

Ensayo para la medición de deriva en campo de aplicaciones de fitosanitarios con sistemas remotamente tripulados



PROTOCOLO

Ensayo para la medición de deriva en campo de aplicaciones de fitosanitarios con sistemas remotamente tripulados

Edición:

EEA Anguil "Ing. Agr. Guillermo Covas", INTA
Febrero 2026

Agradecimientos:

Agradecimientos: a las empresas Alena Agritech y MECATECH por el apoyo económico para la adquisición de las normas utilizadas como referencia.

Autores:

Juan Pedro Platz

-Universidad Nacional de Mar del Plata (UNMdP), Facultad de Ciencias Agrarias (FCA), Unidad Integrada Balcarce (UIB), Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA).

Eduardo Alberto Vita Larrieu

-Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Estación Experimental Agropecuaria (EEA) Oliveros

Jorgelina Ceferina Montoya

-Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Estación Experimental Agropecuaria (EEA) Anguil.

María Verónica Caracotche

-Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Estación Experimental Agropecuaria (EEA) Ascasubi.

Patricio Guillermo Ros

-Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Estación Experimental Agropecuaria (EEA) San Pedro.

Alejandro Brunori

-Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Estación Experimental Agropecuaria (EEA) Marcos Juárez.

Mariela Pamela Azcarate

-Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Estación Experimental Agropecuaria (EEA) Anguil.

Diseño:

Área de Comunicación Visual

Gerencia de Producción Multimedia

Coordinación Nacional de Comunicación Institucional

Proyecto PD094 Gestión ambiental de los agroquímicos: manejo, mitigación y remediación.



**Instituto Nacional de
Tecnología Agropecuaria**
Argentina



UNIVERSIDAD NACIONAL de MAR DEL PLATA
FACULTAD de CIENCIAS AGRARIAS

■ Contenidos

1. Introducción.....	4
2. Justificación del protocolo	5
3. Objetivos.....	5
Objetivo general	5
Objetivos específicos	5
4. Materiales y Métodos	5
4.1. Sitio de ensayo	5
4.2. Equipo de Aplicación (RPA).....	6
Sistema de pulverización	6
Parámetros de vuelo.....	7
4.3. Solución trazadora o caldo de pulverización	7
4.4. Diseño Experimental.....	7
4.5. Sistema de colectores.....	8
4.5.1 Deriva depositada en el suelo	8
4.5.2. Deriva Aérea (deriva aerotransportada).....	9
4.6. Monitoreo micrometeorológico	11
4.7. Procedimiento de la aplicación	11
4.8. Procesamiento de muestras en el laboratorio	11
4.8.1. Extracción del trazador	11
4.8.2. Determinación del trazador	12
4.8.3. Cálculos (Según ISO 22886).....	12
4.8.4. Análisis de las tarjetas hidrosensibles	13
4.8.5. Análisis estadístico	16
5. Anexo 1. Cuantificación del trazador Azul Brillante.....	17
Introducción.....	17
Reactivos	17
Azul Brillante FCF	17

Solución trazadora o caldo de pulverización Azul Brillante.....	17
Soluciones para la curva de calibración	17
Instrumental	18
Procedimiento.....	18
Muestra	18
6. Anexo 2. Porta colectores dinámicos y estáticos	20
7. Anexo 3. Mástil de PVC con colector pasivo (limpiapipa).....	21
8. Anexo 4. Plantilla de registro de datos.....	22
9. Anexo 5. Lista de materiales	23
Bibliografía	24

1. Introducción

El proceso que utilizan los organismos reguladores para evaluar los peligros y riesgos asociados con el uso de fitosanitarios considera: la toxicología humana, la exposición del operador y de las personas presentes en el área, las exposiciones alimentarias, el destino y comportamiento en el ambiente; la ecotoxicología; las propiedades físicas y químicas de los fitosanitarios; la eficacia y la eficiencia en el proceso de pulverización. En el caso de los sistemas aéreos de aplicación tales como la tecnología de aeronaves tripuladas por control remoto o remotamente tripuladas (RPA, deriva de su denominación en inglés *Remotely Piloted Aircraft*) para la evaluación de los riesgos es necesario contar con datos que se relacionan principalmente con la exposición, la eficacia y la deriva (eficiencia) (OECD, 2021).

Este protocolo de ensayo busca brindar lineamientos armonizados para la obtención de los datos requeridos, de modo que investigadores, organismos de regulación y registrantes de productos fitosanitarios cuenten con información fiable y comparable, que permita la integración y la comparación de los datos. Con ello, se contribuye al conocimiento y se optimiza la práctica de aplicación con RPA, facilitando la interpretación y el abordaje del riesgo asociado a las aplicaciones de fitosanitarios.

Este protocolo establece la metodología para la medición de deriva en campo generada por RPA. El procedimiento adapta la norma internacional ISO 22866:2005, que define el método base de medición en campo. Esta adaptación se realiza siguiendo las recomendaciones específicas de la UAPASTF (*Unmanned Aerial Pesticide Application System Task Force*, 2024) para ensayos con RPA, y se complementa con los procedimientos de la ASABE S561.1 para aplicaciones aéreas. La base normativa del ensayo es la siguiente:

- ISO 22866:2005: equipo para la protección de cultivos. Métodos para la medición en campo de la deriva de pulverización (*Equipment for crop protection. Methods for field measurement of spray drift*) (International Organization for Standardization [ISO], 2005).
- UAPASTF "Grupo de Trabajo de Normas para Aplicación con VANT/RPA: recomendaciones para realizar ensayos de deriva en campo con VANT/RPA (*Unmanned Aerial Pesticide Application System Task Force*, 2024).
- ASABE S561.1: procedimiento para medir los depósitos de deriva provenientes de pulverizadoras aéreas, frutícolas (de monte) y terrestres. Referencia complementaria para aplicaciones aéreas (*American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 2004).
- ISO 21384-3: desde la perspectiva de la aviación, las operaciones de los sistemas de pulverización aérea no tripulados (*Unmanned Aerial Spraying System, UAAS*) están estandarizadas en dicha norma.

2. Justificación del protocolo

La adopción de RPA para la aplicación de productos fitosanitarios está creciendo exponencialmente. Sin embargo, faltan datos estandarizados sobre el potencial de deriva de estos equipos. El flujo o corriente descendente de los rotores relacionado con la velocidad de avance, diseño de la aeronave, tamaño de gota y las alturas de vuelo variables, entre otras, presenta perfiles de deriva únicos de acuerdo con las condiciones micrometeorológicas. Este protocolo busca cuantificar la deriva utilizando una metodología científica robusta, basada en estándares internacionales necesarios para garantizar que los datos tengan una calidad adecuada para la toma de decisiones regulatorias.

3. Objetivos

Objetivo general

Cuantificar el depósito de deriva en el suelo y de la deriva aérea (deriva aerotransportada) a diferentes distancias a sotavento del área de aplicación del RPA.

Objetivos específicos

1. Evaluar el efecto de la altura de vuelo.
2. Evaluar el efecto de la velocidad del equipo RPA.
3. Evaluar el efecto del tamaño de gota en el perfil de deriva.
4. Generar una curva de decaimiento de la deriva (*Drift Decay Curve*) para el RPA bajo las condiciones de ensayo.

4. Materiales y Métodos

4.1. Sitio de ensayo

Ubicación: un campo abierto, nivelado (pendiente < 2 %), con cobertura vegetal baja y uniforme (ej.: césped corto o barbecho).

Dimensiones: un área mínima de 120 m x 200 m (Figura 1). La zona de medición de deriva (sotavento) debe estar libre de obstrucciones (árboles, edificios) a una distancia de al menos 200 m o 10 veces la altura de cualquier obstrucción.

Orientación: la línea de vuelo del RPA se orientará perpendicular a la dirección predominante del viento ($\pm 30^\circ$, según ISO 22866).

Distancia recorrida por el RPA: la distancia mínima será de 100 m de recorrido por cada pasada. El total de pasadas se determinará en función de cubrir un ancho mínimo de 20 m y esto resultará del ancho de franja con el que esté calibrado el equipo. Ejemplo: si el equipo tiene un ancho de franja de 7 m, tendrá que realizar como mínimo 3 pasadas, comenzando en el límite del borde de franja o "punto cero".

En caso de rotación del viento: si el viento rota dentro de los 30°, la distancia se debería extender a 400 m de largo y la zona de vuelo del RPA debe permanecer sin obstrucciones (Figura 1).

