibir advertencias en tiempo real al integrarse con estaciones meteorológicas.

E | Trazabilidad y gestión de datos

Al finalizar la tarea, el sistema registra la superficie tratada, el volumen total aplicado y los parámetros operativos. Esta información es exportable para generar reportes de trabajo, cumplir con normativas legales y optimizar la planificación futura.

F | Gestión del mantenimiento

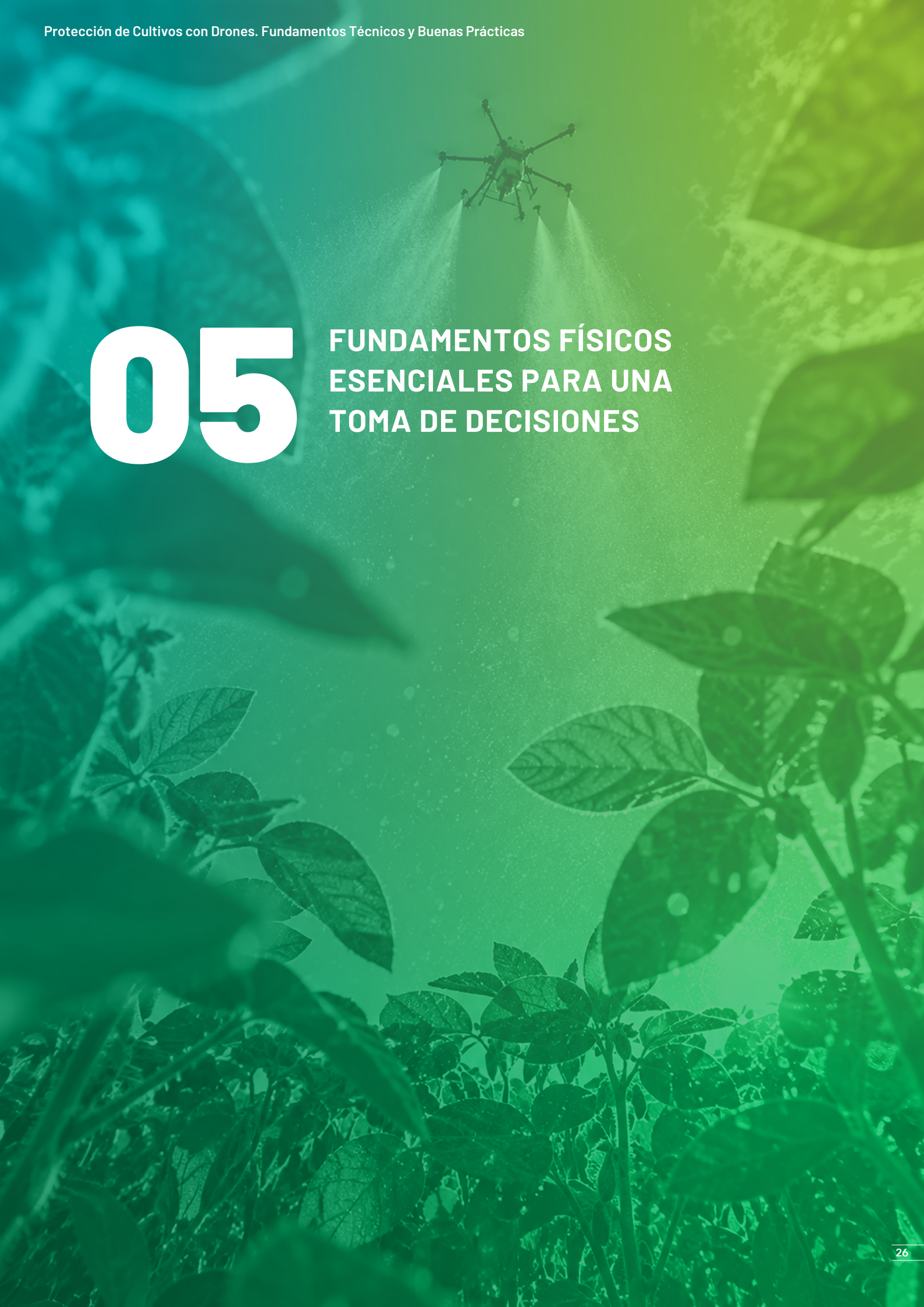
La interfaz actúa como un escáner de diagnóstico, permitiendo consultar el estado de motores, bombas, baterías y actualizaciones de *firmware*.



En conclusión, el control remoto de un dron pulverizador no es solo un mando de vuelo, es una plataforma de gestión integral que garantiza la calidad, la seguridad y el registro de la aplicación. A su vez, es una terminal inteligente que procesa información georreferenciada para que el dron ejecute aplicaciones de tasa variable Su uso responsable y técnicamente fundamentado es clave para garantizar aplicaciones eficientes y seguras.

Imagen 3. *Control remoto de un Dron DJI T25. Fuente: Imagen provista por el Ing. Agr. Pablo Benedit.*

[6] Un receptor GNSS (*Global Navigation Satellite System*) es un dispositivo electrónico que procesa señales de múltiples constelaciones de satélites (GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou) para determinar con exactitud la posición tridimensional (latitud, longitud, altitud), velocidad y tiempo exactos en la Tierra. Son esenciales para topografía, agricultura de precisión y navegación. Mediante el uso de técnicas de corrección como el RTK (*Real Time Kinetic*), permiten alcanzar precisiones centimétricas o incluso milimétricas, garantizando trayectorias de vuelo ultra precisas.



05 FUNDAMENTOS FÍSICOS ESENCIALES PARA UNA TOMA DE DECISIONES

5. Fundamentos físicos esenciales para una toma de decisiones

Para comprender la eficiencia de un RPA es necesario diferenciar los dos regímenes aerodinámicos, o dinámica del aire en la aplicación, que gobiernan el transporte de las gotas hacia el objetivo, el "Efecto *Downwash*" y el "Vuelo Traslacional".

Efecto Downwash: se define como la columna de aire desplazada verticalmente hacia abajo por la rotación de las hélices. En drones de porte pequeño y mediano, este flujo es el principal vector de transporte, ya que genera la energía necesaria para vencer la resistencia del aire, abrir el dosel del cultivo y depositar las gotas en los estratos inferiores (Wang *et al.*, 2018a). Además, la influencia del downwash varía con la carga que contenga, ya que no es igual el producido con el tanque lleno que cuando está casi vacío, requiriendo mucha mayor energía en el primer caso respecto del segundo. El *downwash* alcanza su máxima intensidad en vuelo estacionario o a bajas velocidades, siendo el factor crítico para lograr penetración en cultivos densos.

Como se observa en la Imagen 4, la velocidad del aire bajo los rotores no es uniforme (Liu, *et al.*, 2024b). Las zonas de alta velocidad se concentran bajo cada rotor (representadas en colores rojo/amarillo), mientras que cerca del centro del dron la velocidad es menor (color azul) (Imagen 4). Esta heterogeneidad justifica por qué la posición de las boquillas es crítica para aprovechar el downwash, y asegurar que el caldo alcance el objetivo deseado.

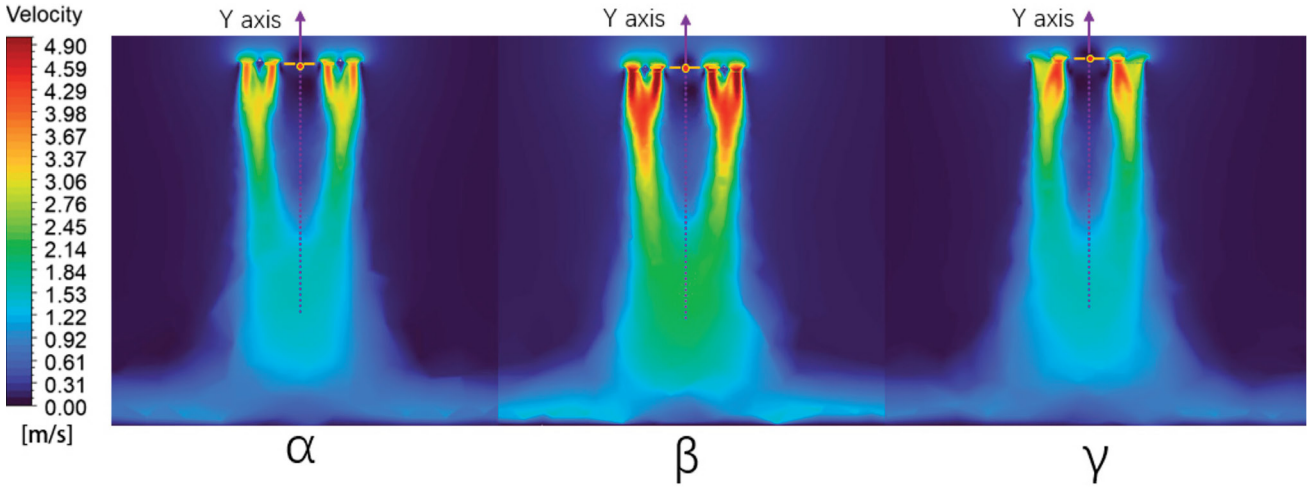


Imagen 4. *Mapa de contorno longitudinal del campo del Downwash en 3 modelos distintos de drones. α (Alfa): se refiere al dron DJI AGRAS T10 (4 rotores); β (Beta): se refiere al dron DJI AGRAS T30 (6 rotores); γ (Gamma): se refiere al dron DJI AGRAS T40 (8 rotores). Fuente: Extraído de Liu, et al. (2024b);*

Vuelo Traslacional o Efecto Outwash: a medida que el dron aumenta su velocidad de avance (fenómeno especialmente relevante en drones de nueva generación, como pueden ser DJI Agras T50 o T100), la aeronave entra en un régimen de "vuelo traslacional" (translational lift). En este estado, el flujo de aire horizontal sobre el disco del rotor genera una sustentación adicional que optimiza el consumo de energía, pero reduce enormemente el efecto del downwash sobre el movimiento de las gotas (Deveau, 2025), alterando significativamente la dirección del flujo.

Según la evidencia reciente, al alcanzar velocidades de entre 30 y 45 km/h, el dron comienza a "dejar atrás" su propia columna de aire vertical, como puede observar en la Imagen 5. Esto significa que el beneficio del empuje vertical *(downwash)* disminuye significativamente (Deveau, 2025), provocando que la nube de pulverización se comporte de forma similar a la de una aeronave de ala fija, quedando más expuesta a las corrientes de aire y perdiendo capacidad de penetración en el cultivo (Pagliai *et al.*, 2025).



Imagen 5. *Vuelos con un dron DJI AGRAS T50, cuyos parámetros comunes fueron a una altura de 3 m, un volumen de aplicación de 20 L/ha y un tamaño de gotas seteado en el control remoto de 200 µm. Solo se varió la velocidad produciendo en 1) efecto Downwash volando a 18 km/h, y 2) vuelo traslacional, volando a 36 km/h. Fuente: Gentileza del Ing. Agr. Eduardo Vita Larrieu (2026).*

Mientras que en drones convencionales el operador depende totalmente del downwash para evitar la deriva, en drones de gran porte la transición al vuelo traslacional es un factor de diseño. Según la OECD[7] (2021) el downwash se debilita a medida que aumenta la velocidad de avance y se convierte en "outwash" (flujo hacia afuera) cuando la velocidad de traslación supera a la del flujo descendente. Aunque los drones pequeños rara vez alcanzan las velocidades que anulen el efecto del downwash, los equipos modernos están diseñados para trabajar en ese umbral a fin de maximizar el rendimiento operativo en hectáreas por hora (ha/h).

La consecuencia operativa es que trabajar en régimen de vuelo traslacional requiere que el aplicador revalúe la altura de vuelo y el tamaño de gota. Al reducirse la "ayuda" mecánica del dron para forzar la penetración de las gotas en el canopeo, aumenta el riesgo de que las gotas finas queden suspendidas en la estela de aire trasera, lo que incrementa el potencial de deriva (Deveau, 2025).

[7] OECD: Organization for Economic Co-operation and Development.

06 PARÁMETROS QUE AFECTAN LA EFICIENCIA Y EFICACIA DE LAS APLICACIONES



6. Parámetros que afectan la eficiencia y eficacia de las aplicaciones

La transición de una prescripción agronómica a una ejecución exitosa en el campo depende de la armonización de ocho variables críticas: altura de vuelo (m), velocidad de avance (km/h), número y tamaño de gota (DVM), ancho de faja efectivo, volumen de aplicación (L/ha), condiciones meteorológicas y compatibilidad y preparación de la mezcla. Estos parámetros no actúan de forma aislada, sino que son componentes de un sistema dinámico donde la modificación de una variable altera necesariamente el comportamiento de las demás.

En la tecnología de RPA, la "ventana de éxito" es más estrecha que en los sistemas terrestres debido al uso de volúmenes reducidos. Por ello, la configuración de estos parámetros no debe ser estática ni basarse en fórmulas predefinidas. Cada decisión operativa debe ser el resultado de un análisis previo que integre las condiciones meteorológicas en tiempo real (temperatura, humedad relativa y dirección e intensidad del viento) y la arquitectura del objetivo biológico (dosel del cultivo).

Solo mediante el ajuste preciso de estas variables se logra el equilibrio entre la eficacia -logro del control fitosanitario- y la eficiencia, entendida como la optimización de recursos, deriva y tiempo. Asimismo, esto garantiza que el proceso se mantenga bajo los estándares de las Buenas Prácticas Agrícolas y libre de riesgos ambientales.

A continuación, estos parámetros se describen de manera individual con fines didácticos y para facilitar la comprensión de su influencia sobre la calidad de la aplicación. Sin embargo, en la práctica operativa no actúan de forma independiente, sino como componentes de un sistema interrelacionado, donde la modificación de una variable impacta sobre las demás. Por este motivo, su análisis y ajuste deben realizarse siempre de forma integrada, buscando el equilibrio entre eficacia y eficiencia.

6.1 Altura de vuelo

Desde el punto de vista operativo, mantener una altura de vuelo adecuada no constituye una decisión arbitraria, sino una condición técnica fundamental. El flujo descendente de aire generado por el dron *(downwash)* debe orientar las gotas de pulverización de manera eficiente y eficaz hacia el objetivo, antes de que sean desviadas por el viento.

Este parámetro se configura desde el control remoto y tiene dos opciones principales: "mantener la altura constante" o que vaya "copiando el terreno", cuya elección dependerá del cultivo y del estado de la superficie donde se realice la realizar la operación. Se advierte que configurar la altura de vuelo en el control en modo "copiar el terreno" puede producir aplicaciones irregulares, sobre todo cuando trabajamos en terrenos irregulares; por lo tanto, se recomienda trabajar en el modo "mantener la altura constante". Esto no implica que no se pueda utilizar la otra opción, sino que se debe analizar caso por caso y tomar la decisión con base en el relevamiento.

Cuando se trabaja bajo criterios de Buenas Prácticas Agrícolas y se busca maximizar la eficiencia del equipo, la altura de vuelo recomendada suele ubicarse entre 2 y 4 metros sobre el canopeo, dependiendo del tipo de dron con el que se trabaje (Tabla 3). Diversos estudios experimentales demuestran que alturas comprendidas entre 2 y 3 metros, según el modelo del dron, ofrecen el equilibrio más robusto entre eficiencia de deposición, penetración en el estrato inferior y reducción de deriva (Wang *et al.*, 2018a; Wang *et al.*, 2020b; Dengeru *et al.*, 2022; Gatkal *et al.*, 2025).

La evidencia científica muestra que los incrementos en la altura de vuelo debilitan la capacidad del *downwash* para "encapsular" la nube de gotas, lo que se asocia con un mayor desplazamiento lateral. Específicamente, en cultivos de porte bajo, duplicar la altura de 1 a 2 metros puede incrementar el potencial de deriva en más del doble (Wang *et al.*, 2020b). Asimismo, la estructura de este flujo cambia drásticamente con la altura, lo que afecta a la consistencia de la cobertura y la uniformidad de la deposición (Liu, *et al.*, 2024b).

En cultivos densos como las leguminosas (por ejemplo, soja), una altura de 2 metros respecto al cultivo optimiza la densidad de impactos por centímetro cuadrado, lo que garantiza la eficacia biológica del tratamiento (Gatkal *et al.*, 2025) cuando se emplean modelos de drones más pequeños, como el T20, por ejemplo. Aunque el rango operativo de los equipos es amplio, la estabilidad del patrón de aplicación es significativamente mayor en estos intervalos moderados (He *et al.*, 2017).

Se requiere la validación técnica de los estos parámetros, dado que la altura óptima no es un valor fijo ni independiente. Esta depende de múltiples factores técnicos, tales como el modelo y el tamaño del dron, el diámetro del rotor, el sistema de propulsión, el diseño del sistema de aspersión y el tamaño de gota configurado (entre otros). No obstante, la recomendación es trabajar siempre entre los 2 y los 4 m de altura. Al respecto, guías de calibración recientes subrayan que el operador debe validar siempre el ancho de faja efectivo mediante pruebas de campo con tarjetas hidrosensibles para la altura seleccionada, ya que pequeñas variaciones en este parámetro alteran la uniformidad y la recuperación de masa en el objetivo (UAPASTF, 2023; Whitford *et al.*, 2025).

