

Fog-in-Place (FIP): ingeniería de aerosoles, descontaminación de superficies, evidencia industrial y oportunidades traslacionales para la gestión de artrópodos en ganadería

Revisión crítica con modelización sintética reproducible del transporte y un marco prospectivo de validación industrial

José M. López, BSc, MD, PhD, LLD (C)

Resumen

Antecedentes: Fog-in-Place (FIP) es un término práctico, de nivel de proceso, para designar la distribución aérea automatizada de medios de tratamiento en entornos industriales y alojamientos de animales. No es una clase tecnológica normalizada, ni la identidad de una formulación, ni evidencia de eficacia. **Objetivos:** Integrar de forma crítica la física de aerosoles, las observaciones revisadas por pares en la industria alimentaria, la validación microbiológica en superficies, la ecología de los artrópodos, la regulación europea de biocidas y la gobernanza del riesgo. **Métodos:** Se combinó una revisión crítica, dirigida y no sistemática, de estudios primarios, normas y legislación identificables con un modelo de deposición transparente de orden reducido. **Resultados:** Los experimentos publicados indican una marcada dependencia del tratamiento respecto del diámetro de gota y de la orientación de la superficie; las superficies orientadas hacia arriba pueden responder mejor que las dianas verticales u orientadas hacia abajo. Las normas de desinfección automatizada de salas por vía aérea proporcionan ensayos microbiológicos definidos en portadores, pero ninguna validación directa ovicida o acaricida. Un modelo ilustrativo pone de manifiesto cómo la orientación, el apantallamiento y la ventilación pueden crear una subexposición persistente pese a una concentración media de aerosol en la sala plausible. **Conclusión:** FIP debe evaluarse como un proceso acoplado equipo-medio-entorno-diana. Las alegaciones de eficacia de amplio espectro, incluidas las relativas a huevos, larvas, ninfas y adultos de artrópodos, requieren evidencia de campo independiente y específica de cada organismo y de cada estadio. No se divulga ninguna identidad operativa, química ni formulación confidencial.

Palabras clave: *Fog-in-Place; nebulización; deposición de aerosoles; desinfección automatizada de salas por vía aérea; procesado de alimentos; bioseguridad ganadera; ácaros; garrapatas; ensayos ovicidas; EN 17272; modelización del transporte; regulación de biocidas.*

Aspectos destacados

- FIP describe un enfoque de aplicación diseñado mediante ingeniería, no una sustancia activa concreta ni una alegación de eficacia establecida.
- La vigente EN 17272:2020+A1:2025 aborda la descontaminación antimicrobiana automatizada de superficies no porosas, no la desinfección del aire ni el control de artrópodos.
- Los experimentos históricos en la industria alimentaria demuestran una penalización sustancial por orientación que invalida los supuestos de cobertura uniforme.

- Dos ilustraciones computacionales, claramente identificadas como tales, separan la deposición física y la persistencia de los estadios de artrópodos de los resultados observados en campo.
- Una vía de validación y regulatoria auditable puede proteger los conocimientos técnicos industriales sensibles sin comprometer la reproducibilidad.

1. Introducción y planteamiento del problema

Los aerosoles automatizados se plantean cada vez más como un medio para complementar la limpieza manual en instalaciones industriales con superficies, maquinaria y huecos estructurales complejos. La justificación técnica es convincente: un vehículo aéreo que ocupa todo el recinto puede redistribuir un agente sin que un trabajador tenga que acceder físicamente a cada superficie. Sin embargo, dispersión no es deposición, deposición no es dosis biodisponible y dosis no es letalidad biológica. La distinción es especialmente marcada en los nichos ocultos, la suciedad orgánica, las biopelículas, los materiales porosos y los huevos de artrópodos. Por ello, este artículo rechaza el uso del «tratamiento de toda la sala» como sustituto de la eficacia espacial medida [1–4].

El caso de uso ganadero va más allá de la higiene microbiana. Los ácaros rojos de las aves pueden ocupar refugios estrechos en los equipos y las instalaciones; los sistemas de vacuno y porcino presentan especies de ectoparásitos y vías de exposición diferentes. La aplicación ambiental no puede sustituir al tratamiento veterinario adecuado sobre el animal [10–12]. El presente artículo aborda el control de artrópodos en ganadería como una cuestión de investigación traslacional, no como una extensión ya validada de la nebulización antimicrobiana.