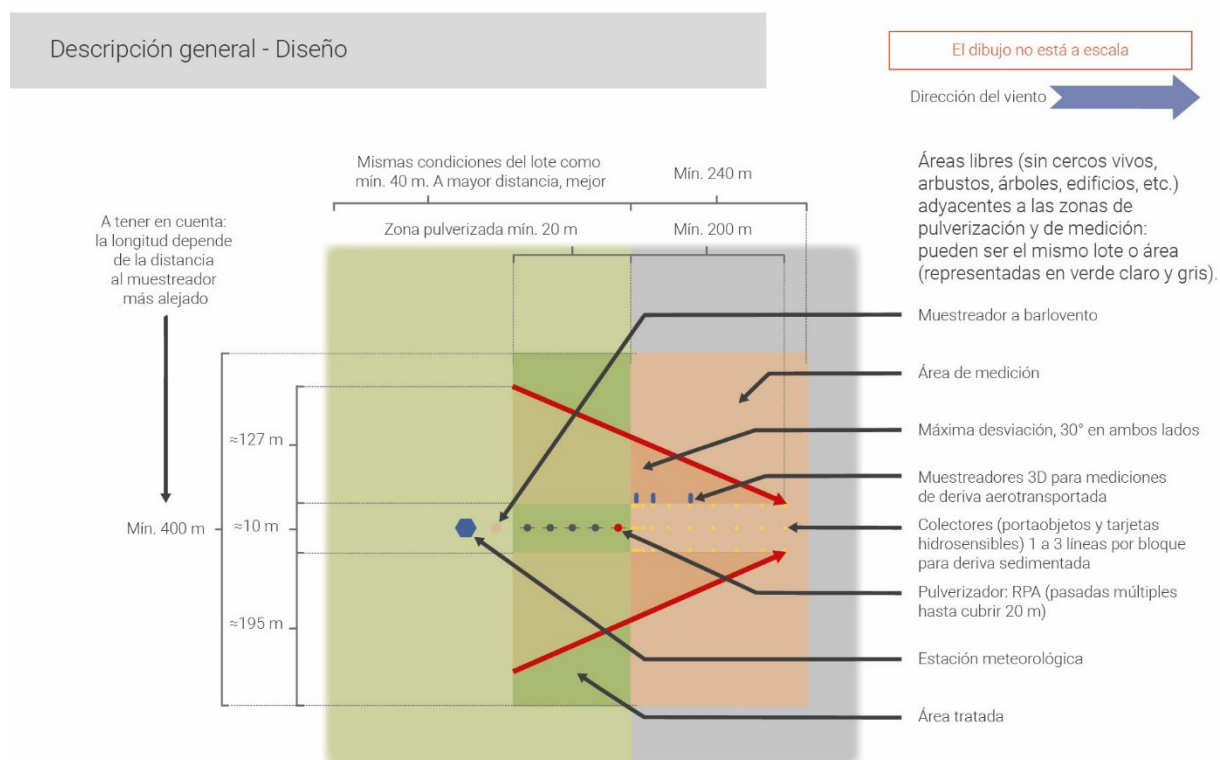


Figura 1. Diseño general del ensayo; incluidas las dimensiones del área que representan una divergencia de viento de 30°. (Fuente: adaptado de UAPASTF).

4.2. Equipo de Aplicación (RPA)

Modelo: incumbe para cualquier RPA pulverizador, sea con unidades formadoras de gotas centrífugas como hidráulicas, etc. Se debe registrar el peso, diámetro de rotores y configuración (cuadricóptero, hexacóptero, etc.) (Tabla 1).

Sistema de pulverización

- Boquillas: boquilla centrífuga de disco u otra nueva tecnología.
- Clasificación de gotas: el espectro de gotas (DV0.1, DV0.5, DV0.9 % <100 µm) debe ser determinado previamente.
- Caudal y presión: se registrarán la presión de trabajo (si aplica) y el caudal total (L/min).

Tabla 1. Parámetros del RPA

Modelo	
Peso máximo al despegue (kg)	
Diámetro del rotor (mm)	
Longitud × ancho × altura del vehículo (mm)	
Tipo y capacidad de la batería (mAh)	
Tipo y número de boquillas	

Boquillas	
Velocidad de rotación de la boquilla (rpm)	
Capacidad del depósito (L)	
Caudal (L/min)	
Angulo de pulverización	
Altura de vuelo/Altura realtiva entre los muestreadores y el pulverizador del RPA (m)	
Velocidad de vuelo (m/s)	
Franja de pulverización (m)	

Parámetros de vuelo

- Altura de vuelo: variable para estudiar (ej.: 2,5 m y 4,0 m sobre el suelo/cultivo).
- Velocidad de vuelo: constante (ej.: 7 m/s).
- Ancho de pasada: definido por ensayo previo (ej.: 7 m). Se recomienda aplicar el protocolo para verificar ancho de franja según Norma ISO 23117-2-2025.

4.3. Solución trazadora o caldo de pulverización

Se utilizará agua limpia más un trazador no volátil (ej.: azul brillante) en una concentración conocida (ej.: > 2 g/L). La concentración, la recuperación y la estabilidad del trazador en el colector o muestreador objetivo deberán ser verificadas previamente al inicio de cualquier medición de deriva de pulverización. Estos ensayos preliminares deberán establecer el nivel de resolución de las técnicas de medición que se utilizarán (anexo 1).

Se añadirá un coadyuvante (concentrado emulsionable o microemulsión con base en aceite metilado de soja y dosis según recomendación del fabricante) para simular una mezcla de tanque típica.

El tamaño de gota producido está relacionado con las características físicas del caldo. Es necesario tomar una muestra del caldo resultante para determinar su densidad, su índice de tensión superficial y viscosidad.

4.4. Diseño Experimental

Tratamientos: dado que la altura de aplicación, la velocidad de avance del RPA y el tamaño de gota son los principales factores que afectan la deriva y la depositación de la pulverización (OECD, 2021), estos definirán los tratamientos para evaluar en forma individual o bien sus interacciones, dependiendo del objetivo planteado en el ensayo.

Para cada uno de los tres factores se sugieren los siguientes niveles para su evaluación.

- Altura: ej.: 4,5 m y 5,5 m
- Velocidad de avance del RPA: ej.: 7 m/s y 11 m/s
- Tamaño de gota (definido por la velocidad de los discos centrífugos): ej.: 150 μ m y 300 μ m

Repeticiones y aleatorización: se requiere un mínimo de tres repeticiones válidas por cada tratamiento (según ISO 22866). Una repetición consiste en una serie completa de pasadas del

RPA sobre el área de aplicación. Los tratamientos y repeticiones deben estar aleatorizados en su orden de realización, esto permite aislar el efecto micrometeorológico.

Unidad Experimental: cada pasada del RPA sobre la línea de colectores.

4.5. Sistema de colectores

4.5.1 Deriva depositada en el suelo

Colectores para trazador: portaobjetos (2,45 cm x 7,62 cm) o placas de Petri (14 cm de diámetro).

- Colectores para la caracterización del espectro del tamaño de gotas y del número de impactos por unidad de superficie: tarjetas hidrosensibles (TH) (2,5 cm x 7 cm) fijadas sobre placas de respaldo horizontales sobre el nivel del suelo. En forma complementaria se pueden utilizar veletas. Especificar la marca de las TH. Se recomienda la utilización de la misma marca de TH para que los resultados sean comparables (anexo 2).
- Ubicación: se colocarán líneas de colectores, perpendiculares a la línea de vuelo del RPA, extendiéndose a sotavento desde el borde de la primera pasada (línea cero).
- Distancias a sotavento (ISO 22866): 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 164 y 200 m (Figura 2). Se pueden añadir distancias mayores si se espera deriva lejana. En cada distancia se establecerán, de ser necesario, 1 a 3 repeticiones separadas a un mínimo de 4,0 m (Figura 3).
- Borde de la franja (línea cero): debe definirse claramente. Para RPA, se recomienda definirlo como la mitad del ancho de franja, medida desde el centro de la línea de vuelo del RPA de la primera pasada.