Consideraciones según el porte y generación de la aeronave

La evolución tecnológica hacia drones de gran capacidad de carga y mayores números y diámetros de rotor (ej. DJI Agras T50), y distinto diámetro de pala o aspa, exige un ajuste diferenciado de la altura operativa. Esto se debe a que los nuevos drones están equipados con tecnología de RADAR[8] y/o con LIDAR[9].

Los sistemas con tecnología RADARpresentan un desempeño superior en condiciones climáticas adversas y cubren mayores distancias de detección. Por el contrario, la tecnología LiDAR ofrece una precisión milimétrica al generar mapas 3D del entorno en tiempo real; sin embargo, esta alta sensibilidad provoca que, al volar a bajas alturas, el equipo detecte una mayor densidad de obstáculos (como malezas altas o irregularidades del canopeo), lo que genera detenciones más frecuentes que en drones con tecnologías tradicionales.

[8] RADAR (Radio Detection and Ranging), Utiliza ondas de radio y funciona mejor en condiciones climáticas adversas y a mayor distancia.
[9] LiDAR (Light Detection and Ranging) es una tecnología de teledetección que utiliza pulsos de láser para medir distancias con precisión milimétrica, creando mapas 3D detallados del entorno en tiempo real. Funciona emitiendo luz láser y calculando el tiempo que tarda en regresar tras rebotar en objetos.

En aeronaves de gran porte, operar a alturas de 3 a 4 m puede resultar más beneficioso que el estándar de 2 metros. La elevada energía del flujo descendente generado por motores de alta potencia puede provocar una distribución heterogénea si se vuela demasiado bajo, lo que concentra el producto excesivamente debajo de los rotores (Pagliai et al., 2025). Una altura ligeramente superior permite que los flujos de aire se solapen y estabilicen, con lo cual se logra mayor uniformidad y una cobertura eficaz en cultivos de gran porte como el girasol (Serban, 2026).

Asimismo, en estos equipos, la relación altura-velocidad es crítica, por lo que, a velocidades operativas muy altas, el dron puede entrar en un régimen de "vuelo traslacional" donde el efecto del downwash sobre la penetración disminuye, lo que obliga al operador a priorizar alturas que mantengan la estabilidad de la nube de gotas frente a la turbulencia propia del avance (Deveau, 2025).

Cuando la altura es inferior a la adecuada para el modelo específico de RPA, se produce el denominado efecto suelo. En este fenómeno, el flujo descendente impacta contra el cultivo o el terreno, y se redistribuye de manera turbulenta hacia arriba. Esta turbulencia puede fragmentar excesivamente las gotas o reinyectarlas en la columna de aire, lo que incrementa el riesgo de deriva por evaporación o viento.

Por el contrario, cuando la altura se incrementa por encima de los 3,5 a 4 m, el *downwash* pierde intensidad y cohesión, lo que debilita el efecto de empuje sobre el blanco (Wang *et al.*, 2018a). En estas condiciones, las gotas quedan suspendidas en la masa de aire, lo que favorece la evaporación y el desplazamiento lateral de las fracciones más finas. En cultivos arbóreos o frutales, superar estas alturas críticas desestabiliza el ancho de faja previsto y genera una deposición errática en los estratos inferiores del árbol (Liu, *et al.*, 2024a).

En consecuencia, bajo criterios de Buenas Prácticas Agrícolas, se recomienda operar a la menor altura posible que resulte compatible con la seguridad del equipo y el tipo de cultivo, lo que evita la generación de efecto suelo y permite ajustar el parámetro según el modelo de dron y el contexto ambiental. Este enfoque es clave para optimizar la eficiencia de deposición y minimizar el riesgo de deriva.

6.2 Velocidad de avance

La velocidad de avance es el parámetro que determina el rendimiento operativo de los RPA (ha/h) y, en interacción con la altura, gobierna la dinámica del flujo de aire que transporta las gotas al objetivo. Si bien una velocidad constante y moderada es esencial para la homogeneidad del ancho de aplicación, el concepto de "velocidad óptima" ha evolucionado drásticamente con la aparición de aeronaves de gran porte.

En términos físicos, a medida que la velocidad de avance aumenta, el vector del flujo descendente *(downwash)* deja de ser vertical y comienza a inclinarse hacia atrás. Este fenómeno reduce el tiempo de exposición de las gotas a la corriente de aire que las empuja hacia el cultivo, lo que las deja a merced del viento imperante y de las turbulencias de la estela producidas por el propio dron.

Distintos estudios demuestran que el potencial de deriva se incrementa de manera casi lineal con el aumento de la velocidad de vuelo. Esto se debe a la desestabilización de los vórtices de aire en los extremos de la faja de aplicación (Wang *et al.*, 2018a; Wang *et al.*, 2020b).

Velocidades recomendadas según el porte del equipo

La masa de la aeronave y la potencia de sus motores determinan la velocidad máxima que el patrón de aspersión puede tolerar antes de degradarse:

➔ **En drones de porte chico (ej. DJI Agras T20, T30 o T20P)**, la velocidad óptima se sitúa entre 15 y 21 km/h (4,2 a 5,8 m/s). Superar este rango en estos equipos, suele resultar en una pérdida marcada de la penetración en el dosel, especialmente en cultivos con arquitectura foliar compleja (Li *et al.*, 2022; Gatkal *et al.*, 2025).

➔ **En drones de porte medio (ej. DJI Agras T40/T50)**, debido a su mayor peso y la inercia de su flujo de aire, es posible operar eficazmente a velocidades de hasta 26 km/h (7,2 m/s). Investigaciones recientes indican que, en estos modelos, velocidades de 20-25 km/h mejoran la uniformidad de la faja al suavizar los "picos" de deposición que se forman excesivamente bajo los rotores cuando el dron vuela a velocidades inferiores (Pagliai *et al.*, 2025).

➔ **En drones de gran porte (ej. DJI Agras T70/T100 o XAG P150)** se han reportado operaciones estables a velocidades de 32 a 36 km/h. No obstante, a estas velocidades el equipo alcanza o supera el umbral del vuelo traslacional, lo que exige supervisión rigurosa de la deriva y de la estabilidad de la nube de pulverización (Deveau, 2025).

El límite crítico

Un concepto fundamental para el aplicador moderno es el umbral de velocidad de los 30 a 45 km/h. Al alcanzar estas velocidades, el dron entra en régimen de vuelo traslacional, fase en la que la sustentación proviene principalmente del flujo de aire horizontal, por lo que el beneficio mecánico del *downwash* desaparece casi por completo (Deveau, 2025).

Operar en este régimen con el objetivo de maximizar la capacidad operativa puede comprometer la eficacia biológica del control, debido a:

➔ **Menor penetración:** las gotas pierden la energía cinética vertical necesaria para alcanzar los estratos inferiores del canopeo (Li *et al.*, 2022).

➔ **Inestabilidad de la faja:** el ancho de trabajo puede volverse errático, lo que genera zonas con sobredosis, subdosis o directamente fallas de cobertura (Deveau, 2025).

La selección de la velocidad debe responder al objetivo biológico buscado. Por ejemplo, en aplicaciones de fungicidas sobre cultivos densos como el girasol, se ha validado que el rango de velocidades de 14 a 15 km/h ofrecen un equilibrio óptimo entre cobertura y eficiencia operativa (Serban, 2026). Por el contrario, en aplicaciones de herbicidas en barbechos es posible explorar velocidades superiores, siempre que se ajuste el tamaño de gota para compensar la turbulencia generada por la mayor velocidad de avance, especialmente en drones de gran porte.

Como regla general, cualquier incremento en la velocidad de vuelo exige una revalidación del ancho de faja efectivo. Aumentar la velocidad sin ajustar el solape suele derivar en una distribución heterogénea y en una menor recuperación de gotas sobre el objetivo (UAPASTF, 2023; Whitford *et al.*, 2025).

6.3 Tamaño de gotas

En la pulverización aérea con RPA, el comportamiento de las gotas es el factor determinante de la eficacia biológica. Desde su formación hasta su destino final, la gota atraviesa un proceso crítico donde puede fragmentarse, evaporarse o ser desviada por corrientes de aire antes de lograr el impacto sobre el blanco.

Dinámica de la gota en el flujo del dron

Tradicionalmente se supone que las gotas menores ofrecen mejor cobertura. Sin embargo, en aplicaciones con drones, la eficacia depende de la capacidad del flujo de aire para proyectar la gota. Investigaciones demuestran que las gotas excesivamente finas, por ejemplo, menores de 200 micrones (µm), son susceptibles de quedar atrapadas en los vórtices de las hélices, lo que provoca que se evaporen o deriven fuera del área de tratamiento (Chen *et al.*, 2020). Por el contrario, las gotas de mayor tamaño poseen una energía cinética superior, lo que permite que el downwash las proyecte hacia el interior del canopeo, incluso en drones de gran porte que operan a velocidades elevadas (Wang *et al.*, 2020b; Pagliai *et al.*, 2025).

Eficacia biológica y penetración

La elección del tamaño de gota afecta directamente la llegada del producto a zonas difíciles, como el envés de las hojas o el estrato inferior del cultivo. En aplicaciones de fungicidas en cultivos densos como el girasol, se determinó que un espectro de gotas equilibrado (DVM ~300 µm) garantiza que el producto sea "empujado" hacia el estrato basal del canopeo, donde suelen iniciarse las infecciones (Serban, 2026).

Para el control de insectos como los trips, se ha validado que un tamaño de gota en el rango de 250 a 300 µm ofrece la mejor relación entre cobertura y control biológico; gotas más grandes pueden "rebotar" en cutículas cerosas, mientras que las más finas carecen de la inercia necesaria para penetrar la capa límite de aire del cultivo (Gatkal *et al.*, 2025).

Frente a condiciones meteorológicas adversas, tales como vientos cercanos al límite, un Delta T elevado (ver más adelante el capítulo 7 sobre Condiciones meteorológicas y ventanas de aplicación) o la cercanía a áreas sensibles, el tamaño de gota actúa como una herramienta de mitigación. Incrementar el DVM a rangos de 350 a 450 µm (categorías "Muy Gruesa" a "Extremadamente Gruesa", según ASABE S572.3), reduce drásticamente la fracción de gotas satélites (finas a muy finas), responsables del 90 % de la deriva de largo alcance.

Finalmente, el uso de adyuvantes ayuda a uniformar el espectro de gotas, lo que reduce la variabilidad del DVM y protege a la gota contra la evaporación durante su trayecto hacia el blanco (Wang *et al.*, 2018a; Deveau, 2025).

Recomendación operativa y gestión de riesgos

Bajo este marco técnico, la selección del espectro de gotas debe buscar un equilibrio dinámico entre cobertura, penetración en el objetivo y reducción del riesgo de deriva. Si bien el Diámetro Volumétrico Mediano (DV_{50} o DVM) constituye el parámetro de referencia más utilizado para describir una pulverización, por sí solo no resulta suficiente para caracterizar el comportamiento del espectro de gotas.

Toda pulverización genera una población heterogénea de gotas de diversos tamaños. En consecuencia, para caracterizar con precisión este espectro y evaluar rigurosamente el riesgo de deriva, es fundamental analizar la distribución volumétrica a través de sus tres parámetros clave: el diámetro volumétrico mediano (DV_{50} o DVM) y los límites inferior (DV_{10}) y superior (DV_{90}) del espectro. El DVM representa el punto medio de la distribución, donde el 50 % del volumen pulverizado se compone de gotas menores que este valor y el 50 % restante, por gotas mayores. Por su parte, el DV_{10} define el diámetro por debajo del cual se encuentra el 10 % del volumen de la aplicación; este parámetro es crítico, ya que caracteriza a la fracción de gotas más finas y altamente susceptibles a la evaporación y al desplazamiento fuera del área establecida para la aplicación (deriva), y se estima que dicho valor debe ser igual o superior a 150 µm para minimizar significativamente la deriva (Proulx *et al.*, 2024). En el extremo opuesto, el DV_{90} delimita el diámetro que supera al 90 % del volumen restante. Un DV_{90} excesivamente elevado revela la presencia de macrogotas que, si bien son resistentes a la deriva, comprometen la uniformidad de la cobertura foliar debido a fenómenos de rebote o escurrimiento, lo que provoca la pérdida de producto hacia el suelo u otras zonas no objetivo (Proulx *et al.*, 2024; ASABE, 2025).

Análisis de la población de gotas

(Autor Ing. Agr. Eduardo Vita Larrieu)

Conocer la población de gotas que genera el equipo es vital para maximizar la eficiencia. A modo de ejemplo, en la Figura 1 se presentan datos reales de la salida de un equipo VisiSize[10], donde la curva de volumen acumulado (en azul) permite identificar los puntos de corte del 10 %, 50 % y 90 % del volumen total.

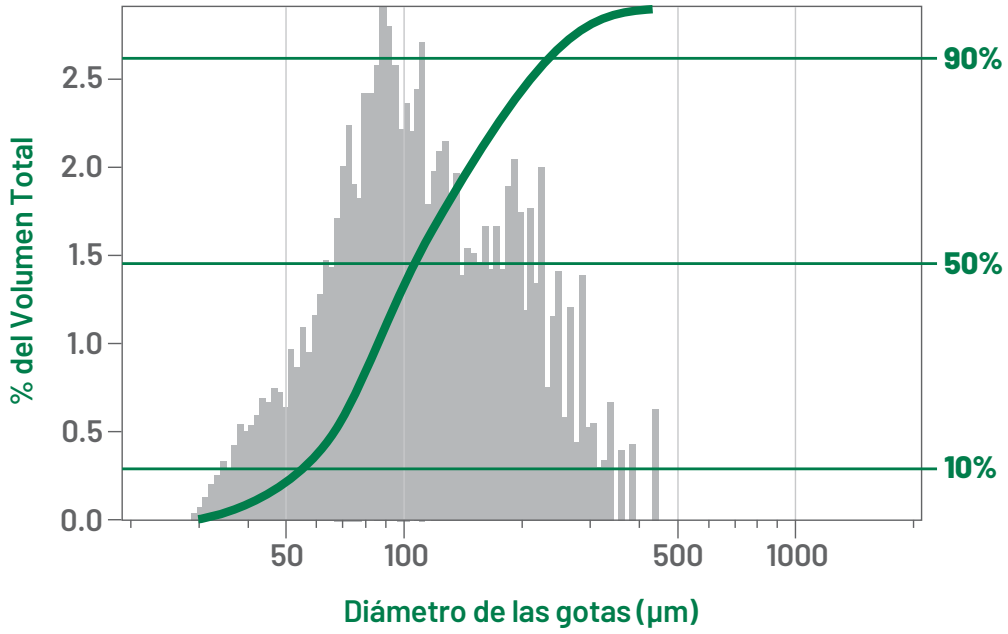


Figura 1. *Salida de un equipo VisiSize donde se puede observar el porcentaje del volumen total aplicado por hectárea en función del diámetro de las gotas y la curva de volumen acumulado (en azul), donde se puede identificar los puntos de corte del 10 %, 50 % y 90 % del volumen total. Fuente: Gentileza del Ing. Agr. Carlos Servino, de la firma ARAG.*

[10] VisiSize: es un sistema de medición óptica basado en análisis de imágenes, diseñado por la empresa "Oxford Lasers", que permite medir con precisión y en tiempo real el tamaño, la velocidad, la forma y la dirección de partículas, gotas o burbujas en movimiento. Funciona capturando fotografías ultrarrápidas de alta resolución (a contraluz) mediante una fuente de luz láser y una cámara, lo que permite evaluar exactamente qué ocurre en procesos de pulverización y flujos de fluidos.

En este ejemplo, el gráfico muestra i) la dispersión de los tamaños de gota que genera una boquilla hidráulica determinada, con una regulación definida (eje X) y ii) en color azul la curva correspondiente al volumen acumulado (en azul), donde se señalan el 10 %, 50 % y 90 %. Para esta boquilla se corrobora que genera gotas en un rango de 25 a 450 µm. En este caso, el DV50 es de 110 µm, el DV10, de 60 µm y el DV_{90}, de 250 µm. De un modo práctico, podemos inferir que ante una tasa de aplicación de 10 L/ha, el 50 % del volumen (5 L/ha) está compuesto por gotas menores a 110 µm, y el 10 % (1 L/ha) es menor a 60 µm. Las gotas menores a 141 µm presentan un alto riesgo de deriva (Hoffmann *et al.*, 2012), por lo tanto, en este ejemplo, cerca del 70 % del volumen aplicado es altamente susceptible de ser desplazado fuera del área objetivo. Este diagnóstico subraya la importancia de conocer el detalle de la población de gotas generada para minimizar las pérdidas.