2. Metodología de la revisión y clasificación de la evidencia

Se trata de una revisión narrativa estructurada y de una perspectiva de ingeniería, no de una revisión sistemática PRISMA ni de un metanálisis. Las fuentes se seleccionaron por su pertinencia directa para las normas de desinfección automatizada, la deposición experimental de aerosoles, las aplicaciones en fábricas de alimentos, la ecología de las plagas ganaderas y los instrumentos jurídicos europeos vinculantes. Los datos de publicación y el ámbito normativo principal se cotejaron con los registros de editores/organismos de normalización y de EUR-Lex disponibles a 10 de octubre de 2026. La evidencia se clasifica en E1: normas y legislación (ámbito/requisitos, no resultados de campo); E2: observaciones experimentales revisadas por pares; E3: síntesis revisadas por pares; E4: alegaciones públicas de la industria o de proveedores que requieren un examen independiente; y S: cálculos totalmente sintéticos. No se accedió a datos de operaciones confidenciales de clientes ni se presentaron como resultados auditados de forma independiente.

Clase de evidencia	Inferencia admisible	Inferencia no admisible
E1 Normas	Método de ensayo y ámbito especificados	Autorización comercial automática o eficacia universal
E2 Experimental	Rendimiento para el agente, el sustrato y las condiciones ensayados	Extrapolación a todos los medios, superficies u organismos
E3 Revisiones	Estado de la bibliografía y limitaciones recurrentes	Nuevas mediciones industriales primarias
E4 Informes de casos de operadores	Plausibilidad operativa y observaciones comunicadas	Mecanismo o causalidad demostrados de forma independiente
S Simulación	Consecuencias de los supuestos declarados	Rendimiento medido del producto

3. Terminología: niebla, neblina, aerosol, vapor y FIP

Un aerosol está formado por partículas líquidas o sólidas suspendidas en un gas portador. El vapor designa la fase gaseosa molecular; no son sinónimos. La atomización en frío puede utilizar generadores neumáticos, hidráulicos, centrífugos o ultrasónicos, mientras que la nebulización térmica añade evaporación y recondensación dependientes de la temperatura. La energía térmica puede modificar un medio de tratamiento antes de su deposición. Un generador de aerosol puede aplicar

un producto de forma reproducible y, sin embargo, no distribuirlo de manera uniforme en un recinto con muchos obstáculos. FIP se utiliza aquí únicamente como término genérico y global; no debe presentarse como un equivalente, neutro respecto de las marcas, de la limpieza in situ (CIP), de la esterilización ni de los requisitos de la EN 17272 [1–3].

4. Transporte, evaporación y aplicación en superficies

4.1 Distribuciones del tamaño de partícula y sedimentación gravitatoria

Para una partícula esférica suficientemente pequeña en régimen de Stokes, una aproximación útil de primer orden es $v_s = (\rho_p - \rho_{air})g d^2 C_c / (18 \mu)$, donde v_s es la velocidad terminal de sedimentación, d el diámetro de partícula, C_c la corrección de deslizamiento (próxima a la unidad para muchas gotículas de tamaño micrométrico), μ la viscosidad dinámica y ρ las densidades. Esta expresión no tiene en cuenta la evaporación, el movimiento del aire, el crecimiento higroscópico, las fuerzas electrostáticas ni la turbulencia cerca de las paredes. Su dependencia de d^2 aclara por qué el diámetro mediano de partícula no puede definir por sí solo la cobertura. Los diámetros medianos en número y en volumen pueden divergir; se necesita la distribución completa [1].

Las gotículas más pequeñas pueden seguir el aire circulante durante más tiempo, aunque depositen poca masa en cada superficie. Las gotículas más grandes pueden acumularse rápidamente en las superficies horizontales orientadas hacia arriba, pero penetrar mal alrededor de los obstáculos. El trabajo histórico en fábricas de alimentos de Holah y colaboradores identifica gotículas con un diámetro mediano de aproximadamente 10–20 μm como intervalo favorable para las configuraciones específicas investigadas; se trata de un resultado de ingeniería propio de ese estudio, no de un valor de consigna universal [1].