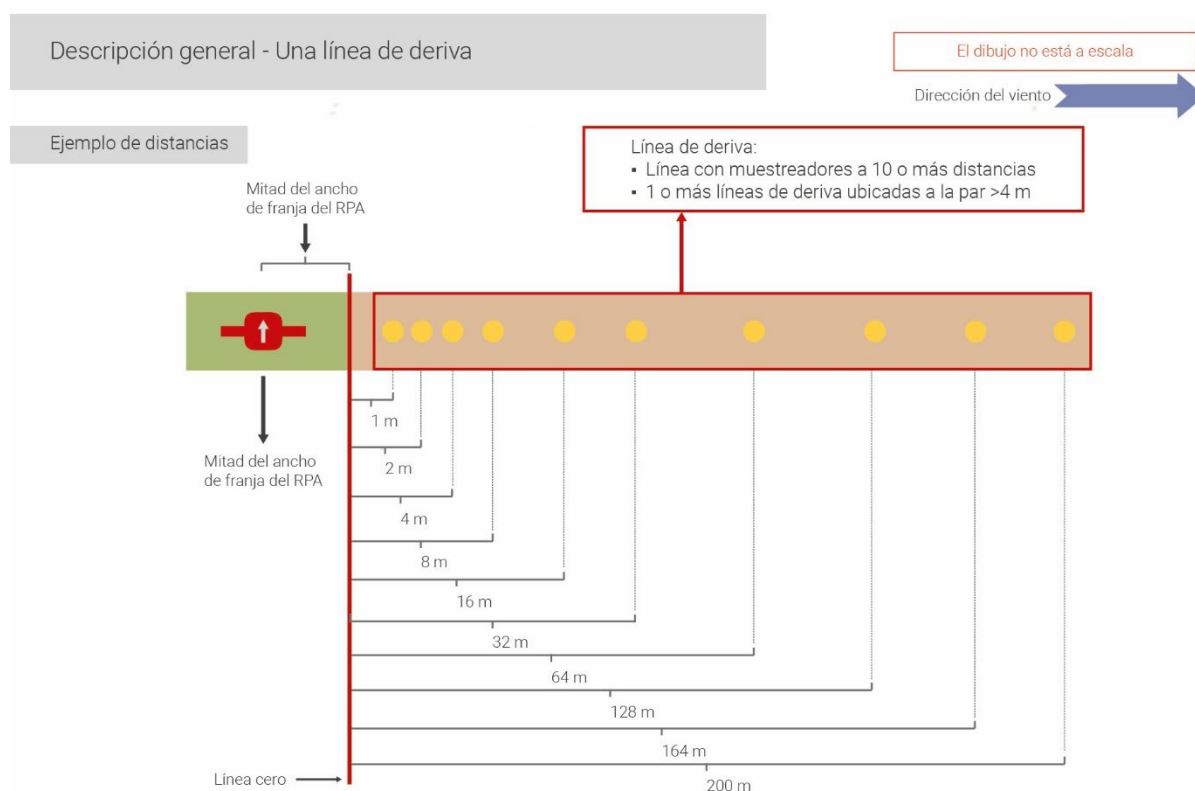


Figura 2. Diseño detallado de una línea de deriva y sus puntos de medición (mismos muestreadores a diferentes distancias) para evaluar la deposición sobre el suelo. Las distancias sugeridas pueden modificarse y se pueden agregar nuevos puntos de muestreo (200 m es el mínimo recomendado). (Fuente: adaptado de UAPASTF).

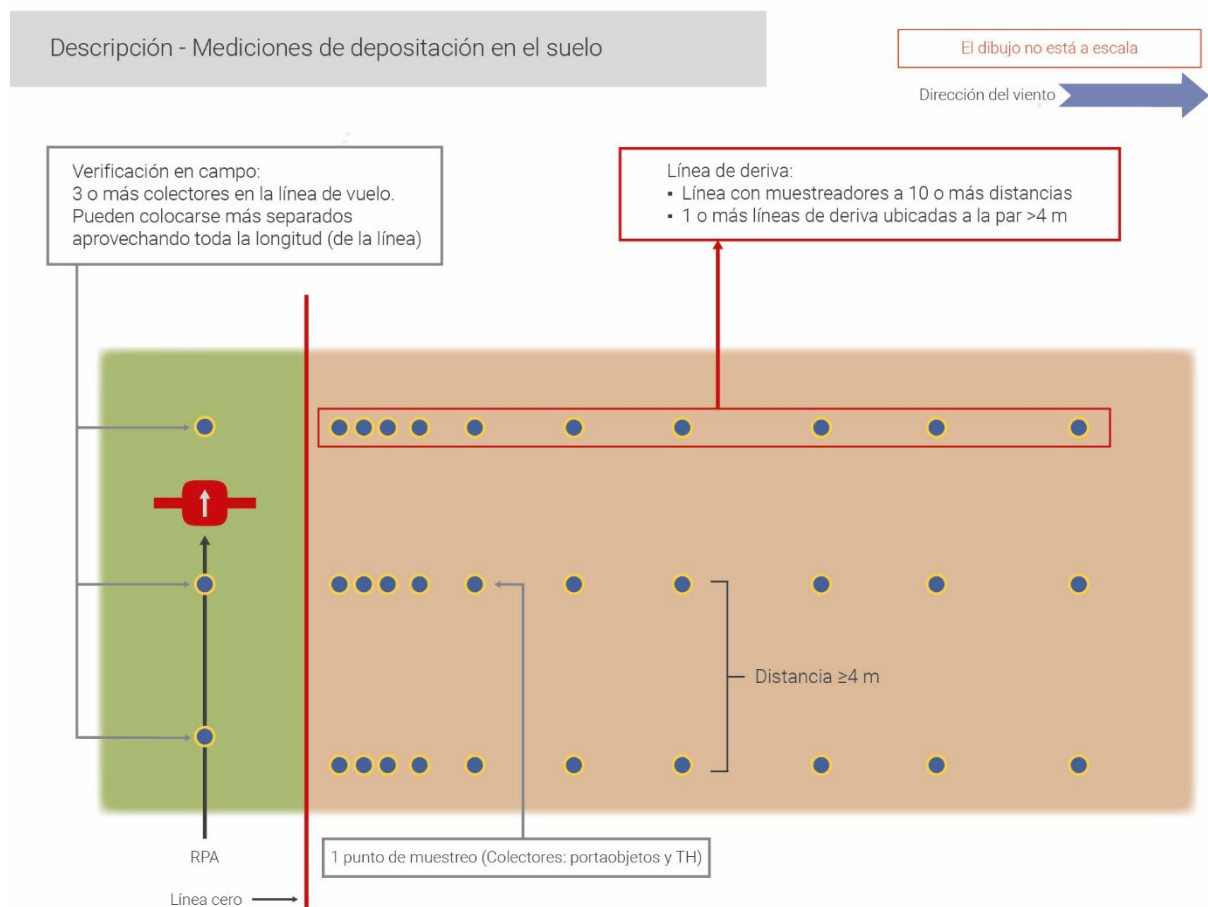


Figura 3. Una línea de deriva como mínimo, recomendable 3, con diez distancias de muestreo, forman un bloque de colectores para medir la deposición sobre el suelo. (Fuente: adaptado de UAPASTF).

4.5.2. Deriva Aérea (deriva aerotransportada)

- Colectores: mástiles verticales (e.: 4 m de altura) con colectores pasivos 3D (ej.: "limpiapipa"). Pueden utilizarse mástiles de >3 m de PVC u otros materiales (Figura 5) (anexo 3).
- Alturas de muestreo (ISO 22866): muestras tomadas a múltiples alturas en el mástil (ej.: 1, 2, 3 m) con los colectores pasivos 3D (Figura 4).
- Ubicación: los mástiles se colocan en las mismas distancias a sotavento que los colectores de suelo o al menos en 3 distancias (ej. 8, 16 y 32 m) (Figura 5).