En cultivos extensivos, se recomienda un DV_{50} situado entre 200 y 400 µm (medido en el objetivo). En este punto, tanto Hoffmann *et al.* (2012) como Proulx *et al.* (2024) coinciden en que es condición obtener valores de DV_{10} superiores a 150 µm para reducir el riesgo de deriva. Gotas por debajo de este límite poseen masa insuficiente y, ante condiciones de viento o un Delta T elevado, sufren una rápida evaporación y un arrastre físico inmediato, lo que incrementa exponencialmente el potencial de deriva (Hoffmann *et al.*, 2012).

Criterios para la operación con RPAs

Ante condiciones meteorológicas complejas, como vientos cercanos a los límites operativos, valores elevados de Delta T o proximidad a áreas sensibles, la recomendación es migrar hacia espectros de gotas más gruesos, con valores de DVM superiores a 350 µm (categoría "Muy Gruesa" según ASABE S572.3). Esta estrategia reduce significativamente la proporción de gotas finas responsables de la mayor parte de la deriva de largo alcance.

Cabe recordar que tanto el viento como las condiciones de elevada demanda ambiental de agua favorecen la reducción efectiva del tamaño de las gotas durante su trayectoria hacia el objetivo. En consecuencia, la generación inicial de gotas de mayor diámetro constituye una herramienta práctica de mitigación del riesgo.

Asimismo, al incrementar el tamaño de gota para mejorar la seguridad ambiental, disminuye naturalmente la cantidad de impactos por unidad de superficie. Por este motivo, el ajuste del espectro debe acompañarse, cuando corresponda, de un incremento en el volumen de aplicación, con el fin de mantener niveles adecuados de cobertura, eficacia biológica y eficiencia de la aplicación.

Esta decisión no responde a una regla fija, sino a un criterio de gestión de riesgos. En drones de nueva generación equipados con atomizadores rotativos, el operador puede modificar dinámicamente las RPM de los discos para ajustar el espectro de pulverización durante la operación, adaptándose a cambios en las condiciones ambientales y manteniendo la aplicación dentro de parámetros compatibles con las Buenas Prácticas Agrícolas (Pagliai *et al.*, 2025; Whitford *et al.*, 2025).

6.4 Número de impactos por centímetro cuadrado (gotas/cm^2)

La densidad de impactos por centímetro cuadrado es el indicador directo de la calidad de cobertura y determina, junto con el tamaño de gota, la eficacia biológica del tratamiento. Según las recomendaciones internacionales de Syngenta (2002) y nacionales de SENASA (2014), los valores mínimos de cobertura para asegurar la eficacia son los que se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. *Cantidad de impactos, medidos en número de gotas por centímetro cuadrado, mínimos necesarios para la aplicación eficiente de herbicidas, insecticidas y fungicidas de contacto y sistémicos.*
Fuente: Elaboración propia en base a información extraída de Syngenta (2002) y SENASA (2014)

HERBICIDAS	INSECTICIDAS Y FUNGICIDAS
Sistémicos 20-30 gotas /cm^2 **Contacto** 30-40 gotas /cm^2	**Sistémicos** 20-30 gotas /cm^2 **Contacto** 50-70 gotas /cm^2

En aplicaciones con aeronaves pilotadas a distancia (drones), la reducción drástica de los volúmenes de agua genera un incremento proporcional en la concentración del ingrediente activo en la mezcla. Como consecuencia, cada impacto transporta una carga de fitofármaco significativamente mayor, lo que permite alcanzar umbrales de control eficaces incluso con densidades de gotas menores que las convencionales, siempre que la distribución espacial sea homogénea.

Sin embargo, esta tolerancia a densidades de impacto menores tiene un límite crítico. Si el operador decide incrementar el tamaño de gota para mitigar el riesgo de deriva climática, la cantidad de impactos por unidad de superficie se reducirá de forma exponencial. Por lo tanto, para evitar caer por debajo de los requisitos mínimos de cobertura, resulta indispensable ajustar al alza el volumen de aplicación (L/ha) y compensar así el aumento en el diámetro de las gotas.

La validación de este parámetro en el lote debe realizarse mediante el uso de tarjetas hidrosensibles, las cuales permiten constatar si la penetración y el número de gotas en el estrato del cultivo son los adecuados para el objetivo biológico buscado.

6.5 Compatibilidad y Preparación de Mezclas para RPA

(Autores: Lic. Cs. Qcas. María Belén Aguer e Ing. Agr. Juan Pablo Timpone)

La superficie agrícola mundial alcanza aproximadamente los 5000 millones de hectáreas, donde el control de adversidades mediante fitosanitarios es fundamental. Estos productos suelen aplicarse en mezclas para ampliar el espectro de control y optimizar la eficiencia de las aplicaciones; sin embargo, la incompatibilidad entre formulaciones puede generar inestabilidad en el caldo, pérdidas económicas y fallas en el control.

En aplicaciones con drones, este riesgo puede ser mayor debido a los menores volúmenes de aplicación, lo que aumentan la concentración de los productos en el caldo y exige mayores condiciones de estabilidad en la mezcla.

Si bien una mezcla inadecuada puede presentar una separación de fases, formación de espumas o precipitación de sólidos no siempre la incompatibilidad puede detectarse a simple vista. Por lo tanto, es indispensable tener en cuenta cinco claves fundamentales:

1. La calidad del agua es el primer paso fundamental para lograr una aplicación agrícola eficiente. Los principales parámetros por considerar son la turbidez, la dureza y el pH, ya que pueden afectar tanto a la estabilidad de las mezclas como a la eficacia de los fitosanitarios.

La **turbidez** suele estar asociada a la presencia de sedimentos y materia orgánica en suspensión. Algunos productos fitosanitarios presentan alta afinidad por el carbono orgánico, por lo que pueden adsorberse sobre estas partículas y reducir la fracción de ingrediente activo disponible para el control (Sparks, 2003). Debido a que el contenido de materia orgánica puede variar significativamente en el tiempo y a que no hay soluciones químicas eficaces, se recomienda priorizar el uso de aguas claras o de baja turbidez.

La **dureza del agua**, determinada por la presencia de calcio y magnesio, puede afectar principalmente a herbicidas de naturaleza ácida. Estos cationes pueden reaccionar con los principios activos e inactivarlos (Mueller *et al.*, 2006). Se considera que un agua es muy dura por encima de 180 ppm de carbonato de calcio ($CaCO_3$), por lo que en estas condiciones se recomienda el uso de adyuvantes con alta capacidad de secuestro de cationes.

El **pH** es un parámetro que no depende exclusivamente del agua, sino también de los productos agregados y del orden de carga en el tanque. Por este motivo, es importante respetar el orden de carga sugerido (Figura 2); asimismo, al utilizar correctores de dureza se recomienda elegir productos que no generen descensos bruscos de pH, para evitar así afectar la a estabilidad de la mezcla y a la eficacia del control.

En aplicaciones con drones, donde los volúmenes de aplicación son menores y las mezclas se encuentran más concentradas, se recomienda utilizar correctores de agua que presenten una alta capacidad de secuestro de cationes a bajas dosis, un efecto quelatante que evite la formación de precipitados y una capacidad buffer que permita regular el pH de forma gradual.

2. Es esencial conocer los tipos de formulaciones a utilizar para evitar incompatibilidades en la mezcla, ya que cada una requiere un manejo específico y presenta un grado de compatibilidad diferencial. Los productos solubles (SG, SL) se caracterizan por no generar turbidez en el caldo, a diferencia de los productos insolubles (WG, SC, EC), que vuelven la mezcla turbia y exigen sistemas de agitación constante. Dado que en los drones los sistemas de agitación son limitados o inexistentes, esta restricción debe ser un factor determinante al momento de seleccionar los productos y su calidad, pues de ello dependerá la estabilidad del caldo durante la aplicación con RPA.

3. El orden de agregado de los productos es primordial. Se recomienda comenzar la carga con los productos insolubles y luego pasar a los más solubles. Dado que el pH promedio del agua en la Argentina es de 8,1, también es importante agregar los productos de pH neutro al principio y los productos ácidos (principalmente herbicidas) al final, lo que permite cambiar el pH de forma gradual y no abrupta. La información sobre el pH de las formulaciones se puede obtener de las Fichas de Datos de Seguridad (FDS). Por lo general, el orden de mezclado por solubilidad y pH suele coincidir. En el Figura 2 se puede observar una propuesta de orden de carga con estas consideraciones.

4. Prestar atención a la agitación, la temperatura y el volumen de aplicación. La agitación es necesaria para lograr una correcta integración de los productos, especialmente si se trata de productos del tipo WG y SC. En el caso de aplicaciones con drones, este aspecto cobra aún mayor relevancia, ya que los tanques suelen ser de menor tamaño y muchos equipos cuentan con sistemas de agitación limitados o, incluso, no poseen agitadores. Por este motivo, se debe realizar una premezcla de algunos productos en un recipiente externo antes de incorporarlos al tanque del equipo, especialmente cuando se utilizan formulaciones sólidas o suspensiones concentradas (Matthews *et al.*, 2014).

5. El mantenimiento de los equipos de pulverización. Es fundamental que estén limpios y funcionen correctamente. Antes de la aplicación, es importante eliminar los residuos persistentes de fitosanitarios para evitar incompatibilidades en la mezcla (FAO, 2001). En este sentido, es recomendable utilizar limpiadores integrales que puedan eliminar, solubilizar e inactivar las formulaciones de plaguicidas más desafiantes en la actualidad.

Los coadyuvantes, además de su función en la corrección de la calidad del agua y en la estabilidad de las mezclas, cumplen un rol clave en aplicaciones con drones, al contribuir a mejorar la calidad de la pulverización. Dependiendo del producto utilizado, pueden ayudar a reducir la deriva, mejorar el mojado sobre las superficies foliares o disminuir la evaporación de las gotas durante su trayectoria hacia el blanco.



Figura 2. *Orden de carga en el tanque de la pulverizadora de los distintos productos fitosanitarios según sus formulaciones. Fuente: Elaboración propia en función a los aportes de María Belén Aguer y Juan Pablo Timpone, basados en su experiencia de más de 2000 mezclas realizadas en laboratorio (información no publicada).*

Prueba de compatibilidad antes de mezclar

En caso de dudas, siempre es recomendable realizar una prueba a pequeña escala antes de preparar grandes volúmenes. Esta práctica es especialmente importante en aplicaciones con drones, donde las mayores concentraciones del caldo pueden favorecer la aparición de incompatibilidades que no necesariamente se manifiestan en aplicaciones con volúmenes de agua más altos. Consiste en mezclar los productos en un recipiente pequeño con el agua de uso, en las proporciones que se emplearán en la aplicación, y observar el comportamiento de la mezcla. Si se observa una separación de fases dentro de los primeros 15 min, se recomienda evitar esa combinación. Este intervalo se define con base en la observación experimental interna acumulada en más de 2000 ensayos de compatibilidad, donde se identificó como un compromiso adecuado entre la rapidez de evaluación y la representatividad del comportamiento de la mezcla.

Asimismo, se sugiere el uso de adyuvantes compatibilizantes, que aporta en estabilidad a la mezcla, idealmente de uso preventivo. Si la mezcla se mantiene estable a los 30 min, puede utilizarse sin restricciones.

Como referencia metodológica general, existen protocolos como el del Instituto Itaquí (2013), que evalúan la estabilidad de la mezcla en múltiples tiempos (0, 1, 5, 10, 20 y 30 min), permitiendo una clasificación más detallada del comportamiento de las combinaciones.

Situaciones que aumentan el riesgo de incompatibilidad en mezclas

El riesgo de inestabilidad en el caldo de aplicación aumenta cuando se presentan una o más de las siguientes condiciones:

- **Volúmenes de aplicación muy bajos (típicos en drones).**
- **Aguas duras (>180 ppm de $CaCO_3$).**
- **Alta turbidez o presencia de materia orgánica.**
- **Uso simultáneo de varias formulaciones diferentes.**
- **Baja agitación en el tanque, muy común en un dron.**
- **Temperaturas bajas durante la preparación del caldo.**

En estas situaciones se recomienda prestar especial atención a la calidad del agua, el orden de carga y la realización de pruebas de compatibilidad previas.

6.6 Volumen de aplicación

El volumen de aplicación (L/ha) en operaciones con drones debe comprenderse como un recurso técnico estratégico y no meramente como un indicador de rendimiento operativo. Al trabajar mayoritariamente en regímenes de Bajo Volumen (BV) y Ultra Bajo Volumen (UBV), el agua deja de ser un diluyente inerte para convertirse en el vehículo crítico que garantiza la "supervivencia" del fitosanitario (Rizobacter, 2014; Whitford *et al.*, 2024).

A diferencia de los equipos terrestres, que utilizan el volumen para "mojar", el dron aprovecha la alta concentración de la mezcla como una ventaja biológica. En un caldo concentrado, cada gota transporta una dosis de ingrediente activo significativamente mayor, lo que permite, que incluso con una menor densidad de impactos por cm2, se alcancen umbrales de control eficaces, siempre que la distribución sea homogénea (Bonds *et al.*, 2024; Rajashekhar *et al.*, 2025).

Por otro lado, el volumen está íntimamente ligado a la tasa de supervivencia de la gota. Como se detalla más adelante (Capítulo 7: "Condiciones meteorológicas y ventanas de aplicación"), en condiciones de Delta T elevado (superior a 8), una fracción de agua se pierde por evaporación en el trayecto de la gota desde el atomizador hasta el objetivo (Figura 3). Esto puede provocar que la gota llegue "seca" o reduzca tanto su tamaño que termine derivando fuera del lote. Ante condiciones ambientales críticas, la recomendación técnica es aumentar simultáneamente el tamaño de la gota y el volumen de aplicación (por ejemplo, pasar de 10 a 15-18 L/ha). Esta estrategia incrementa la masa crítica de la gota y permite que los coadyuvantes antievaporantes cuenten con el solvente necesario para actuar (Kannan *et al.*, 2024; Deveau, 2025).

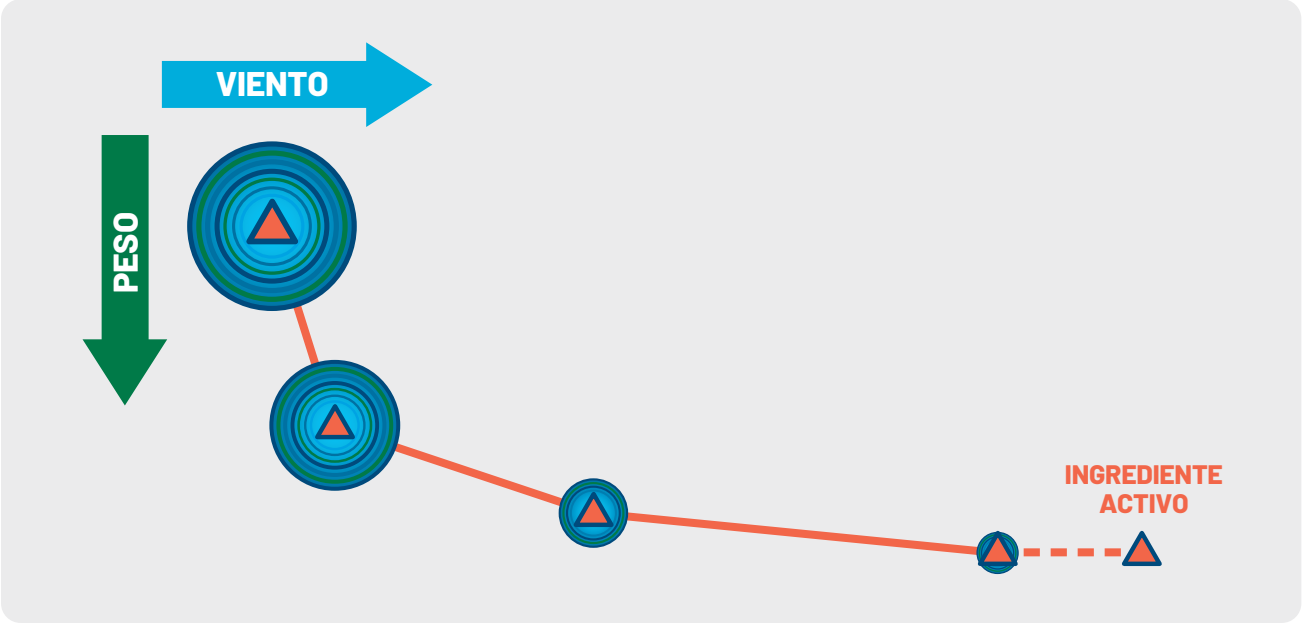


Figura 3. *Proceso de evaporación y generación de deriva en base al comportamiento de las gotas en diferentes condiciones meteorológicas. Fuente: Cid y Macia (2011).*

En cuanto a la elección del volumen, este debe responder a la arquitectura del canopeo. Por ejemplo, en situaciones de barbecho, se logran niveles de control superiores con volúmenes de 15 a 18 L/ha, dado que el *downwash* no encuentra resistencia y la deposición es directa. Por el contrario, en cultivos densos, especialmente en aplicaciones de fungicidas o insecticidas, sobre todo sistémicos, en soja, girasol o maíz en estadios avanzados, es necesario elevar el volumen de aplicación a 18-25 L/ha. Esta mayor masa de líquido es fundamental para que la columna de aire del dron logre "arrastrar" las gotas hacia los estratos inferiores, venciendo la resistencia del aire estancado entre las hojas (Serban, 2026).