4.2 Representación mediante balance de masas

Sea $C(t)$ una concentración másica aérea en condiciones de mezcla perfecta y V el volumen efectivo de la sala. Un balance de materia básico es $dC/dt = Q(t)/V - (\lambda_v + \lambda_d + \lambda_l)C$, donde Q es la masa aérea emitida por la fuente por unidad de tiempo, λ_v la eliminación por ventilación, λ_d la deposición ponderada por superficie y λ_l otras pérdidas. En una ubicación i , una carga superficial simplificada es $D_i = \eta_i k_i \int C(t)dt$, donde $\eta_i \in [0,1]$ describe la oclusión/orientación y k_i la velocidad efectiva de deposición. Ni C ni D_i equivalen a una dosis biocida activa sin información sobre la composición, la humectación, el tiempo de contacto y la cinética de reacción. En instalaciones reales puede ser necesario un modelo de transporte multizona o una dinámica de fluidos computacional (CFD) validada.

4.3 Límites mecánicos

Un aerosol fino no es sinónimo de penetración en grietas, camas de animales, depósitos de polvo o el corion de los huevos de artrópodos. El movimiento interno del aire puede sortear las cavidades apantalladas. La evaporación de las gotículas puede modificar la fuerza iónica, el pH y la morfología de los depósitos residuales. La rugosidad superficial y la carga orgánica modifican tanto el acceso como la demanda química. La conductividad por sí sola no implica un campo eléctrico aplicado, y la electroporación no puede deducirse de la descripción «ionizado» en ausencia de mediciones directas de permeabilización de membranas.

5. Evidencia industrial: lo que está realmente documentado

Una revisión primaria de la industria alimentaria y el programa experimental asociado de Holah y colaboradores [1] documentaron eficacia frente a organismos en superficies orientadas hacia arriba, pero en general no en las verticales ni en las orientadas hacia abajo; su modelización y sus experimentos justificaron una ventana de tamaño de gota de alrededor de 10–20 μm en las condiciones investigadas. Este resultado es específico del material, de la aplicación y del experimento. El resumen publicado no respalda una cobertura uniforme, una reducción universal de patógenos ni una generalización a todas las fábricas.

Una nota de investigación controlada más reciente comparó la nebulización con la inmersión utilizando sistemas desinfectantes especificados frente a *Staphylococcus aureus*, *Salmonella Typhimurium* y *Escherichia coli* en acero inoxidable [5]. Respalda la pertinencia de la nebulización para las superficies en contacto con alimentos en las condiciones ensayadas; no documenta una tasa de éxito operativa generalizable a plantas completas ni evalúa artrópodos. Una revisión de 2026 que comprende 38 artículos revisados por pares del sector alimentario, seleccionados entre 2014 y 2024, describe

reducciones alentadoras de patógenos con las químicas ensayadas, pero pone de relieve una distribución irregular, la presencia de residuos, la seguridad de los trabajadores y la escasez de CFD validada a escala industrial [3].

La bibliografía hospitalaria ofrece otro análogo propio de su ámbito: Boyce [4] revisó los sistemas de descontaminación de salas sin contacto y subrayó el papel de la limpieza ambiental y la variabilidad de los métodos. No puede suponerse que los resultados hospitalarios se reproduzcan en alojamientos de animales o fábricas de alimentos. Del mismo modo, las revisiones sobre la contaminación del aire en la industria alimentaria [6] justifican la vigilancia ambiental sin demostrar que las mejoras microbiológicas se traduzcan en la eliminación de plagas o biopelículas.