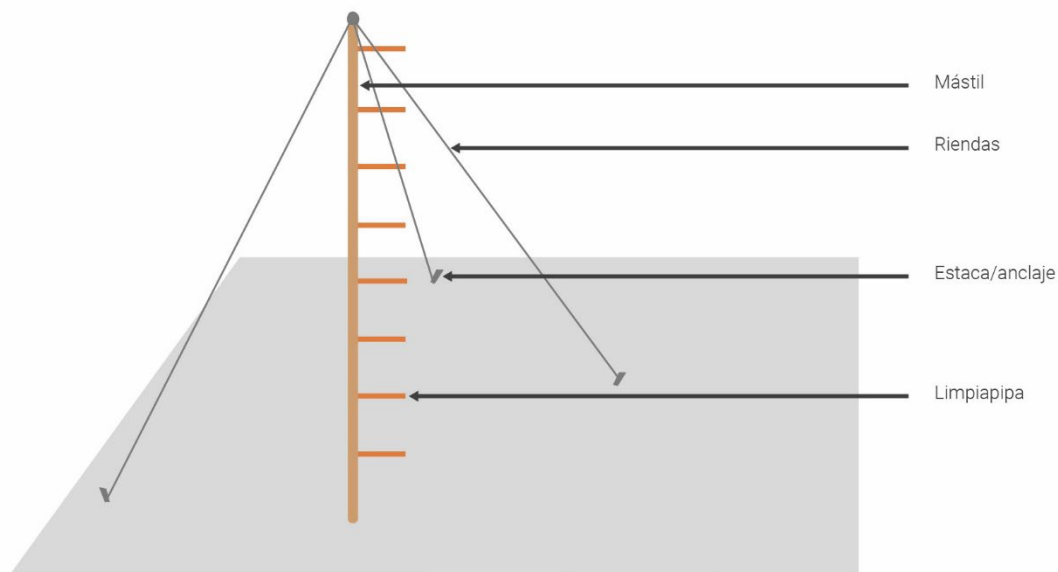


Figura 4. Mástil - muestreador para deriva aerotransportada.

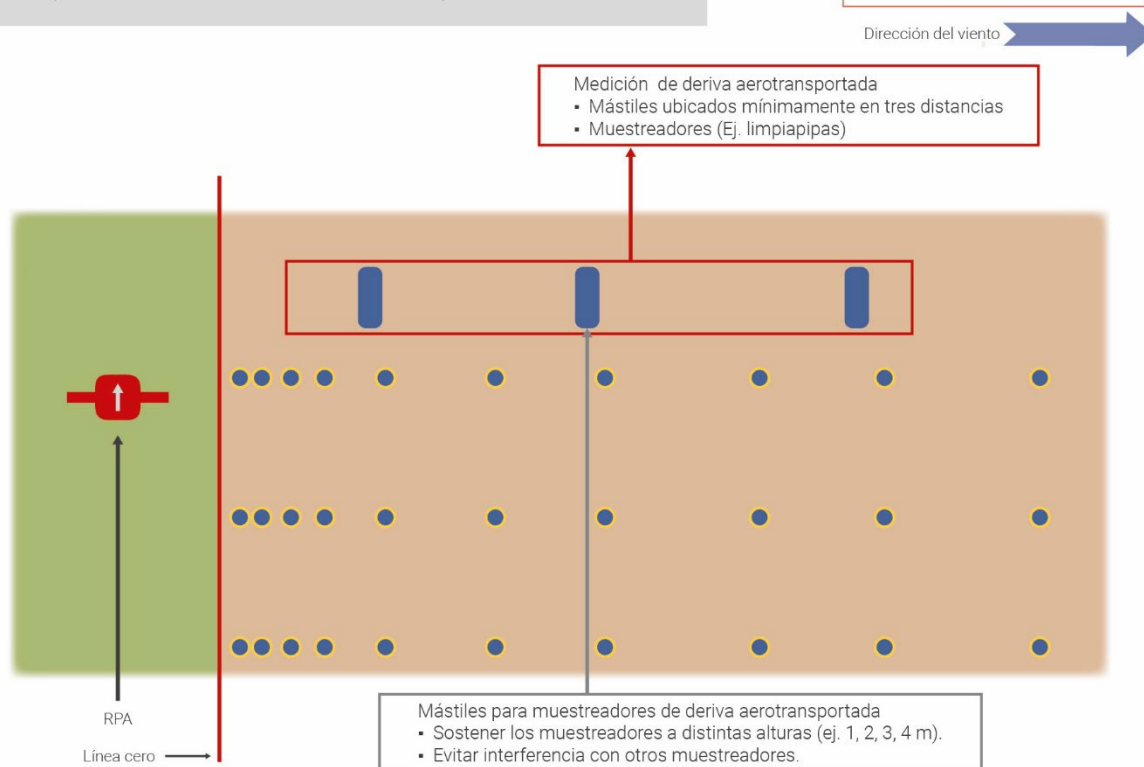


Figura 5. Área de muestreo con configuración adicional para la medición de la deriva aerotransportada. La distancia al bloque de colectores (portaobjetos y tarjetas hidrosensibles) debe mantenerse. (Fuente: adaptado de UAPASTF).

4.6. Monitoreo micrometeorológico

Requisito crítico: se debe instalar una estación meteorológica a barlovento en el sitio del ensayo, a una altura de entre 1,5 m y 2,5 m del nivel del suelo.

Parámetros: registro continuo al menos de 1 minuto.

- Velocidad del viento (m/s).
- Dirección del viento (grados).
- Temperatura del aire (°C).
- Humedad relativa (%).

Condiciones válidas (Según ISO 22866)

- Velocidad del viento (ej.: a 2 m): típicamente entre 1,0 m/s y 5,0 m/s (para RPA, este rango superior puede ser menor. Ej.: 3,0 m/s, debido al riesgo de deriva).
- Dirección del viento: $\pm 30^\circ$ respecto a la perpendicular de la línea de vuelo.
- Estabilidad atmosférica: evitar condiciones de inversión térmica (típicamente al amanecer o atardecer).

4.7. Procedimiento de la aplicación

1. Activar la estación meteorológica 30 minutos antes del ensayo.
2. Colocar todos los colectores/muestreadores con guantes limpios. Recolectar tres colectores/muestreadores "cero" (blancos) para medir la contaminación de fondo.
3. Llenar el tanque del RPA con la solución trazadora. Purgar el sistema.
4. Tomar tres muestras de la solución trazadora del tanque (mínimo 100 ml de cada una) para la determinación de la concentración real.
5. Verificar que las condiciones micrometeorológicas sean estables y dentro del rango aceptable.
6. Iniciar la aplicación. El RPA debe realizar un número definido de pasadas (ej. 4 a 6 pasadas) paralelas entre sí, sobre un área de aplicación definida (ej. 120 m de largo, puede depender del equipo, velocidad de aplicación, etc.), comenzando en la pasada más cercana a los colectores (línea cero). El RPA debe tener la velocidad y la altura estabilizadas antes de entrar y salir del área de aplicación.
7. Registrar el tiempo total de la aplicación.
8. Inmediatamente después de la aplicación, recolectar todas las muestras en envases etiquetados (ej. envases plásticos 125 cm³ o tubos Falcon) y protegerlos de la luz solar.
9. Repetir el siguiente tratamiento en función de la aleatorización asignada.

4.8. Procesamiento de muestras en el laboratorio

Para la cuantificación de la solución trazadora en las muestras se realiza la extracción y cuantificación del indicador por fluorescencia o espectrofotometría UV-visible (anexo 1).

4.8.1. Extracción del trazador

Cada colector/muestreador recolectado (portaobjeto, limpiapipa) se enjuaga con un volumen conocido de un solvente apropiado dependiendo del trazador (ej.: agua destilada o alcohol/agua destilada).

4.8.2. Determinación del trazador

- Realizar la curva de calibración desde las muestras de solución trazadora del tanque recolectadas diluyendo en un rango de concentración.
- Medir la concentración del trazador según método seleccionado (fluorescencia/espectrofotometría UV-Visible) en la solución de lavado de cada colector/muestreador recolectado.

4.8.3. Cálculos (Según ISO 22886)

El cálculo de la cantidad de trazador depositado por unidad de área, por ejemplo, en microlitros por centímetro cuadrado ($\mu\text{l}/\text{m}^2$) puede realizarse a través de la siguiente ecuación (Ecuación 1).

$$\text{Ecuación 1: } \beta_{dep} = \frac{C_m * V_{dil} * 1000}{C_{caldo} * A_{col}}$$

Donde:

β_{dep} = es el depósito de deriva de pulverización, expresado en microlitros por centímetro cuadrado ($\mu\text{l}/\text{m}^2$);

C_m = lectura del espectrofotómetro de la muestra;

V_{dil} = es el volumen de agua destilada utilizado en la extracción para disolver el trazador del colector, expresado en litros (L);

C_{caldo} = es la concentración del caldo de aplicación, o la cantidad de soluto trazador en el líquido de rociado muestreado en la boquilla, expresada en gramos por litro (g/L);

A_{col} = área del colector para atrapar la deriva de rociado, expresada en centímetros cuadrados (cm^2).