Finalmente, y como se vio anteriormente, existe un riesgo técnico al aumentar el tamaño de gota para frenar la deriva si no se incrementa proporcionalmente el volumen de agua. Si las gotas son más grandes, pero el volumen de agua permanece constante, la densidad de impactos (gotas/cm^2) disminuye drásticamente. En productos de contacto, como herbicidas desecantes o ciertos fungicidas, esto puede generar fallas de control por falta de cobertura. Por ello, siempre que se opte por gotas "Muy Gruesas" (>350 µm según ASABE, 2025) para mitigar riesgos climáticos, el volumen debe incrementarse para asegurar la cobertura mínima requerida por la etiqueta del producto (Whitford *et al.*, 2024; ASABE, 2025).

Capacidad operativa y equipos de gran porte

Con la llegada de drones de gran capacidad (como el T50 o mayores), la limitación logística del volumen ha disminuido. Estudios con estos equipos muestran que trabajar con volúmenes ligeramente superiores (15-20 L/ha) mejora la uniformidad de la faja de aplicación al estabilizar el patrón de los atomizadores rotativos, y se reduce la variabilidad inherente a los volúmenes extremadamente bajos (Pagliai et al., 2025).

La evolución hacia el volumen óptimo estratégico

La transición desde drones de porte pequeño (como los DJI Agras T10 o T20 o el XAG P20) hacia equipos de gran capacidad (como los DJI Agras T50 o T100 o el XAG P150) ha redefinido el rol del volumen en la pulverización aérea.

Mientras que en los equipos pioneros el bajo volumen era una imposición logística que operaba en el límite de la eficacia, en los drones modernos se ha convertido en una variable de estabilidad aerodinámica.

Como se muestra en el estudio comparativo de Pagliai et al. (2025), los drones de gran porte generan una energía de downwash significativamente superior. Esta columna de aire no solo transporta la gota, sino que "gobierna" las condiciones del entorno inmediato, lo que permite que volúmenes de 15 a 25 L/ha logren niveles de penetración en el canopeo y una uniformidad de franja (o ancho efectivo de faja), inalcanzables para equipos más livianos.

En definitiva, la gestión del volumen debe sustentarse sobre tres pilares:

DIFERENCIACIÓN POR TIPO DE DRON:
no deben extrapolarse parámetros de drones pequeños a equipos de gran porte. El mayor peso y la potencia de los rotores modernos permiten, y a menudo requieren, masas de líquido superiores para estabilizar el patrón de aspersión frente a turbulencias y vientos laterales.

DENSIDAD DE IMPACTOS SOBRE AHORRO DE AGUA:
el volumen debe ajustarse para garantizar que, al incrementar el tamaño la gota por exigencias climáticas, la densidad de impactos (gotas/cm^2) no descienda del umbral biológico crítico (Whitford *et al.*, 2024).

SEGURIDAD QUÍMICA:
a menor volumen, mayor es la exigencia sobre la calidad del agua y la compatibilidad de las mezclas. El volumen de agua actúa como el solvente que previene la inestabilidad físico-química del caldo y la inactivación de los activos (Rizobacter, 2014; Rajashekhar *et al.*, 2025).

El operador profesional debe, por tanto, abandonar la búsqueda del "volumen mínimo posible" y adoptar el "volumen óptimo preventivo". Esta sutil diferencia de criterio transforma una aplicación de compromiso en un tratamiento de alta precisión, lo que asegura que cada litro aplicado se traduzca en una dosis efectiva sobre el objetivo.

6.7 Ancho de franja o faja

En la pulverización con drones, el área cubierta en una pasada no es una medida estática. La aerodinámica de los rotores expande el abanico de pulverización más allá de la envergadura del equipo, creando una zona de deposición influenciada por la energía del flujo descendente (Deveau, 2025). Para el profesional, distinguir entre el ancho de faja total y el ancho de faja efectivo es la base de la uniformidad, siendo:

ANCHO DE FAJA TOTAL:
es la distancia máxima entre los puntos extremos donde impactan las gotas. No debe usarse para la planificación operativa, ya que en los márgenes la densidad de impactos es errática y decreciente.

ANCHO DE FAJA EFECTIVO:
es la sección central de la pasada donde la distribución de gotas es homogénea y es el valor que debe ingresarse en el software de misión (distancia entre pasadas). Este parámetro garantiza que el solapamiento compense las caídas de dosis en los extremos, buscando lo que Bonds *et al.* (2024) definen como equivalencia de depósitos, que garantice una uniformidad comparable a los sistemas convencionales.

La estabilidad del ancho efectivo depende de la masa de aire desplazada. Según Pagliai *et al.* (2025), los drones de gran porte (como el T50) logran anchos efectivos significativamente superiores y más estables ante perturbaciones ambientales, debido a que su mayor peso genera un flujo con mayor inercia que "obliga" al patrón de aspersión a expandirse de forma previsible. En drones más livianos, el ancho efectivo es más sensible a las variaciones de altura y ráfagas laterales, lo que exige configuraciones más conservadoras (Deveau, 2025).

La altura de vuelo actúa como el regulador físico del ancho. A medida que el dron se aleja del blanco (hasta un límite de 4 a 4,5 m), el flujo diverge y se expande lateralmente. Sin embargo, si se supera la altura óptima, la energía del aire se disipa, el ancho efectivo se contrae y el riesgo de deriva de corto alcance aumenta, y se rompe la uniformidad del tratamiento (Bonds *et al.*, 2024, Pagliai *et al.*, 2025).

Finalmente, estudios como el de Liu Y., *et al.* (2024), en cultivos arbóreos (perales) de montaña, destacan que el ajuste del ancho de faja efectivo debe considerar la interacción entre el flujo descendente y la pendiente del terreno. Estos parámetros permiten configurar vuelos autónomos precisos que garantizan una deposición uniforme en todo el dosel, incluso en topografías complejas.

Entonces, ¿cuál es el ancho óptimo de faja? Basado en la integración de la bibliografía consultada, el Tabla 3 propone rangos de ancho de faja efectivo para la planificación de misiones.

Tabla 3. *Ancho de faja óptimo y altura de vuelo sobre el canopeo recomendado para distintos tipos de drones. Fuente: Elaboración propia basada en la bibliografía citada.*

PORTE DEL DRON	ANCHO DE FAJA EFECTIVO RECOMENDADO	ALTURA SUGERIDA (SOBRE EL BLANCO)
PEQUEÑO (ej. T10 / T30)	**4,0 a 6,0 m**	**2,0 a 3,5 m**
MEDIOS A GRANDES (ej. T40 / T100)	**7,0 a 9,0 m**	**3,0 a 4,0 m**

¿Por qué estos valores? (Fundamento de los rangos operativos)

En drones de porte pequeño, intentar superar los 6 m de ancho efectivo suele derivar en "zonas ciegas" entre pasadas (franjas con baja dosis), debido a que estos equipos carecen de la energía aerodinámica necesaria para desplazar gotas de mayor diámetro hacia los extremos laterales.

En cambio, en drones de gran porte, el rango de 7 a 9 m representa el ancho de trabajo ideal. En este intervalo se capitaliza la potencia de los rotores y el patrón de los atomizadores rotativos, que garantiza un solapamiento lo suficientemente generoso para mantener la homogeneidad del depósito.

Como criterios generales según el objetivo buscado, en aplicaciones de productos fitosanitarios de contacto, se recomienda optar por el límite inferior de estos rangos (ej. 7 m en drones de mayor porte) para maximizar la densidad de impactos (Serban, 2026). Para aplicar productos sistémicos en condiciones ideales, se puede trabajar en el límite superior del rango, priorizando la capacidad operativa sin comprometer la eficacia.

La única forma de confirmar el ancho de faja efectivo real para una mezcla y la configuración específica es la validación a campo mediante el uso de tarjetas de papel hidrosensible. El límite del ancho efectivo se sitúa en el punto donde la densidad de gotas cae por debajo del requerimiento biológico del producto aplicado (Bonds *et al.*, 2024).

Por último, debe recordarse que el valor de distancia entre pasadas configurado en el control remoto es una estimación operativa que debe ser verificada y validada a campo bajo las condiciones reales de trabajo.

07 CONDICIONES METEOROLÓGICAS Y VENTANAS DE APLICACIÓN



7. Condiciones meteorológicas y ventanas de aplicación

La gestión del ambiente meteorológico representa, posiblemente, el factor de mayor incertidumbre en la pulverización agrícola, el cual adquiere una relevancia crítica en la operación con drones. Mientras que los parámetros del equipo son ajustables, la atmósfera es una variable externa que el operador debe aprender a interpretar con rigor técnico. El objetivo trasciende la simple prevención de la deriva: se trata de garantizar que la gota conserve su integridad física y su energía cinética hasta alcanzar el objetivo biológico.

7.1 El comportamiento dinámico de los parámetros meteorológicos

Para una operación profesional, es imperativo analizar la interacción de tres variables fundamentales a lo largo de la jornada (Figura 4): temperatura, humedad relativa (HR) y velocidad del viento. Al no ser datos estáticos, su dinámica determina la viabilidad operativa y la eficiencia y eficacia del tratamiento.

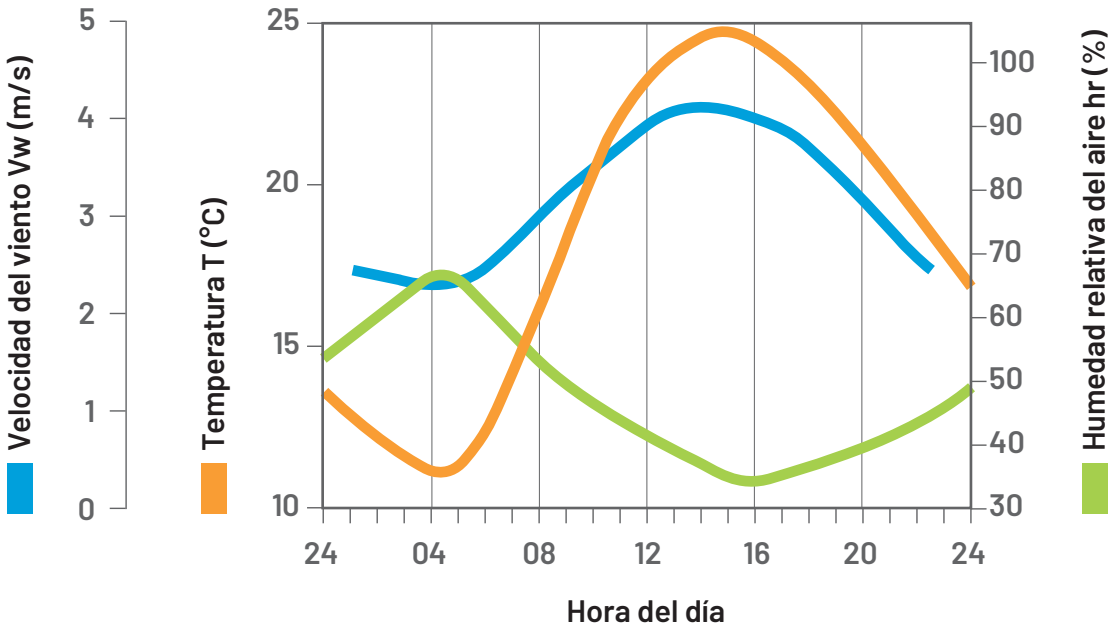


Figura 4. *Desarrollo de la velocidad del viento, temperatura del aire y humedad relativa del aire en función de las horas del día. Fuente: Catálogo Teejet Technologies LI52-ES, 2023.*

7.2 Temperatura y Humedad Relativa (HR)

Ambas variables definen el potencial de evaporación del ambiente. Como indica CASAFE (2020), temperaturas superiores a los 25 °C combinadas con una HR inferior al 50 % generan un entorno hostil que reduce el diámetro de la gota de forma acelerada. Esto es cierto, pero puede quedar en una simplificación si solo se hace referencia a la región pampeana argentina. Para abarcar la gran variedad de zonas agroecológicas que tiene nuestro país debemos realizar un análisis más profundo.

Al observar el registro temporal de la Figura 4, se identifica claramente el "Cruce Crítico": hacia el mediodía, la curva de temperatura asciende mientras la de HR desciende drásticamente, lo que lleva la capacidad evaporativa a su máximo. Si a esto se suma un incremento en la intensidad del viento, la ventana de aplicación se considera técnicamente cerrada; en tal caso, se debe aguardar hasta que los valores de los parámetros se reviertan, con una vigilancia constante ante la posible formación de inversiones térmicas.

Asimismo, organismos como la OECD (2021) e ISO[11] (2023) subrayan que, en horarios de máxima radiación solar, el downwash del dron puede verse neutralizado por corrientes térmicas ascendentes (convección), lo que impide que la pulverización alcance el blanco.

Para este análisis, se evalúa un parámetro que combina tanto la temperatura como la HR que se llama Delta T.

7.3 Delta T: el indicador de supervivencia de la gota

Para simplificar la complejidad meteorológica en una métrica operativa, se utiliza el parámetro Delta T (ΔT). Según Carrancio y Massaro (2017), este valor, que expresa la diferencia entre la temperatura del bulbo seco y el húmedo, es el mejor predictor de la tasa de evaporación (Figura 5).

- **RANGO ÓPTIMO (2 A 8):** representa la ventana de máxima eficiencia, en la cual la gota mantiene su tamaño y alcanza el objetivo con la energía cinética y la masa planificadas. A medida que el ΔT aumenta, crece la capacidad deshidratante de la atmósfera, por lo que se debe utilizar adyuvantes (aceites o polímeros) para mitigar este efecto (Rizobacter, 2014).

- **RANGO CRÍTICO (> 10):** en drones que operan con bajos volúmenes y gotas finas, un ΔT elevado es peligroso. Wang et al. (2020b) demuestran que la altura de vuelo potencia la deshidratación; si el aire es excesivamente seco, la gota pierde gran parte de su volumen antes del impacto, y queda a merced de la deriva. Bajo estas condiciones, el ingrediente activo puede incluso cristalizarse antes de tocar el follaje. El uso de antievaporantes es la única herramienta eficaz para extender la vida media de la gota (Rizobacter, 2014 y Syngenta, 2020).

- **RANGO CRÍTICO (< 2):** se asocia con situaciones de rocío intenso o saturación. Aunque no afecta el vuelo del dron y la gota no se evapore, el exceso de agua en la superficie del objetivo provoca que el producto no logre adherirse, y se escurra hacia el suelo. Este fenómeno se conoce como endoderiva (pérdida dentro del propio lote).

[11] ISO: International Standardization Organization.