Fuente / sistema	Observaciones documentadas	Límite importante
Holah et al., 1999 [1]	Dependencia experimental de la orientación de la superficie; gotículas favorables en las condiciones estudiadas	No demuestra una cobertura uniforme en otra planta
Lemos Jr et al., 2025 [5]	Comparación controlada de desinfectantes por nebulización frente a inmersión en acero inoculado	No es una variable de valoración validada para el conjunto de instalaciones ni para plagas
Revisión en Food Biophysics, 2026 [3]	Síntesis crítica de 38 artículos relevantes para el sector alimentario	Síntesis secundaria; heterogeneidad de agentes y sustratos
Boyce, 2016 [4]	Revisión de los sistemas hospitalarios sin contacto	El contexto clínico y las químicas difieren
Implantación industrial confidencial	Posible existencia y viabilidad de una implantación automatizada	No se aporta ni se infiere ningún rendimiento numérico público atribuible

6. Dianas microbianas, validación y nivel de prueba exigible

Deben distinguirse las bacterias vegetativas, las micobacterias, las esporas bacterianas, las levaduras, las esporas de mohos y los virus. La sensibilidad depende del organismo, la matriz, la química y el método; las reducciones de células vegetativas no justifican alegaciones esporádicas. Una superficie contaminada debe limpiarse previamente según lo especificado en el programa previsto, ya que la suciedad protectora y las biopelículas maduras pueden modificar la accesibilidad y la química. Los experimentos cuantitativos en portadores requieren una neutralización adecuada, controles de recuperación, controles positivos/negativos, replicación y la notificación del límite de recuperación.

La EN 17272:2020+A1:2025 aborda específicamente la distribución automatizada de productos químicos por difusión en el aire para la desinfección de superficies no porosas en entornos médicos, veterinarios, alimentarios e institucionales. No es un método para demostrar la desinfección del aire, la actividad acaricida, la eficacia en el interior de sustratos porosos ni la aprobación legal de un producto [2]. Las alegaciones microbianas exigen ensayos en las condiciones normalizadas aplicables, incluidos organismos definidos y ensayos de distribución; es aconsejable realizar ensayos adicionales en las condiciones de uso para la geometría de la planta prevista.

7. Hipótesis traslacional sobre artrópodos en ganadería

El ácaro rojo de las aves, *Dermanyssus gallinae*, es un modelo especialmente útil porque sus estadios adulto, de ninfa e inmaduros ocupan refugios fuera del hospedador y reinfestan las superficies cuando se restablece el acceso al hospedador [10–12]. Las garrapatas presentan ciclos vitales y preferencias de hábitat específicos de cada especie; extrapolar los resultados obtenidos con el ácaro rojo de las aves a las garrapatas duras carecería de fundamento científico. Los enfoques físicos o de base mineral aplicados a superficies que se describen en acarología tienen efectos que dependen de la humedad y de las partículas [13], y que no pueden atribuirse por mera analogía a un material no divulgado. Los huevos, las larvas, las ninfas y los adultos requieren variables de valoración identificadas por separado, como el retraso de la eclosión, la viabilidad, la locomoción, la mortalidad y la emergencia posterior.

Puede plantearse como hipótesis una arquitectura secuencial sin describir ninguna fórmula comercial: (A) acondicionamiento ambiental líquido adecuado al recinto, con medición de la deposición en superficie; (B) tras las comprobaciones de seguridad y compatibilidad, una intervención diferenciada de gestión de superficies secas. Las dos fases deben compararse mediante un diseño factorial con un control sin tratar, A sola, B sola y A→B. No hay base para alegar

sinergia antes de demostrar una interacción positiva frente a una variable de valoración declarada previamente. No debe suponerse que la mezcla simultánea sea compatible desde el punto de vista químico u operativo.

8. Ilustraciones computacionales reproducibles - estrictamente sintéticas

Todos los valores de esta sección son datos de entrada del modelo generados mediante IA para poner de manifiesto la sensibilidad de ingeniería. No se han obtenido de mediciones piloto, informes de clientes, formulaciones de tratamiento ni estudios en ganado. Se indican las ecuaciones equivalentes al código y los valores de entrada para facilitar su reproducción.