A partir de esta cifra de depositación de deriva aerotransportada, se puede calcular el porcentaje de deriva del aerosol en un colector, relacionando la depositación de deriva del aerosol con la cantidad aplicada en el campo sobre la misma unidad de área (Ecuación 2).

A partir de la magnitud del depósito de deriva aerotransportada, se determina el porcentaje de deriva en el colector al relacionar dicho depósito con la tasa de aplicación nominal por unidad de superficie.

$$\text{Ecuación 2: } \beta_{dep\%} = \frac{\beta_{dep} * 10.000}{\beta_v}$$

Donde:

$\beta_{dep\%}$ = porcentaje de deriva de pulverización (%);

β_v = volumen de pulverización, expresado en litros por hectárea (L/ha).

4.8.4. Análisis de las tarjetas hidrosensibles

1. Se digitalizarán (“escaneo”) en equipos que puedan lograr una resolución de 1.200 dpi (puntos por pulgada, del inglés *dots per inch*). Es la medida estándar que determina la resolución y, por lo tanto, el nivel de detalle que el escáner puede capturar de las TH. Al guardar los archivos, deberán ser con la extensión .bmp y no la más común, como .jpg o .jpeg. La principal diferencia es la calidad de la imagen, .bmp mantiene su proporción 1:1 en cambio .jpg la comprime y cambia su calidad/resolución.
2. La lectura de cada TH se realizará con un sistema lector de tarjetas hidrosensibles. Más abajo se describe el proceso como ejemplo con el programa *StainMaster*. Es importante calibrar el programa en relación con dos aspectos clave. El primero, completar la información necesaria para los cálculos posteriores como, por ejemplo: volumen o caudal aplicado L/ha (Figura 6).

StainMaster - MiEnsayo1

Archivo Ensayo Gráficos Ventana Ayuda

Ensayos
MiEnsayo1
Tarjetas
Datos Estadísticos

MiEnsayo1

Ensayo Aplicador Tarjetas

Datos del Avión/Terrestre

Piloto:

Marca:

Modelo:

Año:

Matrícula:

Motor:

Propulsión:

Potencia (HP):

Velocidad:

Envergadura:

Botalón:

Boquillas

Tipo:

Marca:

Color/Orificio:

Cantidad:

Angulo (°):

Distancia (cm):

Flujo (lt/min):

Caudal (lt/ha): 10 a mts

Presión (PSI):

Observaciones:

Líquido 1: %

Líquido 2: %

Cerrar Aplicar cambios

Figura 6. Detalle de la información que se debe agregar al programa.

El segundo, definir las zonas en las que el equipo realizará la lectura. El sistema ofrece distintas opciones, se recomienda seleccionar la modalidad “alternadas” (Figura 8 y 9).

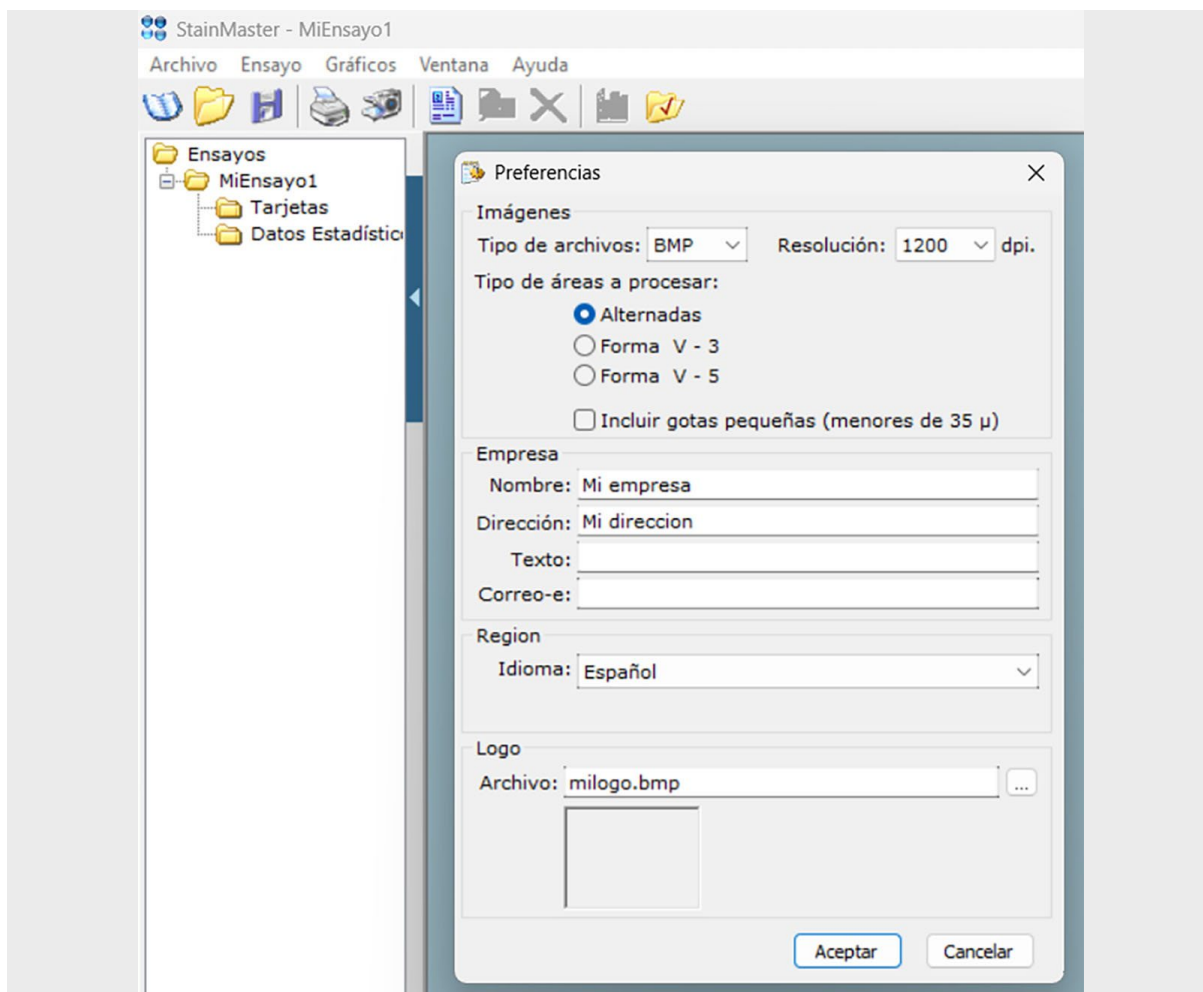


Figura 7. Detalle de la configuración al programa.

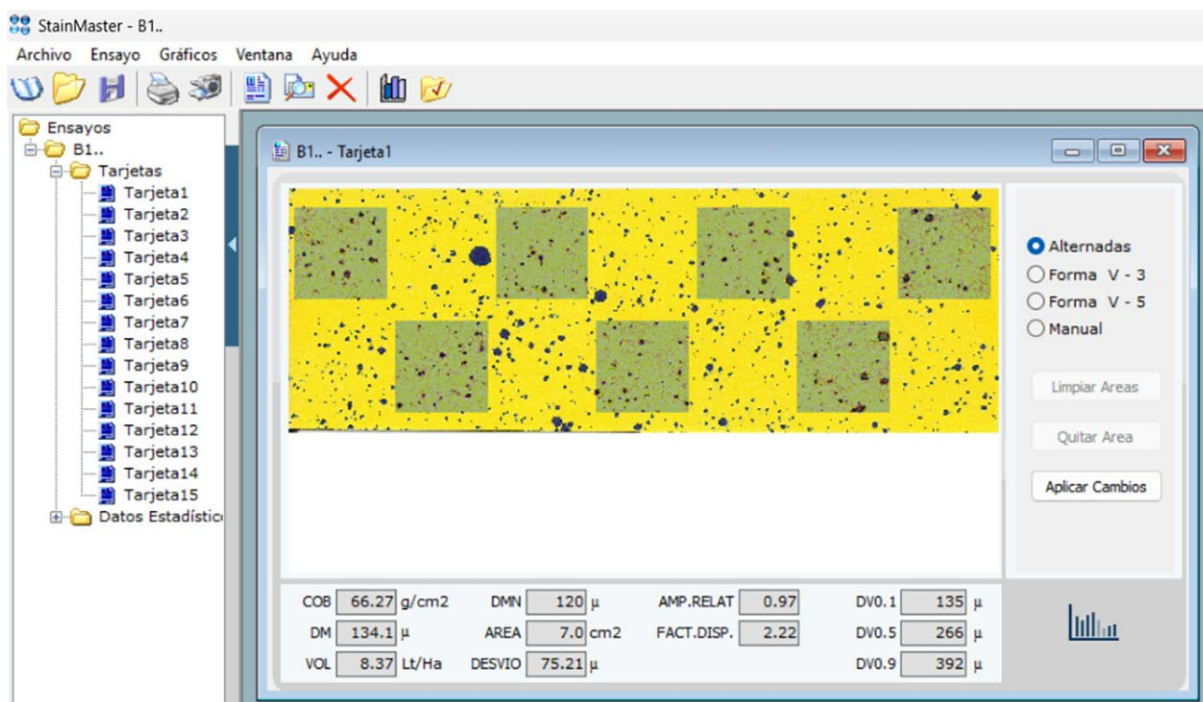


Figura 8. Detalle de las áreas que leerá el programa.