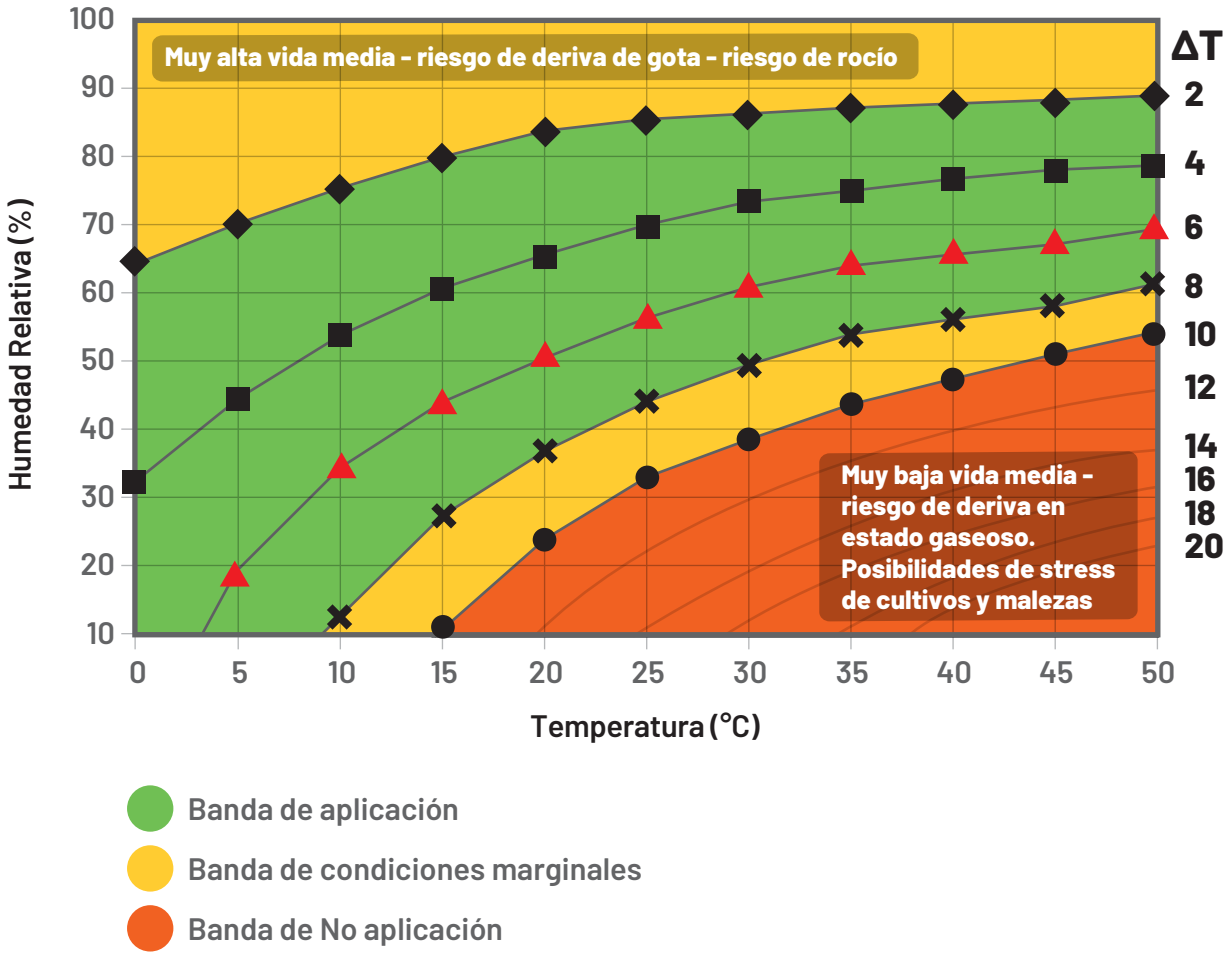


Figura 5. *Curvas de ΔT en función de humedad relativa y temperatura. Fuente: Carrancio y Massaro (2017).*

7.4 Velocidad del viento

El viento es un factor necesario para el transporte y la dispersión de la gota en las aplicaciones, incluidas las realizada con RPA, por lo que la calma absoluta debe considerarse una señal de alerta.

Según el estándar ISO 23117-1 (2023), la velocidad del viento debe medirse a la altura de operación del equipo. Debido a la rugosidad del cultivo, la velocidad del viento se reduce en los estratos bajos, lo que crea una falsa sensación de calma que desaparece a los 3 o 4 m de altura, donde vuela el equipo y el flujo resulta más intenso.

→ **VIENTO MODERADO (3 A 10 KM/H):** es el rango ideal. Un flujo constante permite compensar la deriva y asegura que el *downwash* actúe eficazmente sobre el canopeo.

→ **VIENTO VARIABLE (10 A 15 KM/H):** en este rango el flujo alterna entre laminar y turbulento. Se puede aplicar con extrema precaución y con un monitoreo de la estabilidad de la cortina de pulverización. Si el dron debe incrementar excesivamente su ángulo de inclinación para compensar ráfagas, el patrón de aplicación se vuelve impredecible y la operación debe suspenderse.

VIENTO NULO O MUY BAJO (< 3 KM/H): durante amaneceres, atardeceres calmos, incluso durante la noche, aumenta el riesgo de inversión térmica. En este estado, una capa de aire cálido actúa como una "tapa" sobre el aire frío superficial, lo que provoca que la nube de pulverización quede suspendida y se desplace lateralmente de forma impredecible. CASAFE (2020) aconseja interrumpir la aplicación ante la ausencia de viento, ya que esta condición de calma favorece fenómenos de inversión térmica observables a través de indicadores como el humo horizontal o el confinamiento de polvo en suspensión. Asimismo, la OECD (2021) advierte que, sin viento, el *downwash* puede ser insuficiente para vencer corrientes convectivas en días de calor extremo, y las gotas quedan atrapadas en las capas superiores de la atmósfera.

Ante vientos superiores a los 15 km/h, la aplicación debe suspenderse sin excepciones. Finalmente, UAPASTF[12] (2023) destaca que la altura de vuelo debe ajustarse inversamente a la intensidad del viento: a mayor intensidad, menor altura, para minimizar el tiempo de exposición de la gota al arrastre lateral.

7.5 El índice Kp y la seguridad de navegación

La operación profesional de drones agrícolas no solo depende de las condiciones atmosféricas locales, sino de la interacción geomagnética. El Índice Kp *(Planetary K-index)* es el indicador global utilizado para caracterizar la magnitud de las tormentas geomagnéticas. Para el operador de drones, este índice representa la fiabilidad de sus sistemas de navegación y la estabilidad de sus correcciones de precisión.

El impacto en los Sistemas Globales de Navegación de Satélites (GNSS)

Las tormentas geomagnéticas, impulsadas por la actividad solar, afectan la operatividad del dron de dos maneras fundamentales según la bibliografía científica reciente:

Degradación del posicionamiento de precisión. Investigaciones de Luo *et al.* (2022) demuestran que las tormentas geomagnéticas severas degradan significativamente el rendimiento del posicionamiento de precisión (PPP[13] y RTK[14]). Las perturbaciones en la ionosfera aumentan la tasa de variación del contenido total de electrones (ROTI), lo que genera "saltos de ciclo" *(cycle slips)* en la señal. Para un dron, esto se traduce en una pérdida de la precisión centimétrica (estado "Fix"[15]), que compromete la exactitud de la aplicación en los límites del lote o en el solapamiento. El piloto del dron debe registrar en su bitácora de decisiones el estado del RTK ("Fix" o "Float[16]") al inicio y al finalizar la misión, ya que la deriva electrónica por fallas de posicionamiento es un riesgo legal no cubierto por las distancias de amortiguamiento meteorológico.

[12] UAPASTF: Unmanned Aerial Pesticide Application System Task Force.
[13] El Posicionamiento Puntual Preciso (PPP) es una técnica GNSS que logra precisiones centimétricas utilizando un único receptor, sin necesidad de una estación base cercana. Emplea órbitas y relojes de satélite precisos (correcciones globales) para corregir errores atmosféricos y de satélite. Se aplica en topografía, agricultura y monitoreo. Son los que están ubicados en los drones o autos, sin conexión a una antena RTK.
[14] RTK (Real-Time Kinematic o Cinemática en Tiempo Real) es una tecnología de posicionamiento satelital (GNSS) que eleva la precisión GPS estándar de metros a centímetros en tiempo real. Utiliza una estación base fija y un receptor móvil (rover) para corregir instantáneamente errores atmosféricos y de señal, ideal para topografía, drones y agricultura.
[15] Estado "Fix" (o Fijo) en un dron indica que el sistema GPS/GNSS ha alcanzado la máxima precisión de posicionamiento, generalmente con un error inferior a 10 cm, al recibir correcciones estables (habitualmente vía RTK). Es la condición ideal y necesaria para levantamientos topográficos, fotogrametría o vuelos automatizados precisos.
[16] Estado "Float" (flotante) se refiere al modo de posicionamiento satelital (GNSS/RTK) en el que el dron recibe correcciones de coordenadas en tiempo real, pero aún no ha logrado calcular su ubicación exacta. En este estado, la precisión es decimétrica (varía entre unos pocos centímetros y un metro) y no es segura para tareas profesionales.

Interferencias en la comunicación y sensores. Lanzerotti (2001) explica que los fenómenos de clima espacial pueden inducir corrientes eléctricas que afectan los componentes electrónicos y los magnetómetros (brújula). Una brújula afectada por una tormenta geomagnética impedirá que el dron mantenga una orientación estable, lo que genera comportamientos erráticos en el rumbo o la incapacidad de ejecutar un "Retorno a Casa" (RTH) seguro.

Escalas de Riesgo Operativo

El riesgo de inestabilidad en el caldo de aplicación aumenta cuando se presentan una o más de las siguientes condiciones:

La NOAA (2024) establece escalas de tormentas geomagnéticas (G1 a G5) vinculadas directamente al Índice Kp. Para la operación de drones, estas se traducen en los siguientes umbrales de seguridad:

Kp 0 a 3 (Situación normal): la ionósfera se encuentra estable. Es el rango de máxima fiabilidad para vuelos autónomos y misiones de precisión.

Kp 4 (Actividad inquieta): comienzan a detectarse irregularidades ionosféricas. Según Mendillo *et al.* (2018), estas irregularidades pueden ser localizadas (especialmente en regiones ecuatoriales), lo que exige al operador monitorear constantemente el número de satélites y la calidad de la señal.

Kp 5 o superior (Tormenta geomagnética): a partir de este nivel (G1), la NOAA[17] advierte sobre variaciones en la propagación de radio y errores de navegación. Los estudios de Luo *et al.* (2022) confirman que en estos niveles la precisión del posicionamiento horizontal y vertical puede sufrir desviaciones métricas, que determina que la operación sea técnicamente insegura.

Consideraciones críticas para el operador

La meteorología espacial es "invisible", pero sus efectos son físicos. Un Índice Kp elevado puede causar:

Pérdida de la señal RTK: el sistema pasa de "Fix" a "Float" o "Single", invalidando la prescripción de dosis variable (indicaciones que pueden observarse en el control remoto).

Deriva electrónica: el dron puede desplazarse de su ruta sin que el operador detecte viento, debido a errores de cálculo en el receptor GNSS.

Comportamiento errático de la brújula: dificultad para mantener la línea de vuelo o rotaciones inesperadas sobre su eje.

Como recomendación, antes de cada jornada, el operador debe consultar el reporte del Space Weather Prediction Center (NOAA)[18] o las aplicaciones de soporte. Si el Índice Kp es igual o mayor a 5, la recomendación de seguridad es suspender las aplicaciones autónomas de precisión hasta que la actividad geomagnética retorne a niveles estables.

[17] NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration): es una agencia científica del gobierno de EE.UU. dentro del Departamento de Comercio. Su misión es entender y predecir cambios en el clima, tiempo, océanos y costas, además de gestionar la pesca y proteger recursos marinos.

[18] Para consultar el Índice Kp (Planetary K Index), ingresar al siguiente link: https://www.swpc.noaa.gov/#

7.6 Gestión de ventanas operativas y eficiencia agronómica

La planificación de la misión debe priorizar las franjas horarias de mejor estabilidad atmosférica. Si bien la recuperación de la humedad hacia el atardecer suele reabrir ventanas eficientes, el operador debe ser consciente de que no existe tecnología que compense el riesgo de aplicar fuera de los límites aceptables.

La precisión espacial del dron es irrelevante si las condiciones ambientales impiden que el fitosanitario cumpla su función biológica.



08 CÓMO SE EJECUTA UNA MISIÓN PROLIJA

8. Cómo se ejecuta una misión prolija

Una misión de pulverización eficiente no comienza en el despegue, sino en la planificación sistémica de la operación. La integración de la receta agronómica, las indicaciones del marbete, la topografía del lote y la seguridad del entorno, por ejemplo, conforman una unidad operativa indivisible. El éxito del tratamiento es, en última instancia, el resultado de una preparación rigurosa en tierra.

Antes de iniciar la operación, es imperativo realizar un reconocimiento exhaustivo del área de trabajo. Esto incluye la identificación (georreferenciación) de zonas sensibles (viviendas, escuelas, apiarios), cursos de agua, obstáculos físicos (líneas eléctricas, montes, etc.) y rutas de acceso.

Basándose en los objetivos biológicos (cultivo-plaga) y en el diagnóstico meteorológico, se deben definir los aspectos básicos de la intervención: el volumen de aplicación, la densidad de impactos (el número de gotas por cm^2) y el tamaño de gota (DVM), la altura de vuelo, la velocidad de avance y el ancho de faja efectivo a utilizar.

Las trayectorias deben planificarse para maximizar la capacidad operativa y minimizar los riesgos, tanto para la salud de los operadores, las personas vecinas a la zona de aplicación, en lotes linderos y para el ambiente. Se recomiendan pasadas largas con virajes amplios fuera del área de tratamiento, aprovechando los sistemas de control de flujo para evitar la sobredosificación en las cabeceras. También hay que lograr identificar objetos altos (árboles o molinos, por ejemplo) para establecer cuál será la altura de retorno a base.

Asimismo, es fundamental consultar las normativas vigentes para conocer si hay zonas de exclusión o de amortiguamiento (buffers) sobre áreas sensibles: viviendas, escuelas, apiarios, cauces de agua y otras. La orientación de los rumbos o líneas de vuelo deben definirse de modo que el viento no desplace la cortina de pulverización hacia áreas sensibles protegidas.

8.1 Estructura del equipo operativo y la gestión de la seguridad

Se destaca la necesidad de profesionalizar la figura del "equipo de aplicación", se debe reemplazar la figura del "piloto solitario" por una unidad operativa coordinada, donde la distinción de roles resulta clave para la seguridad operacional.

La seguridad y la eficacia de la misión se potencian mediante un trabajo coordinado. Siguiendo los estándares de la UAPASTF (2023), la figura del Observador Visual *(Visual Observer)* es fundamental para complementar la labor del piloto. Mientras este último se concentra en el control del RPA, el monitoreo de los parámetros de aspersión y el cumplimiento del plan de vuelo, el observador supervisa de forma constante el entorno periférico. Su función es detectar factores externos que podrían pasar desapercibidos por el piloto, tales como el ingreso de personas o animales al lote, el tránsito vehicular o cambios repentinos en las condiciones ambientales.

Personal de apoyo y logística de carga

Si bien una sola persona puede realizar las tareas de operación y logística, se considera adecuado, y muy recomendable que, además del piloto del dron, el equipo se complete con personal de apoyo, una pieza clave para la eficiencia operativa. Esta estructura, conformada habitualmente por una o dos personas, asume la responsabilidad del despliegue y del repliegue del equipo, la limpieza técnica del sistema, la gestión de carga de baterías y el reabastecimiento del tanque. Su rol más crítico es, sin embargo, la elaboración de la mezcla de aplicación. Como ya se ha enfatizado, la estabilidad del caldo depende del entrenamiento especializado de este personal, a fin de asegurar una composición química apta para las altas concentraciones que demanda la tecnología RPA.

Seguridad laboral y uso de Equipos de Protección Personal (EPP)

En todo momento, el personal debe velar por su integridad física y la preservación del ambiente. El uso riguroso de EPP es la herramienta primaria para mitigar riesgos, especialmente para el personal de apoyo. Al manipular directamente los fitosanitarios concentrados durante los procesos de mezcla, carga y lavado del dron, su nivel de exposición potencial es mayor. El cumplimiento estricto de los protocolos de protección en cada etapa del proceso no es operacional, es un requisito de la seguridad.

También, resulta de gran importancia establecer el procedimiento a seguir al momento de que una persona se interponga o esté en el camino de un dron en la operación de pulverización como, por ejemplo, suspender la aplicación hasta que el vuelo vuelva a ser seguro.

8.2 Validación operativa: el ensayo en campo

Antes de proceder con la aplicación total en el lote, es necesario realizar una prueba de verificación técnica. Este paso, pilar de las buenas prácticas de aplicación, no requiere equipamiento complejo, sino una validación empírica de la realidad ambiental y operativa de campo.

Se deben colocar tarjetas hidrosensibles de forma perpendicular a la dirección de avance para evaluar tres aspectos críticos:

→ **Cobertura y penetración:** confirmar que el depósito sea suficiente en el estrato del cultivo donde se encuentra el objetivo biológico.

→ **Uniformidad:** verificar la ausencia de "franjas" o “valles de deposición”, es decir, fallas en el patrón de mojado.

→ **Calidad de gota:** constatar que, bajo las condiciones actuales de viento y Delta T, no se genere una proporción excesiva de gotas “exentas de masa” (gotas finas con baja energía cinética) propensas a la deriva por viento y/o por evaporación.

→ Para garantizar que la validación técnica mediante tarjetas hidrosensibles sea fiable y representativa del riesgo real de deriva, es imperativo estandarizar el proceso de digitalización de las muestras. Se debe especificar que el escaneo de las tarjetas se realice obligatoriamente a una resolución mínima de 1.200 dpi (puntos por pulgada). Asimismo, los archivos resultantes deben almacenarse exclusivamente en formato .bmp (mapa de bits), evitando el uso de formatos comprimidos como .jpg o .jpeg. Esta precisión técnica es crítica debido a que los formatos comprimidos degradan la calidad de la imagen y alteran la proporción de los impactos capturados. Una digitalización con resolución insuficiente o con pérdida de datos por compresión puede subestimar sistemáticamente la presencia de gotas finas exentas de masa (aquellas con baja energía cinética y propensas a la deriva por viento o evaporación), lo que resultaría en una lectura errónea de la cobertura y generaría una falsa sensación de seguridad técnica al aplicador respecto a la gestión del riesgo ambiental.

Una verificación de este tipo permite ajustar variables como la altura o el espectro de gota, evitando fallos de control o conflictos por deriva que comprometan la campaña.