8.1 Atenuación del aerosol y exposición de las superficies

Considérese un recinto teórico con una concentración másica aérea normalizada $C(0)=1$ tras la parada de la fuente. Sean $\lambda_d = 0,020 \text{ min}^{-1}$, $\lambda_l = 0,010 \text{ min}^{-1}$ y tres tasas hipotéticas de eliminación por ventilación $\lambda_v = 0,005$; $0,030$ y $0,080 \text{ min}^{-1}$. Entonces $C(t)=\exp(-\lambda t)$, $\lambda=\lambda_d+\lambda_l+\lambda_v$, e $I(T)=\int_0^T C(t)dt=(1-\exp(-\lambda T))/\lambda$ para $T=45 \text{ min}$. Los factores de orientación ilustrativos η son 1,0 para las superficies expuestas orientadas hacia arriba, 0,35 para las verticales, 0,12 para las orientadas hacia abajo y 0,04 para las rehundidas; la deposición normalizada es igual a $\eta \times I(45)$. Los factores de orientación son ilustrativos, no coeficientes medidos procedentes de [1].

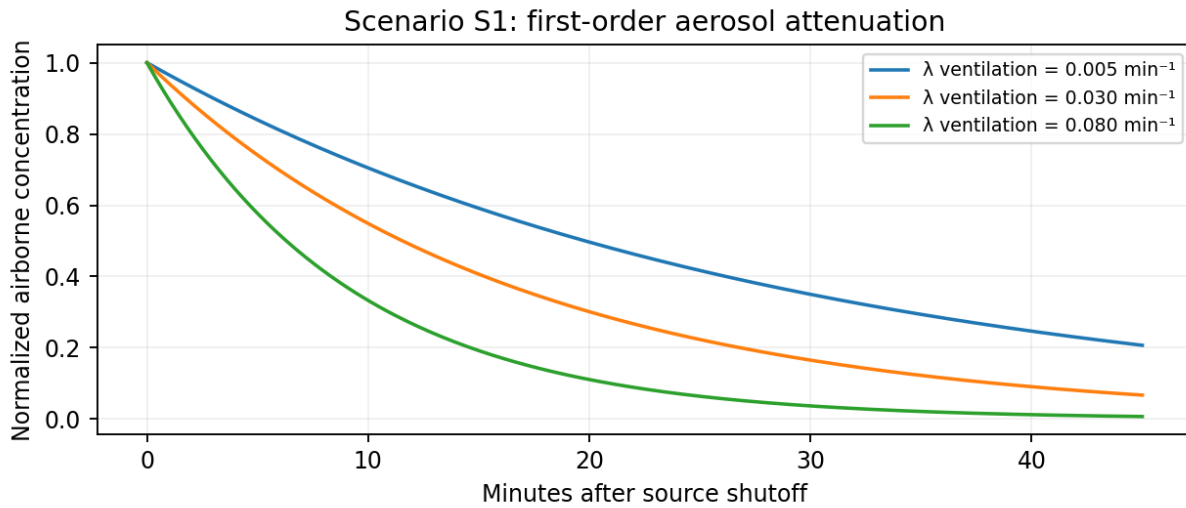


Figura 1. Curvas de concentración de aerosol puramente sintéticas, obtenidas con coeficientes de eliminación de primer orden declarados; no son CFD ni mediciones de campo.

Pérdida por ventilación, min^{-1}	Índice (hacia arriba)	Índice (vertical)	Índice (hacia abajo)	Índice (rehundida)
0,005	22,66	7,93	2,72	0,91
0,030	15,55	5,44	1,87	0,62
0,080	9,03	3,16	1,08	0,36

El modelo demuestra que, en este modelo concreto con la fuente apagada, aumentar la pérdida por ventilación reduce la exposición aérea integrada y que las superficies muy apantalladas pueden recibir solo una pequeña fracción de la exposición que recibe una superficie de referencia expuesta orientada hacia arriba. El funcionamiento real puede implicar generación activa, recirculación, remolinos turbulentos y pérdidas por reacción específicas del tratamiento, por lo que los resultados numéricos no deben utilizarse como recomendaciones de diseño de ingeniería.

8.2 Persistencia hipotética de artrópodos por estadio

Un segundo escenario sintético e independiente asigna arbitrariamente 1.000 unidades iniciales: 350 a huevos, 250 a larvas, 220 a ninfas y 180 a adultos. Los efectos fraccionales hipotéticos específicos de cada estadio de la fase A son 0,18; 0,46; 0,52 y 0,56; los de la fase B son 0,26; 0,48; 0,57 y 0,60. Bajo los supuestos de independencia condicional, reclutamiento nulo

y accesibilidad total, $N_{\text{after}} = N_{\text{initial}}(1-r_A)(1-r_B)$. Estos supuestos no están validados ni son biológicamente universales. El escenario omite deliberadamente la sinergia mecánica y la incertidumbre estocástica.