Es muy importante tener en cuenta los vértices donde serán sujetadas las TH porque con esta configuración “alternadas” los cuadrados de lectura superiores derecho e izquierdo están muy sobre el borde de la TH.

3. Los datos se guardarán en planillas Excel y se utilizarán los siguientes parámetros:

Cobertura (g/cm²)	Número de gotas o impactos por unidad de superficie.
DM (μm)	Diámetro medio de las gotas en micrones.
DMN (μm)	Diámetro medio nominal en micrones.
Desvío (μm)	Desvío estándar en micrones. Dispersión del tamaño de gota.
Volumen teórico (L/ha)	Es el volumen teórico calculado de las gotas recolectados en las tarjetas hidrosensibles.
CV (%)	Coefficiente de variación.
DV01 (μm)	Diámetro de gota por debajo del cual se encuentra el 10 % del volumen total de líquido pulverizado.
DV05 (μm)	Diámetro de gota que separa la población de gotas, ordenadas de menor a mayor, en dos mitades de igual volumen de líquido. También llamado diámetro de la mediana volumétrica DMV.
DV09 (μm)	Diámetro de gota por encima del cual se encuentra el 10 % del volumen total del líquido pulverizado.
Factor de dispersión	Relación entre el diámetro de la mediana volumétrica (DMV) y el diámetro de la mediana numérica (DMN).
Amplitud relativa	Expresa la variación del tamaño de gotas.

Ejemplo práctico:

Tarjeta	Número	Cobertura (g/cm ²)	DM (μ)	DMN (μ)	Desvío (μ)	Volumen Teórico (Lt/ha)	DV01 (μ)	DV05 (μ)	DV09 (μ)	Factor de dispersión	Amplitud Relativa
Tarjeta 1	1	8,2	48,1	50,0	10,8	0,0	45,0	51,0	61,0	1,02	0,31
Tarjeta 2	2	4,3	51,5	50,0	8,6	0,0	47,0	53,0	59,0	1,06	0,23
Tarjeta 3	3	1,1	53,7	50,0	12,0	0,0	47,5	47,5	47,5	0,95	0,00
Tarjeta 4	4	0,6	48,2	50,0	8,5	0,0	45,0	45,0	45,0	0,90	0,00
Tarjeta 5	5	1,5	61,8	60,0	22,7	0,0	66,3	68,8	68,8	1,15	0,04
Tarjeta 6	6	2,6	63,3	60,0	21,6	0,0	57,0	79,0	79,0	1,32	0,28
Tarjeta 7	7	5,0	82,5	80,0	35,8	0,1	81,0	103,0	113,0	1,29	0,31
Tarjeta 8	8	5,4	79,5	80,0	39,7	0,1	81,0	105,0	121,0	1,31	0,38
Tarjeta 9	9	17,4	144,5	130,0	84,9	2,7	165,0	289,0	307,0	2,22	0,49

Tarjeta 10	10	20,4	171,7	170,0	87,2	5,4	187,0	275,0	339,0	1,62	0,55
Tarjeta 11	11	33,9	176,2	170,0	104,7	9,7	193,0	383,0	469,0	2,25	0,72
Tarjeta 12	12	32,1	185,9	170,0	116,8	10,8	199,0	381,0	477,0	2,24	0,73
Tarjeta 13	13	19,1	154,2	140,0	93,0	3,7	159,0	321,0	387,0	2,29	0,71
Tarjeta 14	14	27,7	164,9	160,0	86,7	6,5	163,0	311,0	361,0	1,94	0,64
Tarjeta 15	15	39,0	155,3	140,0	88,8	7,7	165,0	291,0	391,0	2,08	0,78
Tarjeta 20	20	18,5	159,9	140,0	98,6	4,0	165,0	313,0	357,0	2,24	0,61
Tarjeta 21	21	7,1	133,1	110,0	105,9	0,9	181,0	271,0	279,0	2,46	0,36
Tarjeta 22	22	8,4	116,8	110,0	65,9	0,7	125,0	231,0	241,0	2,10	0,50
Tarjeta 23	23	9,0	134,5	120,0	65,1	1,2	129,0	195,0	229,0	1,63	0,51
Tarjeta 24	24	8,6	73,0	70,0	31,5	0,2	63,0	101,0	111,0	1,44	0,48
Tarjeta 25	25	10,4	79,6	70,0	39,9	0,3	79,0	113,0	137,0	1,61	0,51
Promedios		13,4	111,3	103,8	58,5	2,6	116,3	191,8	222,8	1,7	0,4

4.8.5. Análisis estadístico

Se realizará un Análisis de Varianza (ANOVA) para determinar diferencias significativas entre los tratamientos (altura, tipo de boquilla) en cada distancia de muestreo. Se utilizarán pruebas de comparación de medias (ej. Tukey, $p < 0,05$). Se ajustarán modelos de regresión (ej.: potencial, exponencial) a los datos de deriva vs. distancia para generar las curvas de decaimiento.

■ 5. Anexo 1. Cuantificación del trazador Azul Brillante

Introducción

El Azul Brillante (*Brilliant Blue*) es un colorante usado en la industria alimenticia, de bajo costo, alta solubilidad, de fácil manipulación, preparación y cuantificación por espectrofotometría UV-Visible. Se ha utilizado como trazador para evaluar distintas tecnologías de aplicación, ya que no altera las propiedades fisicoquímicas del caldo ni de los productos utilizados (Olivet *et al.*, 2013).

La eficiencia de recuperación, también conocida como eficiencia de recolección o aplicación, se define como la proporción del material emitido por la máquina que es retenido por el objetivo, generalmente expresada en porcentaje (Contiero *et al.*, 2018). Rezende *et al.* (2011) constataron para este trazador una excelente recuperación que osciló entre 100 % y 93 % en portaobjetos de vidrio asperjados en el campo. Diversos factores influyen en esta eficiencia, entre ellos:

- Características del objetivo: forma, tamaño y posición.
- Propiedades de las gotas: densidad, diámetro y velocidad.
- Flujo de aire: velocidad y dirección del aire que circula alrededor o a través del objetivo.

Reactivos

Azul Brillante FCF

Fórmula química: $C_{37}H_{34}N_2Na_2O_9S_3$. Masa molar: 792,9 g/mol. CAS: 3844-45-9. Es un colorante orgánico aniónico del tipo triarilmetano (sal disódica, sulfonada), de aspecto polvo azul, muy soluble en agua (NCBI, 2026).

Solución trazadora o caldo de pulverización Azul Brillante

Se disuelve el reactivo Azul Brillante (ej. 2 g/L) en un poco de agua limpia utilizada para la aplicación y luego se lleva a volumen final.

Nota 1: se pueden utilizar soluciones comerciales concentradas del trazador. En estos casos es necesario verificar que se informe la concentración del indicador para poder cuantificarlo.

Nota 2: si se utiliza Azul Brillante en polvo, es conveniente preparar una solución concentrada en el laboratorio y luego realizar las diluciones necesarias en el campo hasta alcanzar la concentración de la solución trazadora o caldo de pulverización a utilizar en el ensayo.