Durante el vuelo, la precisión depende de la regularidad. Mantener una altura de vuelo constante respecto al canopeo y una velocidad de avance estable es vital para que el *downwash* del dron actúe de forma uniforme. La toma de decisiones en tiempo real es el sello de un profesional: si las condiciones meteorológicas se degradan (sea por incremento de ráfagas, rotación del viento o ascenso del Delta T hacia rangos críticos), el operador debe tener la solvencia y la autoridad operativa para suspender la tarea.

Según el criterio de CASAFE (2020), no existe beneficio agronómico que compense el riesgo de una aplicación fuera de los parámetros de seguridad. La reputación del aplicador y la sostenibilidad de la tecnología dependen de esta prudencia operativa.



09 GESTIÓN DE RIESGO DE DERIVA EN APLICACIONES CON RPA

9. Gestión de riesgo de deriva en aplicaciones con RPA

La deriva -el desplazamiento del fitosanitario fuera del blanco objetivo- es el fenómeno físico de mayor impacto en la sostenibilidad de las aplicaciones de fitosanitarios con todo tipo de equipo de aplicación, pero principalmente con drones. **Su gestión trasciende la eficacia agronómica, es una cuestión de responsabilidad legal, seguridad ambiental y de las personas.**

La particularidad del dron radica en que, a diferencia de otras tecnologías, la deposición depende de la compleja interacción aerodinámica entre el flujo descendente de los rotores (*downwash*) y las variables operativas (Wang *et al.*, 2018a). Para la determinación precisa del riesgo de deriva y la validación de la seguridad ambiental se recomienda seguir el *"Protocolo de ensayo para la medición de deriva en campo de sistemas remotamente tripulados"* (Platz *et al.*, 2026). Este protocolo estandariza la recolección de muestras para cuantificar el depósito de gotas fuera de la zona de aplicación, que permite una validación científica de la labor.

A continuación, se detalla la influencia de cada parámetro en el incremento del riesgo de deriva y las Buenas Prácticas Agrícolas (BPA) recomendadas para su mitigación.

9.1 Altura de vuelo: la variable de mayor sensibilidad

El aumento de la altura es el factor que más potencia la deriva. Wang *et al.* (2020b) demostraron que al elevar la altura de vuelo de 2 a 4 m, simultáneamente se reduce drásticamente la llegada de gotas al objetivo y la deriva aumenta significativamente, debido a que las gotas pierden la protección del *downwash* y quedan expuestas a las corrientes horizontales.

Este riesgo ha sido cuantificado por Antuniassi *et al.* (2022), quienes determinaron que volar encima de los 4 m de altura genera niveles de deriva significativamente superiores en comparación con los 2 m. Sin embargo, su aporte más crítico para las BPA es la interacción con la tecnología de atomización: el uso de boquillas con inducción de aire *(Drift Reduction Technology - DRT)* puede reducir la deriva entre un 45 % y un 77 %. En consecuencia, la combinación de una altura mínima (2 m) con tecnología DRT representa el escenario de máxima seguridad ambiental.

Por su parte, He *et al.* (2017) y Wang *et al.* (2018a) advierten que superar los límites de altura recomendados no solo dispersa el producto fuera del lote, sino que degrada el "balance de masa" de la aplicación, o sea la cantidad de producto recuperado sobre el objetivo vs la cantidad de producto que no logra alcanzarlo. Esto provoca que los vórtices generados por los rotores pierdan su capacidad de penetración, y queden los estratos medios e inferiores del cultivo sin protección efectiva.

La recomendación de BPA, según el porte del equipo es: i) en drones pequeños la altura operativa debe estabilizarse entre 1,5 y 3 m sobre el objetivo y ii) en drones de gran porte, se recomiendan alturas de entre los 2,5 y los 4 m.

Según los estándares ISO 23117-1 (2023) y UAPASTF (2023), ante la presencia de viento, la altura de vuelo debe reducirse al mínimo posible a fin de que garantice la seguridad de vuelo y reduzca la ventana de exposición al arrastre lateral.

9.2 Velocidad de avance y estabilidad del viento

La velocidad de desplazamiento es un factor crítico sobre la distribución del depósito. Liu Z. *et al.* (2024), identificaron que velocidades excesivas rompen la consistencia del flujo de aire, y se generan turbulencias que desprenden las gotas de la cortina de pulverización. Asimismo, Dengeru *et al.* (2022) observaron que, al incrementar la velocidad de avance, la deriva aumenta debido a la inclinación del flujo de aire hacia la zona posterior del equipo, lo que reduce el efecto *downwash*.

En equipos de gran porte (por ejemplo, el T100), al alcanzar velocidades superiores a 45 km/h, el dron entra en régimen de vuelo traslacional. En esta fase, la sustentación es generada por el flujo de aire horizontal y el beneficio mecánico del *downwash* sobre el cultivo desaparece casi por completo (Deveau, 2025). Además, las velocidades superiores a 30 km/h requieren topografías completamente llanas y sistemas RTK en estado "Fix" ininterrumpido. En aquellas situaciones donde no se cumplan ambos requerimientos, la recomendación es de no aplicar, ya que no se estarían cumpliendo las BPA.

De acuerdo con la categoría de equipo considerado, las recomendaciones operativas son: i) con drones pequeños, se recomienda una velocidad de trabajo de entre 15 y 21 km/h (superar los 25 km/h compromete la uniformidad del depósito); ii) con drones medianos, la velocidad optima está en alrededor de los 25 km/h, y iii) con drones de gran porte (T100), la velocidad operativa eficiente oscila entre los 30 y los 36 km/h.

La UAPASTF (2023) subraya la importancia de evitar aceleraciones y frenados bruscos para mantener el balance de masa de la aspersión, lo cual también es mencioando en Wang *et al.* (2018a). Por lo tanto, el uso de sistemas de control de vuelo automáticos -utilizando RTK- es una BPA fundamental, ya que garantiza una velocidad de avance constante, transiciones suaves y se minimiza la estela de gotas finas generada por inercia aerodinámica.

9.3 Tamaño de gotas y atomización

El espectro de gotas constituye el factor crítico que define el potencial de deriva en una aplicación. El incremento en la velocidad de rotación (RPM) en general reducen simultáneamente los diámetros volumétricos, en particular el diámetro del 10 % del volumen acumulado (DV_{10}). Por este motivo, resulta fundamental regular los límites operativos de las RPM para evitar que el DV_{10} caiga por debajo de los 150 micrones, umbral en el cual las gotas se vuelven altamente susceptibles a perderse por evaporación o por transporte físico en forma de exoderiva (Hoffmann *et al.*, 2012; Proulx *et al.*, 2024; Platz *et al.*, 2025). Bonds *et al.* (2024) señalan que, si bien la deriva del dron es menor que la de los aviones agrícolas convencionales, es mayor que la de los equipos terrestres y debido al uso de gotas finas, puede igualar el riesgo de deriva de estos equipos, incluso al de una pulverizadora hidroneumática vertical (airblast), como las utilizadas en cultivos de frutales, que produce un tamaño de gota de ultra fino a muy fino.

Considerando tanto los criterios de BPA y el espectro de gotas generados, se debe configurar el equipo para producir gotas de categoría gruesa *(coarse)* a muy gruesa *(very coarse)*, según la clasificación ASABE S.572.3 (2025). El objetivo es maximizar la masa de la gota para que su energía cinética sea suficiente para vencer la resistencia del aire y la evaporación antes de alcanzar el objetivo.

Bajo escenarios de elevado Delta T (baja humedad relativa y temperaturas elevadas), la tasa de evaporación de las gotas pequeñas es tan alta que pueden desaparecer antes de tocar el canopeo, convirtiéndose en deriva de largo alcance. En atomizadores centrífugos, es imperativo reducir las RPM de los discos atomizadores para aumentar el diámetro volumétrico mediano de las gotas que garantice así que el 90 % del volumen aplicado se mantenga dentro de rangos seguros frente al transporte eólico (Platz *et al.*, 2025).

En equipos configurados con boquillas hidráulicas convencionales, la estrategia técnica debe ser el uso de boquillas de inducción de aire (UAPASTF, 2023). Estas generan gotas de mayor tamaño con burbujas de aire en su interior, lo que reduce drásticamente el porcentaje de "finos" (gotas <150 µm) y mejora la penetración por peso.

Es fundamental que el operador comprenda que el viento relativo generado por el propio avance del dron actúa como un factor de ruptura adicional; por lo tanto, trabajar con gotas más grandes compensa esa fragmentación secundaria y estabiliza el patrón de distribución, incluso en condiciones meteorológicas marginales.

Por último, se debe mencionar que existe una diferencia importante entre el tamaño de la gota que se programa en el RPA (VMD o DMV teórico) y lo que realmente llega al cultivo, el cual es, efectivamente, mucho más marcada en drones que en aplicaciones terrestres. Esta discrepancia se debe a una combinación crítica de factores físicos y aerodinámicos propios de la tecnología de Bajo Volumen (LV) y Ultra Bajo Volumen (ULV) y el diseño de los drones.

9.4 Volumen de aplicación, tamaño de gotas y uso de coadyuvantes

Los volúmenes reducidos, Bajo Volumen y Ultra Bajo Volumen característicos de los drones, suelen asociarse con gotas de categoría “muy finas” a “finas” (ASABE S.572.3, 2025) para compensar la menor tasa de mojado (falta de cobertura). Sin embargo, esta configuración es incompatible con la seguridad ambiental en condiciones de baja humedad, alta temperatura (combinados ambos parámetros en el Delta T) o viento en exceso.

El riesgo no reside únicamente en el diámetro inicial de la gota en sí. En condiciones meteorológicas ideales, este tipo de aplicación es muy efectiva, no obstante, la realidad de campo suele ser diferente. Cuando los volúmenes son tan bajos, se producen gotas inferiores a los 200 µm, las cuales carecen de la energía cinética necesaria para vencer las corrientes de aire y la resistencia del canopeo. Esto las expone a las condiciones micrometeorológicas imperantes que facilitan su deriva por corrientes de aire o la reducción de su diámetro por evaporación.

Whitford *et al.* (2024) resaltan que una gota pequeña en bajo volumen actúa como un concentrado químico de alto riesgo. Por tanto, la gestión de deriva exige que, si el ambiente se vuelve crítico, el operador debe incrementar el volumen de aplicación y reducir las RPM de los atomizadores (Platz *et al.*, 2025) para priorizar la deposición por inercia y peso de la gota por sobre la cantidad de impactos por cm^2.

En este marco, la implementación de coadyuvantes es fundamental. Wang *et al.* (2018b) demostraron que el uso de antiderivantes y polímeros reduce significativamente el potencial de deriva al uniformar el espectro y aumentar la viscosidad del caldo, y de esta manera, lograr que se estabilice la gota durante su trayecto hacia el objetivo.

9.5 Ancho de faja

El riesgo de deriva y de fallas en el control surge cuando el ancho de faja se ve distorsionado por factores externos. Liu Y. *et al.* (2024) demostraron que el uso de unidades formadoras de gota (UFG) que generan gotas finas hace que el ancho de faja sea extremadamente sensible al viento lateral; incluso brisas ligeras pueden desplazar toda la "huella" de deposición varios metros fuera de la trayectoria de vuelo. Esto no solo genera franjas con subdosis (zonas de escape), sino que proyecta el producto hacia los límites del lote, y se incrementa el riesgo de deriva (exoderiva).

La estructura de esta faja está íntimamente ligada al diseño de la aeronave. He *et al.* (2017) y Wang *et al.*. (2018a) explican que en vehículos multirrotor, el ancho de faja efectivo está determinado por la interacción de los vórtices de extremo de brazo. Si el dron vuela a una altura excesiva, estos vórtices se expanden demasiado y pierden energía, lo que resulta en un patrón de deposición "en forma de M": picos de alta concentración debajo de los rotores y valles con bajas dosis en el centro y los extremos.

La ISO 23117-1 (2023) y la UAPASTF (2023) subrayan que el ancho de faja debe ser ajustado dinámicamente según la velocidad del viento. En presencia de viento cruzado, el ancho efectivo real se reduce y el operador debe compensar esta distorsión en el software de planificación de misión, en el control remoto del dron, para evitar que la deriva acumulada en los bordes de la parcela supere los límites de seguridad. La integración de sistemas RTK es, nuevamente, una BPA crítica, ya que garantiza que el solapamiento diseñado se cumpla estrictamente en cada pasada, y que el producto alcance el blanco objetivo.

Como recomendación operativa: el ancho de faja efectivo debe determinarse mediante validaciones a campo con el uso de tarjetas hidrosensibles y evitar confiar exclusivamente en el ancho nominal proporcionado por el manual del fabricante. Un solapamiento preciso entre pasadas, generalmente del 25 % al 30 %, es la herramienta principal para compensar la menor densidad de gotas en los extremos de la faja de pulverización y asegurar una dosis uniforme en todo el lote.

9.6 Gestión de condiciones meteorológicas críticas

El éxito de la aplicación depende de una correcta interpretación del ambiente (Carrancio y Massaro, 2017; CASAFE, 2020). Para garantizar la seguridad operacional y la eficacia biológica, se deben respetar los umbrales siguientes:

→ **Delta T (ΔT):** debe mantenerse entre 2 y 8. Un ΔT superior a 8 -implica que el aire muy seco y caliente con un gran poder desecante- provoca la evaporación instantánea de las gotas más pequeñas, convirtiéndolas en deriva de largo alcance.

→ **Viento:** el rango operativo seguro se sitúa entre 3 y 15 km/h. Vientos menores a 3 km/h son indicadores de riesgo de inversión térmica, donde la nube de aspersión queda suspendida sin una dirección definida y puede desplazarse kilómetros fuera del blanco (UAPASTF, 2023).

→ **Inversión Térmica:** no se debe aplicar bajo este fenómeno. En este estado de estabilidad atmosférica extrema, el downwash del dron carece de la energía suficiente para romper la capa de aire más frío superficial y depositar las gotas sobre el cultivo (Wang *et al.*, 2020a).

La recomendación de BPA es que el operador frente a la detección de inversión térmica o de ráfagas que superen los 15 km/h debería suspender la labor de inmediato.

9.7 Recomendaciones de distancias de seguridad

En base a la revisión de la OECD (2021), de datos experimentales de autores como Xue *et al.* (2014), Wang (2020a), Antuniassi *et al.* (2022), Donaldson (2023) y Bonds *et al.* (2024), y en la experiencia acumulada en jornadas a campo, se establecen recomendaciones precisas para la determinación de distancias de seguridad. Se recomienda una zona de seguridad técnica de 30 m (±15 m) para aplicaciones con RPA realizadas bajo Buenas Prácticas Agrícolas (BPA).

La definición de esta zona de 30 m sujeta a un rango de variabilidad técnica de ±15 m, constituye un parámetro operativo fundamentado en la evaluación del riesgo. Este intervalo, que delimita una banda de actuación de entre 15 y 45 m, no deriva de proyecciones estadísticas teóricas, sino de la convergencia de evidencia empírica: observaciones en el campo, sistematización de registros de compañías integrantes de CASAFE y el respaldo de la literatura científica internacional.

Su justificación técnica es clara: mientras que los primeros 15 m representan la zona crítica de máxima deposición de deriva (validada por la OECD, 2021), el margen adicional de 15 m funciona como un factor de seguridad. Este suplemento permite cubrir escenarios de riesgo variable, como diferencias en la tecnología de los equipos o fluctuaciones micrometeorológicas, siempre que se trabaje con los parámetros establecidos dentro de las BPA. De este modo, se asegura la integridad del entorno bajo un marco de gestión de riesgo situado en la realidad productiva.

Evidencia científica para la gestión del riesgo:

Concentración de la deriva: los estudios de Xue *et al.* (2014) y de la OECD (2021) confirman que la mayor proporción de la masa líquida desplazada (90%) se deposita de manera consistente dentro de los primeros 8 a 15 m desde el límite del lote.

Decaimiento exponencial: la cantidad de residuo disminuye al aumentar la distancia. Establecer una distancia de seguridad de 20 a 30 m reduce la probabilidad de exposición a niveles técnicamente insignificantes (OECD, 2021; Antuniassi *et al.*, 2022).

En configuraciones de alto riesgo (mayor altura, gotas finas y/o exceso de velocidad) se han detectado depósitos a distancias superiores a 50 m, incluso hasta los 100 m. A diferencia de esto, nuestra experiencia en jornadas de campo confirma lo que mencionan Wang *et al.* (2020a), Wang *et al.* (2020b), la OECD (2021), Antuniassi *et al.* (2022) y Bonds *et al.* (2024), que el uso de configuraciones conservadoras, bajo las BPA (altura <4 m, gotas "Muy Gruesas" y vientos <10 km/h, entre otros parámetros), confinan la deriva a rangos mínimos, equiparables o apenas superiores a los de una pulverizadora terrestre.

Para transformar estas recomendaciones en certezas definitivas para cada tipo de equipo de aplicación contamos con el "Protocolo de ensayo para la medición de deriva en campo" de Platz et al. (2026). Su implementación elimina la subjetividad y permite que el aplicador certifique su propia "distancia segura" en función de su tecnología específica (boquillas, atomizadores rotativos, RTK, etc.) y las condiciones meteorológicas locales.

En conclusión, esta zona de amortiguamiento técnica de 30 m (±15 m) ofrece la seguridad de que la mayoría de las gotas derivables queden confinadas en un margen seguro, siempre que se cumpla con los estándares operativos descriptos en esta publicación.



10 SEGURIDAD DEL OPERADOR

10. Seguridad del operador

La operación con RPA introduce una ventaja competitiva en seguridad: la separación física entre el aplicador y la nube de aspersión. Sin embargo, esta ventaja se neutraliza si no se gestionan con rigor los momentos de mayor exposición, que son la preparación de la mezcla, el reabastecimiento y la manipulación del equipo y de las fuentes de energía.

Al igual que en las aplicaciones terrestres o aéreas tripuladas, el mayor riesgo de contaminación en drones ocurre durante el proceso de la carga y la manipulación del equipo, como, por ejemplo, el mantenimiento de boquillas, con la diferencia de que en este tipo de aplicaciones no hay exposición al operador mientras se realiza la aplicación, ya que se encuentra distanciado de esta. Para estas tareas, el uso de los Equipo de Protección Personal (EPP) es la mejor barrera para resguardar la seguridad de los operadores y del personal de apoyo, y son las etiquetas de los productos fitosanitarios las que nos indican que partes del EPP hay que utilizar.

Según CASAFE (2020), el 90 % de la exposición accidental ocurre durante la apertura de envases y el vertido en la pulverizadora o cajón de mezcla. La lectura de la etiqueta de los productos fitosanitarios permite conocer cuáles son los elementos del EPP que se deben utilizar. Como mínimo, resulta obligatorio el uso de guantes de nitrilo o acrilonitrilo, la protección ocular (antiparras con ventilación indirecta) y el delantal impermeable (Figura 6).

Los estudios de Bonds *et al.* (2024) indican que, bajo el estricto cumplimiento de las BPA, la exposición del operador es significativamente menor que en aplicaciones convencionales. No obstante, se debe evitar el contacto directo con la aeronave tras el vuelo hasta tanto se realice el lavado de este.

Finalmente, se debe contar con una unidad de descontaminación de emergencia que incluya agua limpia y una solución lavaojos de flujo constante. Dentro de un protocolo profesional, la precariedad ("lo que haya"), no es aceptable (UAPASTF, 2023). Disponer de agua potable suficiente, jabón neutro y toallas limpias para casos de contacto accidental con alguna salpicadura durante la dosificación o la carga del dron.



Figura 6. *Elementos de un equipo de protección personal (EPP), completo. Fuente: CASAFE, 2020.*

10.1 Seguridad con baterías de litio

Las baterías de polímero de litio (LiPo) son materiales peligrosos que exigen un manejo técnico específico. El proceso de carga debe realizarse en áreas secas, ventiladas y protegidas de la radiación solar directa para evitar "fuga térmica" (thermal runaway), donde un incremento descontrolado de la temperatura interna puede derivar en ignición o explosión de la batería, sobre todo en aquellos modelos de RPA que vienen sin enfriador de baterías.

En caso de focos ígneos, se deben utilizar extintores de Clase D, que son específicos para metales combustibles o arena seca para sofocar el foco. Es crítico que el personal sepa que el agua no es un agente extintor adecuado para incendios de litio en etapas iniciales debido a la reacción química violenta que puede generar.

La estación de carga de energía debe estar separada una distancia de al menos 10 m de la zona de mezcla y de almacenamiento de productos químicos, a fin de evitar que un fallo eléctrico inicie una combustión con vapores de fitosanitarios.

10.2 Criterios de selección y delimitación del sitio operativo

Al momento de llegar al lote, siempre se debe evaluar el mismo previo a comenzar con cualquier tarea. Entre ellas están:

- **UBICACIÓN:** no utilizar sitios próximos a molinos que alimentan bebederos de animales ni próximos a viviendas habitadas como lugares de trabajo con RPA. Lo mismo con la presencia de obstáculos altos que pueden perjudicar el proceso de "retorno a base" del dron.

- **ESTADO DEL TERRENO:** asegurar el lugar de trabajo (sector de pista y de dosificación) en un terreno lo más parejo y nivelado posible, que no haya obstáculos para evitar traspié o caídas y preferentemente al reparo del viento.

- **DELIMITACIÓN DEL SECTOR DE OPERACIÓN Y DESPEGUE/ATERRIZAJE:** mantener y marcar el sector de trabajo (pista despegue y sector de dosificación) rodeado por conos y a una distancia sugerida de 20 m. También alejar personas ajenas a la operación, animales domésticos y personas inexpertas.

10.3 Organización de la estación de trabajo y comunicación

La gestión del riesgo en el sitio operativo se fundamenta en la segregación de áreas, evitando la contaminación cruzada entre las zonas:

- **ZONA SUCIA (CARGA, MEZCLA Y LAVADO):** es el espacio delimitado para la manipulación de productos, el lavado del equipo y de los envases, mediante las técnicas de "Triple lavado" o la de "Lavado a presión", establecidas en la Norma IRAM 12.069 (CASAFE, 2020) y en la ley nacional Nro. 27.279 de envases vacíos de fitosanitarios (2016).

  Respecto al lavado del equipo, debe realizarse, idealmente, sobre una lona o plataforma impermeable donde el agua residual pueda ser gestionada según la normativa vigente y aplicable, evitando que el tanque mantenga residuos de aplicaciones anteriores. Además, es el complemento ideal para evitar que el posible goteo de las boquillas contamine el suelo del lugar de despegue.

  Aquí de debe considerar un protocolo de lavado del tanque. Los drones tienen la particularidad de que los tanques son extraíbles y pueden lavarse mediante las mismas técnicas de lavado que los envases vacíos, por Triple Lavado o por Lavado a presión. De esta manera se logra asegurar que el tanque este limpio y sin residuos de productos que puedan generar fitotoxicidad en el siguiente cultivo a tratar.

- **ZONA LIMPIA (CONTROL Y DESCANSO):** es el área donde se ubica la estación terrestre y el personal técnico. Para preservar la bioseguridad del sector, no se permite el ingreso con EPP contaminados.

KIT DE DERRAMES: ante incidentes, la OECD (2021) considera que, la capacidad de respuesta inmediata es clave. El sitio debe contar con un kit que incluya material absorbente inerte (arena, etc.), elementos de recolección anti chispas/fuego (palas plásticas), contenedores estancos debidamente rotulados para residuos peligrosos y agua disponible en cantidad suficiente para atender el incidente.

TRANSPORTE: el vehículo donde se vaya a transportar el dron debe protegerse y cubrirse para evitar que se convierta en una fuente de contaminación persistente, en el caso que el dron no se contenga en una caja para su transporte o pueda ser lavado y descontaminado en campo, siendo ideal poder realizar esa acción en el lugar de trabajo, teniendo la precaución de contener los líquidos residuales del lavado, tal como se expresara más previamente.

10.4 Responsabilidad social y transparencia

La licencia social para operar trasciende el cumplimiento técnico y normativo, y depende de una comunicación proactiva, no solo hacia afuera -vecinos-, sino también internamente. Todo el personal debe tener a mano, las etiquetas y Fichas de Datos de Seguridad (FDS) de los productos fitosanitarios, al igual que los números de centros de consultas toxicológicas (por ejemplo, del TAS - Centro de toxicología de Rosario, Santa Fe) y de los bomberos de la zona donde se estarán realizando las operaciones.

CASAFE (2020) y el manual de Syngenta (2020) sugieren:

Capacitación: todo el personal en contacto con los productos fitosanitarios y con el dron debe recibir capacitación en el uso responsable de los productos fitosanitarios y en la gestión de incidentes, por ejemplo, conocer los números de los teléfonos de emergencia (TAS, Bomberos, Policía., etc.)

Señalética: instalación de cartelería reflectante en los accesos al lote que indique que se está realizando una aplicación de fitosanitarios como, por ejemplo, *"Operación con drones en curso"*. Esto previene el ingreso accidental de terceros en la zona de exposición y además alerta sobre una actividad aérea en marcha.

Notificación: la comunicación anticipada con vecinos y autoridades locales sobre la ventana de trabajo y el tipo de producto a utilizar es una BPA. Esta práctica previene y desactiva conflictos por percepción de riesgo antes de que ocurran.

10.5 Resguardo documental y la mejora continua

La trazabilidad trasciende la obligación administrativa, es la defensa técnica más sólida ante potenciales reclamos y una herramienta clave de optimización agronómica. En el ecosistema de los RPA, la generación de datos es nativa -es decir, se da de manera automática por parte del dron-; el desafío reside en consolidar esa información en un Registro de Aplicación Profesional.

Un protocolo de trazabilidad robusto debe integrar, como mínimo, los siguientes bloques de información:

Identificación espacial y temporal:

Fecha, hora de inicio y fin de la labor, georreferenciación del establecimiento y del lote, cultivo y estado fenológico del cultivo.

Prescripción y configuración:

Producto y dosis (según marbete), volumen de caldo aplicado, espectro de gota objetivo, ancho de faja, altura de vuelo y velocidad de avance.

Variables micrometeorológicas:

Registro de velocidad y dirección del viento, temperatura, humedad relativa y el valor de Delta T. Se deben realizar mediciones -como mínimo- al inicio, mitad y fin de la operación, manteniendo un monitoreo continuo durante todo el proceso de aplicación.

Digitalización de tarjetas hidrosensibles:

Registros fotográficos o escaneos para la validación de la densidad de impactos y la cobertura real. Las tarjetas hidrosensibles se deben manipular exclusivamente con guantes, para evitar la contaminación cruzada. El reingreso al lote tratado para levantar u observar las tarjetas debe efectuarse con el EPP correspondiente colocado, ya que el producto fitosanitario es muy probable que este activo sobre el cultivo, en los soportes de las tarjetas y/o las mismas tarjetas.

Telemetría de vuelo:

Exportación de los mapas de aplicación y registros del sistema (logs[19]) que confirmen el cumplimiento de la dosis aplicada (variable o fija).

Bitácora de decisiones (justificación técnica):

Documentación de los ajustes operativos realizados durante la jornada ante cambios ambientales. Por ejemplo, "se incrementó el diámetro de gota a las 11.00 hs debido a un ascenso del Delta T de 6 a 9". Este "porqué" transforma un dato estático en una prueba de cumplimiento de Buenas Prácticas Agrícolas.

La información debe ser almacenada en sistemas de nube con criterios de indexación lógica (establecimiento/campaña/fecha). Según la ISO 23117-1 (2023), la integridad de este respaldo asegura que, ante auditorías o conflictos por deriva, el operador pueda reconstruir con exactitud las condiciones de la misión. La trazabilidad profesional garantiza la transparencia y la sustentabilidad de la empresa de servicios.

[19] Los logs (registros) de vuelo de un dron son archivos de datos generados automáticamente durante cada operación, actuando como una "caja negra" que almacena telemetría detallada, sensores y acciones del piloto. Registran información crucial como ubicación GPS, altitud, velocidad, estado de la batería y comandos de los joysticks, entre otros factores.



11 CONSIDERACIONES FINALES

11. Consideraciones finales

La adopción de aeronaves pilotadas a distancia (RPA) para la aplicación de fitosanitarios representa un cambio de paradigma en la agricultura argentina, al ofrecer una precisión espacial y una oportunidad operativa sin precedentes. Sin embargo, el éxito de esta tecnología no reside únicamente en su sofisticación, sino en la capacidad del operador para actuar como un gestor de riesgos fundamentado en el conocimiento científico y técnico.

Se puede concluir que la evidencia científica disponible confirma que la deriva en aplicaciones con RPA es un fenómeno real, medible y fuertemente influenciado por la interacción entre parámetros operativos y la meteorología. Factores como la altura de vuelo, la velocidad de avance, el tamaño de gota y la velocidad y dirección del viento determinan en gran medida el comportamiento de las gotas en el aire y su probabilidad de desplazamiento fuera del objetivo.

Estudios experimentales han demostrado que errores en la configuración, tales como duplicar la altura de vuelo o exceder la velocidad operativa entrando en régimen de vuelo traslacional, pueden incrementar el potencial de deriva de manera exponencial al debilitar o neutralizar el efecto del downwash.

En el Tabla 4 se resumen los parámetros técnicos de aplicación validados para cada categoría.

Tabla 4. *Parámetros técnicos validados para la aplicación de fitosanitarios con drones. Fuente: Elaboración propia basada en la bibliografía citada.*

PARÁMETRO	Equipos de PORTE CHICO a MEDIO (Ej. T20[20]/T30 con picos de aspersión hidráulica)	Equipos de MAYOR PORTE (Ej. T40/T50 y con atomizadores rotativos)	Equipos de GRAN PORTE (Ej. T100/P150 con atomizadores rotativos)
Altura de vuelo (sobre el canopeo)	**2,0 a 3,5 m**	**3,0 a 4,0 m**	
Velocidad de vuelo	**15 a 21 km/h**	**20 a 26 km/h**	**30 a 36 km/h[21]**
Ancho de faja	**4,0 a 6,0 m**	**7,0 a 9,0 m**	
Volumen de caldo	**Mayor a 15 a 20 L/ha[22]**		

[20] Los modelos mencionados están a modo de ejemplo. Hay otros modelos más grandes y más chicos que los mencionados y, también, de distintas marcas.

[21] Las velocidades superiores a 30 km/h quedan estrictamente supeditadas a topografías completamente llanas y sistemas RTK en estado "Fix" ininterrumpido. Caso contrario, se sugiriere un rango inicial conservador a partir de los 25 km/h.

[22] Para los de gran porte (T100) se debe ampliar el rango de 15 a 25 L/ha, reflejando la necesidad de masas de líquido superiores básicamente para estabilizar el patrón de aspersión frente a las altas turbulencias generadas por motores de gran potencia.

Como sustento a estos nuevos parámetros, es fundamental destacar que en drones de gran porte (por ejemplo, DJI AGRAS T100), volar a bajas alturas resulta contraproducente. Debido a la potencia de sus rotores, una altura excesivamente baja provoca un rebote del aire contra el suelo que desorganiza el patrón de pulverización y aumenta la deriva. La altura de 3 a 4 m, en este tipo de drones, permite que el flujo descendente se estabilice y logre la penetración deseada en el canopeo.

Asimismo, la velocidad de hasta 36 km/h en los equipos más grandes, como el T100, garantiza la estabilidad del sistema antes de entrar en regímenes aerodinámicos críticos, manteniendo la uniformidad de la aplicación que la tecnología de precisión hoy permite.

En cuanto al tamaño de gota, se recomienda establecer un rango de 200 a 400 µm, medidos en el objetivo. En condiciones de riesgo de deriva, se recomienda trabajar en el segmento de 300 a 350 µm (Gota Muy Gruesa). Aquí, Chen *et al.* (2020) comprobaron que el tamaño de las gotas producidas tiene un efecto primordial sobre la deriva resultante. A mayor DVM, se logra un mayor índice de recupero de gotas dentro del cultivo y menor deriva resultante.

Respecto a las condiciones meteorológicas al momento de la aplicación, recomendamos trabajar dentro de los siguientes parámetros:

- **Velocidad del viento:** rango óptimo entre 3 y 15 km/h.
- **Delta T:** rango óptimo entre 2 y 8. No se recomienda operar con valores superiores a 8 debido al riesgo crítico de evaporación.
- **Inversión térmica:** prohibición absoluta de aplicación bajo estas condiciones.

La reducción del riesgo de deriva no depende de un único parámetro aislado, sino del ajuste integral del sistema. Esto exige que el aplicador abandone las "recetas fijas" y adopte criterios dinámicos en la toma de decisiones.

La determinación de distancias de seguridad para la operación con RPA ha sido un punto de debate recurrente; sin embargo, la robusta evidencia científica actual permite establecer certezas operativas para la gestión del riesgo. Basándonos en la revisión de la OECD (2021) y en una sólida base experimental (Xue *et al.*, 2014; Wang *et al.* (2020a); Wang *et al.* (2020b); Bonds *et al.*, 2024;) y de experiencias propias, se concluye que se recomienda una zona de seguridad técnica de 30 m (±15 m) para aplicaciones realizadas bajo el estricto cumplimiento de las Buenas Prácticas Agrícolas (BPA). Esta distancia garantiza que la mayor parte de la masa líquida derivable quede confinada dentro de un margen seguro y se reduce la probabilidad de exposición a niveles técnicamente insignificantes.

Para alcanzar esta certeza, este libro ratifica que la gestión de la deriva debe ser proactiva y no solo reactiva. Mientras que configuraciones de alto riesgo (como son el uso de gotas finas o de alturas excesivas) pueden desplazar los depósitos de gotas más allá de los 50 m, la adopción de configuraciones conservadoras, como alturas menores a 4 m, el uso de gotas "Muy Gruesas" y aplicar con vientos inferiores a 15 km/h, equipara el perfil de deriva de un dron al de una pulverizadora terrestre. En última instancia, la implementación del "Protocolo de ensayo para la medición de deriva en campo" (Platz *et al.*, 2026) se presenta como la herramienta para que cada aplicador certifique su propia distancia segura en función de su tecnología específica y las condiciones locales; se elimina la subjetividad en favor de la validación científica.