Soluciones para la curva de calibración

Se realizan diluciones seriadas de la solución trazadora o caldo de pulverización de Azul Brillante de concentración conocida con agua destilada (Figura 9). Se recomienda que la curva cuente como mínimo de cinco puntos dentro de un intervalo de concentración de Azul Brillante (ej. 0,45-6,3 mg/L).

Instrumental

Para la realización del método se utilizan los equipos y el material de vidrio de uso habitual en el laboratorio. En particular, se utilizan lo siguiente:

- Balanza analítica
- Balanza de precisión con un error de $\pm 0,01$ g
- Espectrofotómetro que permita medir en una longitud de onda de 630 nm
- Tubos de ensayo
- Pipetas de diferente volumetría

Procedimiento

Extracción

Enjuagar el colector/muestreador recolectado (portaobjeto/limpiapipa) con un volumen de agua destilada (ej. 2 ml), cuidadosamente, arrastrando la totalidad del trazador. Si es necesario puede utilizarse mayor volumen de agua destilada, teniendo la precaución que el efecto de la dilución no afecte la cuantificación del trazador. Anotar el volumen de agua destilada utilizado (V_{dil}). Paralelamente se realiza la misma extracción sobre el colector/muestreador blanco.

Nota 1: es necesario realizar ensayos previos para definir el volumen de agua destilada suficiente que permita extraer el Azul Brillante desde el colector/muestreador recolectado (portaobjeto/limpiapipa), evitando una dilución excesiva de la muestra que no permita su cuantificación.

Nota 2: del mismo modo es necesario tener en cuenta el volumen mínimo que requiere el espectrofotómetro para poder lograr la medición y de este modo ajustar la cantidad de agua de enjuague.

Cuantificación

Muestra

Se toma una alícuota de la solución de extracción y se mide su absorbancia (UA) en el espectrofotómetro UV-Visible a una longitud de onda de 630 nm.

Curva de calibración

Se procede de la misma manera que para la muestra. Se mide en el espectrofotómetro UV-Visible a una longitud de onda de 630 nm aquellos tubos de la dilución seriada que tengan una absorbancia entre 0,1-0,9 UA.

Nota 1: si el valor de absorbancia de la muestra es mayor que el que arroja la lectura de la mayor concentración de la curva de calibración, se diluye una alícuota de la muestra y se repite el procedimiento de cuantificación.

Nota 2: evitar absorbancias bajas ($< 0,05-0,10$) y muy altas ($> 1,0$) ya que suele aparecer pérdida de linealidad en la curva de calibración.

Cálculos

El cálculo de la concentración de Azul Brillante en el extracto de la muestra se puede realizar gráfica y analíticamente a partir de la curva de calibración. Se grafica la curva de calibración con

la absorbancia en función de la concentración de Azul Brillante en el rango seleccionado (ej. 0,45-6,3 mg/L). Se obtiene la ecuación de regresión lineal (Figura 10).

Se calcula la concentración de Azul Brillante en la muestra y en las soluciones de los blancos por resolución de la ecuación de regresión, a partir del dato de absorbancia obteniendo la concentración en la muestra (C_m) en mg/L. Este dato será utilizado para el cálculo del depósito de deriva de pulverización (β_{dep}).

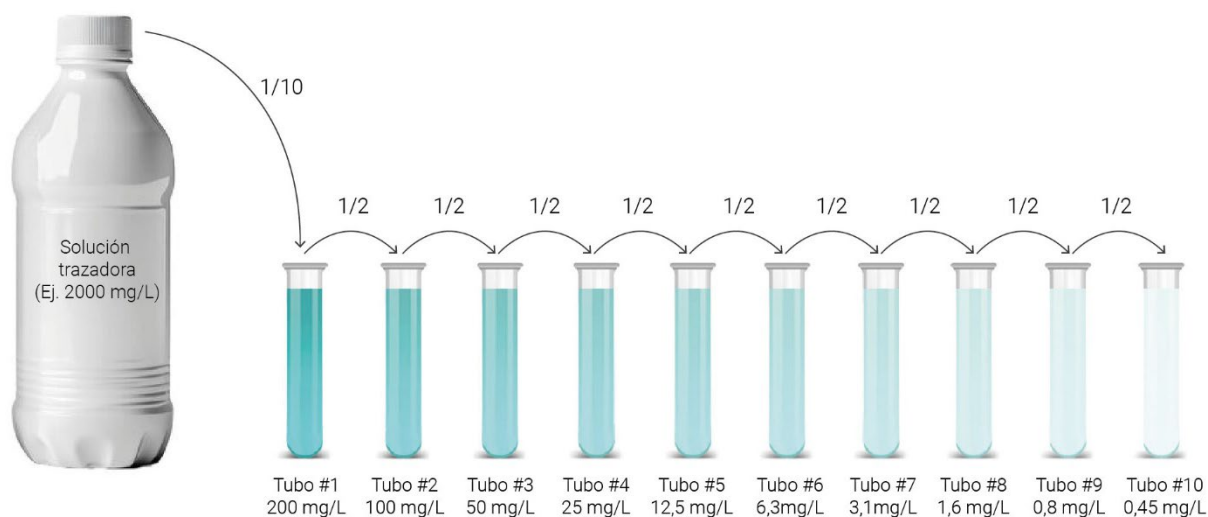


Figura 9. Dilución seriada de la solución trazadora o caldo de aplicación para la preparación de la curva de calibración.

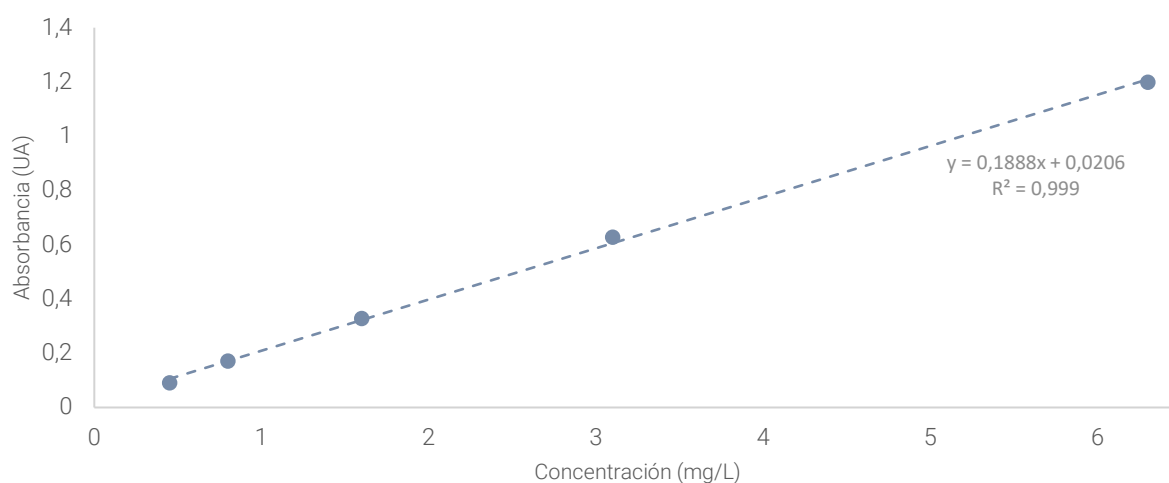
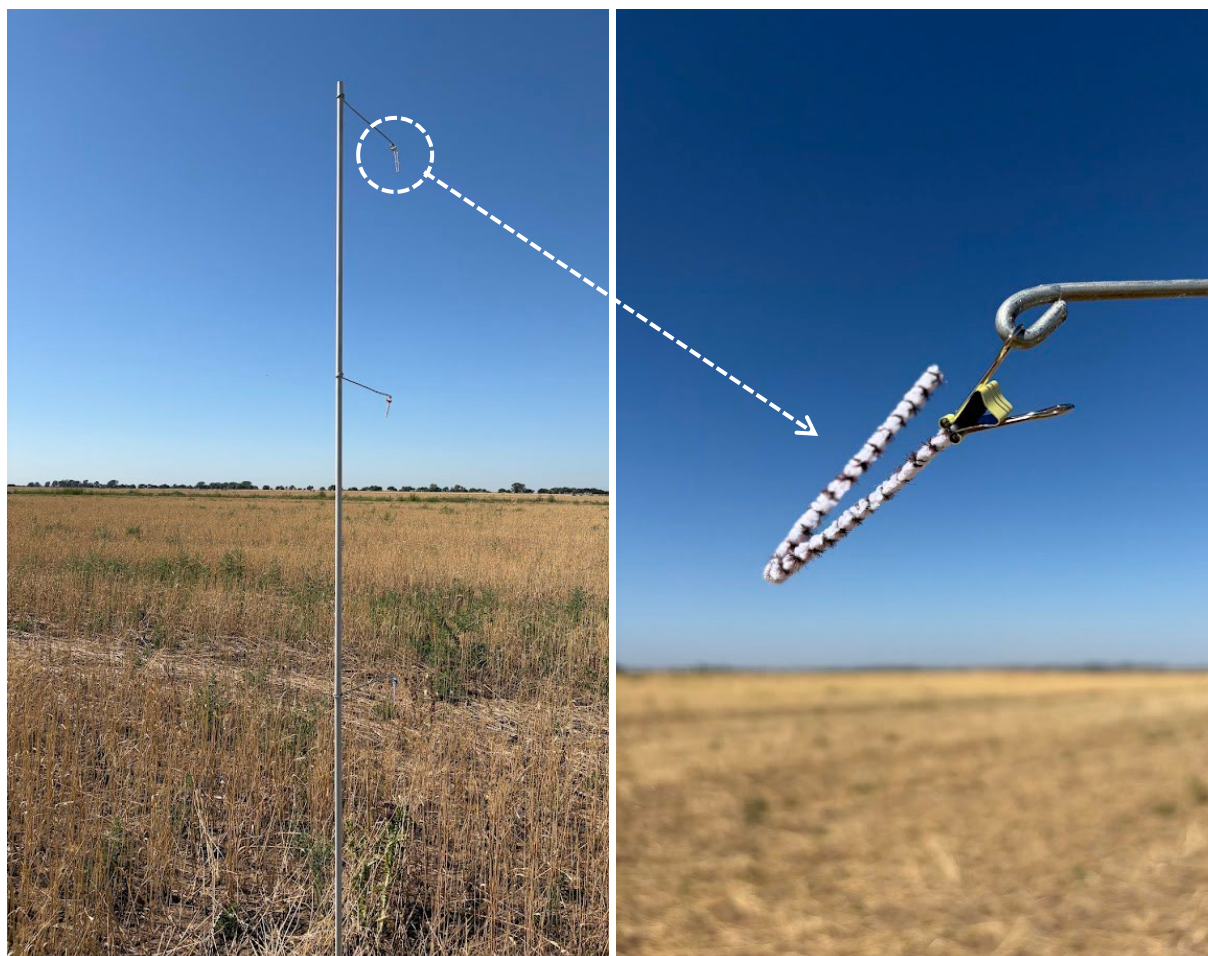