A su vez, Portillo *et al.* (2025) sostienen que el seguimiento de las Mejores Prácticas de Manejo permite a los operadores de drones mejorar la efectividad en el control de plagas mientras se reducen los riesgos para la salud humana y el medio ambiente.

La deriva no es una consecuencia inevitable del uso de drones (como la de cualquier otro equipo de aplicación, sea una pulverizadora autopropulsada o un avión), sino una variable técnica gestionable que puede minimizarse mediante el cumplimiento estricto de decisiones operativas fundamentadas y de las Buenas Prácticas Agrícolas. La sostenibilidad de esta tecnología, especialmente en entornos sensibles como los periurbanos, depende de una trazabilidad rigurosa. La digitalización de la "Bitácora de decisiones" y la validación con tarjetas hidrosensibles son activos que garantizan la transparencia y la responsabilidad legal del profesional frente a la sociedad.

Finalmente, **"aplicar bien" con drones significa poseer solvencia técnica para configurar el equipo con precisión y la humildad profesional para suspender la misión cuando las condiciones de seguridad se han perdido. El futuro de la sanidad vegetal es de precisión, y esa precisión comienza con el criterio tanto del profesional asesor como del aplicador.**

12 BIBLIOGRAFÍA



12. Bibliografía

Administración Nacional de Aviación Civil (ANAC). (2025). *Resolución 550/2025 sobre la reglamentación en el uso de RPA/Drones/VANTs*. RESOL-2025-550-APN-ANAC#MEC – 08/08/2025.

Administración Nacional de Aviación Civil (ANAC). (2025). Regulaciones Argentinas de Aviación Civil (RAAC): Parte 101. Disposiciones particulares para la operación de aeronaves pilotadas a distancia (RPA) y de sistemas de aeronaves pilotadas a distancia (RPAS) – Categoría abierta (1.ª ed., IF-2025-86611886-APN-DNSO#ANAC). Secretaría de Transporte, Ministerio de Economía, Presidencia de la Nación.

Administración Nacional de Aviación Civil (ANAC). (2025). Regulaciones Argentinas de Aviación Civil (RAAC): Parte 102. Disposiciones particulares para la operación de aeronaves pilotadas a distancia (RPA) y de sistemas de aeronaves pilotadas a distancia (RPAS) – Categoría específica (1.ª ed., IF-2025-86612393-APN-DNSO#ANAC). Secretaría de Transporte, Ministerio de Economía, Presidencia de la Nación.

Administración Nacional de Aviación Civil (ANAC). (2026). Regulaciones Argentinas de Aviación Civil (RAAC): Parte 100. Requisitos generales para la operación de aeronaves pilotadas a distancia (RPA) y de sistemas de aeronaves pilotadas a distancia (RPAS) (Enmienda 2026, IF-2026-51019763-APN-DNSO#ANAC). Secretaría de Transporte, Ministerio de Economía, Presidencia de la Nación.

Administración Nacional de Aviación Civil (ANAC). (2026). Regulaciones Argentinas de Aviación Civil (RAAC): Parte 137. Requisitos de operación y certificación para trabajo agrícola, combate contra incendios y modificación artificial del tiempo atmosférico (Edición V, IF-2026-51069409-APN-DNSO#ANAC). Secretaría de Transporte, Ministerio de Economía, Presidencia de la Nación.

Antuniassi, U.R., Oliveira, R.B., Mota, A.A. y Chechetto, R.G. (2022). *Spray drift from drone applications: effect of flight height and nozzle type*. Aspects of Applied Biology, 147, 137-142.

ASABE. (2023). *Agricultural management system for water quality (Standard No. S-339)*. American Society of Agricultural and Biological Engineers.

ASABE. (2025). *Spray nozzle classification by droplet spectra (Standard No. S572.3)*. American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE). ANSI/ASAE S572.3 FEB2020 (R2025).

Bonds, J.A.S., Pai, N., Hovinga, S., Stump, K., Haynie, R., Flack, S. y Buis, T. (2024). *Spray drift, operator exposure, crop residue and efficacy: Early indications for equivalency of uncrewed aerial spray systems with conventional application techniques*. [Review].

Carrancio, L.A. y Massaro, R.A. (2017). *El Delta T (ΔT) como indicador del ambiente meteorológico para pulverizaciones*. Ediciones INTA. Estación Experimental Agropecuaria Oliveros.

CASAFE. (2020). *Manual de Uso Responsable de los productos fitosanitarios*. Cámara de Sanidad Agropecuaria y Fertilizantes. Buenos Aires, Argentina.

Chen, S., Lan, Y., Zhou, Z., Ouyang, F., Wang, G., Huang, X., Deng, X. y Cheng, S. (2020). *Effect of droplet size parameters on droplet deposition and drift of aerial spraying by using plant protection UAV*. Agronomy, 10(1), 195.

Cid, R.E. y Macia, G. (2011). Aplicación Eficiente de Fitosanitarios – Capítulo 5. Instituto de Ingeniería Rural, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA).

Congreso de la Nación Argentina. (2016). Ley N° 27.279. Presupuestos Mínimos de Protección Ambiental para la Gestión de los Envases Vacíos de Fitosanitarios. Boletín Oficial de la República Argentina, Año CXXIV, N° 33.479.

Dengeru, Y., Ramasamy, K., Allimuthu, S., Balakrishnan, S., Kumar, A.P.M., Kannan, B. y Karuppasami, K.M. (2022). *Study on spray deposition and drift characteristics of UAV agricultural sprayer for application of insecticide in Redgram crop (Cajanus cajan L. Millsp.)*. Agronomy, 12(12), 3196.

Deveau, J. (2025). *Exploring the accuracy of drone-applied herbicide treatments. Sprayers101.* https://sprayers101.com/rpas-herbicide/.

Donaldson, F., Tang, J., Pai, N., Davies, J., Sinha, R., McDonald, J., Barbosa, R., Gullen, T., Carey, F. y Watson, G. (2023). Update and data analysis on UAV field drift studies conducted in 2023. Unmanned Aerial Pesticide Application System Task Force [UAPASTF].

Elorza, F.M. y Moavro, E.A. (2020). Jornadas de Buenas Prácticas de Aplicación de Productos Fitosanitarios (BPAF) con énfasis en los entornos periurbanos (Vol. X, Serie de Informes Especiales). ILSI Argentina.

FAO. (2001). Guidelines on good practice for ground application of pesticides. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome.

Gatkal, N.R., Nalawade S.M., Shelke M.S., Deshmukh M.S., Bhanage G.B., More N.M. y Ramesh K.S., Mikeska, M. (2025). Effect of operational parameters on spray performance and drift characteristics of a UAV-based *agrochemical application in pigeon pea crop to control thrips*. Frontiers in Plant Science, 16, 1570272.

He, X., Bonds, J., Herbst, A. y Langenakens, J. (2017). *Recent development of unmanned aerial vehicle for plant protection in East Asia*. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 10(3), 18–30.

Hoffmann, W.C., Fritz, B.K., Bagley, W.E., Gednalske, J., Elsik, C.E., y Kruger, G.R. (2012). Determination of selection criteria for spray drift reduction from atomization data. En M. Bernards (Ed.), Pesticide formulations and delivery systems: Innovating legacy products for new uses (STP 1558, pp. 1–15). ASTM International. https://doi.org/10.1520/STP104454.

Instituto Itaqui de Tecnología Agrícola. (2013). *Compatibilidade de misturas em tanque de produtos fitossanitários*. Boletim Técnico IITA. Itaqui, RS, Brasil.

International Organization for Standardization [ISO]. (2023). *Agricultural and forestry machinery - Unmanned aerial spraying systems - Part 1: Environmental requirements* (ISO/FDIS Standard No. 23117-1).

Kannan, N., Martin, D., Srinivasan, R., y Zhang, W. (2024). *Adjuvants for drone-based aerial chemical applications to mitigate off-target drift*. Drones, 8(11), 667.

Lanzerotti, L.J. (2001). *Space Weather Effects on Technologies*. Space Weather, AGU.

Lefebvre, A.H. y McDonell, V.G. (2017). Atomization and sprays (2.ª ed.). CRC P.

Li, L., Hu, Z., Liu, Q., Yi, T., Han, P., Zhang, R. y Pan, L. (2022). *Effect of flight velocity on droplet deposition and drift of combined pesticides sprayed using an unmanned aerial vehicle sprayer in a peach orchard*. Frontiers in Plant Science, 13, 981494.

Liu, Y., Yao, W., Guo, S., Yan, H., Yu, Z., Meng, S., Chen, D., y Chen, C. (2024a). *Determination of the effective swath of a plant protection UAV adapted to mist nozzles in mountain Nangguo pear orchards.* Frontiers in Plant Science, 15, 1336580.

Liu, Z., Gao, R., Zhao, Y., Wu, H., Liang, Y., Liang, K., Liu, D.; Huang, T.; Xie, S.; Lv, J. y Li, J. (2024b). *Study on the Characteristics of Downwash Field Range and Consistency of Spray Deposition of Agricultural UAVs.* Agriculture, 14(6), 931.

Luo, X., Du, J., Lou, Y., Gu, S., Yue, X., Liu, J., y Chen, B. (2022). *A method to mitigate the effects of strong geomagnetic storm on GNSS precise point positioning*. Space Weather, 20, e2021SW002908.

Matthews, G.A., Bateman, R., y Miller, P.C.H. (2014). *Pesticide application methods* (4.ª ed.). Wiley-Blackwell.

Mendillo, M., Hickey, D., Martinis, C., Wroten, J., y Baumgardner, J. (2018). *Space weather nowcasting for area-denied locations: Testing all-sky imaging applications at geomagnetic conjugate points*. Space Weather, 16, 47-56.

Mueller, T.C., Main, C.L., Thompson, M.A., y Steckel, L.E. (2006). *Comparison of glyphosate salts (isopropylamine, diammonium, and potassium) and calcium and magnesium concentrations on glyphosate efficacy*. Weed Technology, 20(1), 164–169.

National Oceanic and Atmospheric Administration [NOAA]. (2024). *NOAA Space Weather Scales. Space Weather Prediction Center*. Recuperado de https://www.swpc.noaa.gov/noaa-scales-explanation.

Organization for Economic Co-operation and Development [OECD]. (2021). *Report on the state of the knowledge: Literature review on Unmanned Aerial Spray Systems in agriculture*. Series on Pesticides No. 105. Environment, Health and Safety Division.

Pagliai, A., Sarri, D., Perna, C., Russo, C., Rimbotti, N., Lisci, R. y Vieri, M. (2025). *On-field spray downwash characterization and comparison of Agras T10 and T50 UAV for spray application*. En Proceedings of the 14th European Conference on Precision Agriculture.

Platz, J.P., Montoya, J.C., Dillchneider Loza, A. y Azcarate, M.P. (2025). *Calidad de aplicaciones con drones: Integración de trazadores colorantes, tarjetas hidrosensibles y penetración foliar de un trazador químico*. Trabajo presentado en las XVIII Jornadas Fitosanitarias Argentinas. INTA EEA "Ing. Agr. Guillermo Covas" Anguil; Facultad de Ciencias Agrarias, UNMdP.

Platz, J.P., Vita Larrieu, E.A., Montoya, J.C., Caracotche, M.V., Ros, P.G., y Brunori, A. (2026). *Protocolo: Ensayo para la medición de deriva en campo de aplicaciones de fitosanitarios con sistemas remotamente tripulados*. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA).

Portillo, H., Barbosa, R., Beckwith, M., Gullen, T., Haynie, R., Hovinga, S., Kesavaraju, B., Lang, E., Livingston, P., Newton, N., Oostlander, M., Watson, G., y Sinha, R. (2025). *Industry (UAPASTF) response to pesticide regulators' "state of the knowledge" review of drone use for pesticide application: Best practices for safe and effective application of pesticides*. Drones, 9(6), 388 (Mayo 2025).

Proulx, R., Peters, T., y Thostenson, A. (2024). Spray Application Technology: Selecting Spray Nozzles with Drift-Reducing Technology (AE1246, Rev.). NDSU Extension, North Dakota State University.

Rajashekhar, M., Reddy, C. N., Vanisree, K., Babu, T. K., y Pushpavalli, S. (2025). *Agrochemical mixture compatibility for UAV and conventional sprayers in maize: Bridging precision and practicality*. Agriculture Association of Textile Chemical and Critical Reviews Journal, 35(1), 355-363.

Rizobacter Argentina S.A. (2014). *Manual de Gota Protegida: Estrategias para optimizar la eficiencia en aplicaciones agrícolas*. Departamento de Tecnología de Aplicación.

Serban, M.I., Grad-Rusu, E., Florian, T., Grad, M. y Florian, V.C. (2026). *Efficacy of drone-applied fungicide treatments in control of sunflower diseases*. Drones, 10(1), 1-15.

Servicio Nacional de Sanidad y Calidad Agroalimentaria (SENASA), 2014. *Resolución 367/2014 sobre el etiquetado de productos fitosanitarios formulados de uso agrícola.*

Servicio Nacional de Sanidad y Calidad Agroalimentaria [SENASA]. (2026). *Resolución 373/2026 sobre el etiquetado de productos fitosanitarios formulados de uso agrícola.*

Servicio Nacional de Sanidad y Calidad Agroalimentaria. (2026). Resolución 869/2026 (RESOL-2026-869-APN-PRES#SENASA): Nuevas autorizaciones para el uso de fitosanitarios. Boletín Oficial de la República Argentina.

Sparks, D.L. (2003). *Environmental soil chemistry* (2.ª ed.). Academic Press.

Syngenta Crop Protection AG. (2002). Water-sensitive paper for monitoring spray distribution. Technical Guide, 3rd Edition. Basle, Switzerland.

Syngenta. (2020). *Manual de tecnología de aplicación de fitosanitarios*.

TeeJet Technologies. (2023). *Catálogo 52-ES: Soluciones de aspersión*. Spraying Systems Co.

Unmanned Aerial Pesticide Application System Task Force [UAPASTF]. (2023). *Best practices for safe and effective application of pesticides using Unmanned Aerial Spray Systems (UASS).*

Wang, C., He, X., Wang, X., Wang, Z., Wang, S., Li, L., Bonds, J., Herbst, A. y Wang, Z. (2018a). *Testing method and distribution characteristics of spatial pesticide spraying deposition quality balance for unmanned aerial vehicles.* International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 11(2), 18–26.

Wang, G., Han, Y., Li, X., Andaloro, J., Chen, P., Hoffmann, W. C., Han, X., Chen, S. y Lan, Y. (2020a). *Field evaluation of spray drift and environmental impact using an agricultural unmanned aerial vehicle (UAV) sprayer.* Science of the Total Environment, 737, 139793.

Wang, J., Lan, Y., Wen, S., Hewitt, A. J., Yao, W. y Chen, P. (2020b). *Meteorological and flight altitude effects on deposition, penetration, and drift in pineapple aerial spraying*. Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering, 15(1), e2382.

Wang, X., He, X., Song, J., Wang, Z., Wang, C., Wang, S., Wu, R. y Meng, Y. (2018b). *Drift potential of UAV with adjuvants in aerial applications*. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 11(5), 54–58.

Whitford, F., Lindner, G., Young, B., Penner, D., Deveau, J., Linscott, D., Zhu, H., Zollinger, R., Spandi, E., Johnson, B., Wise, K., Patton, A., Champion, C., Harre, N., Wagoner, N., y Smith, K. L. (2024). *Adjuvants and the power of the spray droplet: Improving the performance of pesticide applications*. Publication No. PPP-107. Purdue University Extension.

Whitford, F., Virk, S., Young, B., Li, S., Helms, A., Ozkan, E., Adair, A., Medenwald, H., Butts, T., Shanks, A., y Smith, K. L. (2025). *Calibrating spray drones for liquid applications (Chapter 6)*. Purdue University Extension.

Xue, X.Y., Tu, K., Qin, W.C., Lan, Y.B., & Zhang, H.H. (2014). *Drift and deposition of ultra-low altitude and low volume application in paddy field*. International Journal of Agricultural and Biological Engineering (Int. J. Agric. Biol.



PROTECCIÓN DE CULTIVOS CON DRONES

FUNDAMENTOS TÉCNICOS Y BUENAS PRÁCTICAS

Revisión bibliográfica y experiencias prácticas

2026

casafe
Cámara de Sanidad Agropecuaria y Fertilizantes

INTA
Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria
Argentina

senasa
SERVICIO NACIONAL DE SANIDAD Y CALIDAD AGROALIMENTARIA

EFA
EDITORIAL FACULTAD AGRONOMÍA
UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES

ISBN 978-987-3738-77-7