Figura 10. Ejemplo de curva de calibración del trazador Azul Brillante junto con la ecuación de regresión lineal.

■ 6. Anexo 2. Porta colectores dinámicos y estáticos



■ 7. Anexo 3. Mástil de PVC con colector pasivo (limpiapipa)



■ 8. Anexo 4. Plantilla de registro de datos

ENSAYO		
Referencia:		Lugar:
Conducido por:		Fecha:
CULTIVO		
Descripción física:	Tipo:	
	Estado de crecimiento:	
	Materia seca:	
AREA DE ENSAYO		
Agregar diagrama del área del ensayo:	Tipo de superficie:	
	Altura de la vegetación (cm):	
	Distancia de recorrido por pasada (m):	
EQUIPO		
Fabricante:	Tipo de equipo aplicador:	Modelo:
Peso máximo al despegue (kg):	Diámetro del rotor (mm):	
Longitud x anchura x altura del vehículo (mm):	Tipo y capacidad de la batería (mAh):	
Capacidad del depósito (L):	Tipo y número de picos/boquillas:	
Boquillas:	Velocidad de rotación de la boquilla (rpm):	Caudal (L/min):
Presión de trabajo:	Volumen de caldo (L/ha):	Tasa de aplicación (L/m):
Velocidad de avance (m/s):	Ángulo de pulverización:	Ancho de pasada (m)
Tamaño de gota establecido (µm):	Altura de vuelo/Altura relativa entre los muestreadores y el pulverizador del VANT/RPA (m):	
Trazador:	Concentración del trazado (g/l):	
CONDICIONES METEOROLÓGICAS		
Descripción general:		
Altura de referencia (m):	Altura de muestreo (m):	Temperatura (°C):
Humedad relativa (%):	Velocidad del viento (m/s):	Dirección del viento (grados):

PROTOCOLO DE ENSAYO DE DERIVA DE DRONES INTA – FCA AÑO 2026

■ 9. Anexo 5. Lista de materiales

1. Dron y baterías
2. Grupo electrógeno
3. Depósito de agua
4. Estación meteorológica
5. Antena RTK (Real Time Kinematic o Cinemática en Tiempo Real)
6. Guantes de látex o nitrilo
7. Solución de trazador
8. Probetas
9. Coadyuvante
10. Portaobjetos
11. Envases 125 cc con tapa a rosca para guardar los portaobjetos
12. Tarjetas hidrosensibles
13. Bandas elásticas
14. Porta colectores estáticos
15. Porta colectores dinámicos (veletas)
16. Caños de PVC 3 m
17. Estacas de hierro porta caños
18. Alambre
19. Broches tipo binder clips 19 mm
20. Limpiapipas
21. Tubos Falcon 50 cc
22. Marcadores indelebles
23. Lapiceras
24. Cinta de 50 m
25. Cinta de 100 m
26. Planilla de registro de datos
27. Bandejas
28. Balanza analítica
29. Balanza de precisión con un error de $\pm 0,01\text{g}$
30. Espectrofotómetro que permita medir en una longitud de onda de 630 nm
31. Tubos de ensayo
32. Pipetas de diferente volumetría
33. Material de vidrio de laboratorio
34. Scanner
35. PC con sistema lector de tarjetas hidrosensibles (ej. StainMaster)

■ Bibliografía

American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE). (2004). Procedure for measuring drift deposits from ground, orchard, and aerial sprayers. ASAE Standard N.º S561.1 APR2004 (R2024).

Arvidsson, T.; Bergström, L.; Kreuger, J. 2011. Comparison of collectors of airborne spray drift. Experiments in a wind tunnel and field measurements. Pest Manag. Sci. 67: 725-33. doi: 10.1002/ps.2115

Contiero, R.L.; Biffe, D.F.; Catapan, V. (2018). Tecnologia de aplicação. Maringá: EDUEM, 401-449. <https://doi.org/10.7476/9786586383010.0015>

International Organization for Standardization (ISO). (2005). Equipment for crop protection—Methods for field measurement of spray drift. ISO Standard N.º 22866:2005.

National Center for Biotechnology Information (NCBI). (2026). PubChem Compound Summary for CID 19700, FD&C Blue N.º 1. (Disponible: https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/FD_C-Blue-No.-1 verificado: 27 de enero de 2026).

OECD. (2021). Report on the State of the Knowledge – Literature Review on Unmanned Aerial Spray Systems in Agriculture. OECD Series on Pesticides, N.º 105, OECD Publishing, París.

Olivet, J.J.; Villalba, J.; Schenzer, D. 2013. Optimización de la tecnología de aplicación en cultivos extensivos. En: Olivet, J.J.; Villalba, J.; Schenzer, D. (Eds.). Tecnología de aplicación de agroquímicos en cultivos extensivos. Serie FPTA N.º 53: 11–36. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA).

Rezende, D.T.; Raetano, C.G.; Dal Pogetto, M.H.F.A.; Costa, S.I.A.; Vieira, B.C.; Mastria, G. 2011. Tracers extraction on different surface targets. Anais do V Simpósio Internacional de Tecnologia de Aplicação de Agrotóxicos (V SINTAG), Cuiabá, MT, Brasil. FEPAF.

Unmanned Aerial Pesticide Application System Task Force. (2024). Recommendations for conducting UAV field drift trials: Proposed field study protocol guidance: Requirements & specifications for field drift trials when using unmanned aerial vehicles (UAVs). Protocol UAV Drift trials, Version 4.1. (Disponible: <https://uapastf.com/wp-content/uploads/2024/09/UAV-Spray-Drift-Field-Trial-Recommendations-1.1-for-UAPASTF-Website-Posting-Sept-2024.pdf> verificado: enero de 2026).



Instituto Nacional de
Tecnología Agropecuaria
Argentina