Estadio	Unidades sintéticas iniciales	A hipotética	B hipotética	Remanente modelizado
Huevos	350	18 %	26 %	212,4
Larvas	250	46 %	48 %	70,2
Ninfas	220	52 %	57 %	45,4
Adultos	180	56 %	60 %	31,7

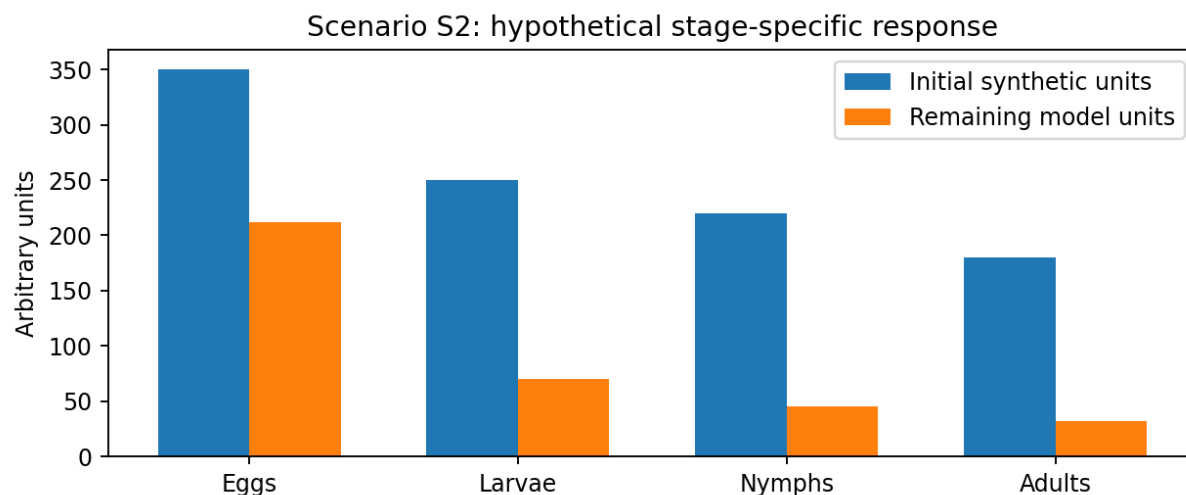


Figura 2. Recuentos hipotéticos obtenidos multiplicando los efectos supuestos indicados. No se admite ninguna inferencia empírica ovicida, larvicida ni acaricida.

El resultado agregado supuesto del modelo es de 359,7 unidades residuales de 1.000, lo que equivale a una reducción modelizada aritmética del 64,0 %. Este porcentaje no es evidencia experimental y nunca debe utilizarse en la documentación de un producto como alegación de eficacia. La correlación entre las fases, la reaparición desde los refugios y una deposición no uniforme invalidarían el cálculo simple basado en la independencia.

8.3 Sensibilidad, falsabilidad del modelo y futura CFD

Un programa validado debe hacer variar la distribución del tamaño de gota, la renovación volumétrica del aire, la humedad relativa, la temperatura ambiente y de las superficies, la densidad de carga, la ubicación del generador y la oclusión. Si se recurre a la CFD, debe documentarse el modelo de turbulencia, la sensibilidad de la malla, las condiciones de contorno en las paredes, los submodelos de evaporación y deposición de gotículas, y los errores residuales frente a mediciones espaciales trazables con trazadores. El rendimiento debe evaluarse en los puntos de peor accesibilidad y no solo mediante los valores medios de la sala. Un experimento que rechaza una hipótesis de uniformidad o de efecto biológico es informativo y debe poder seguir comunicándose.

9. Programa experimental industrial

9.1 Fase 0: definición del proceso y revisión de zonas peligrosas

Definir las instalaciones como zonas delimitadas, con planos del emplazamiento, equipos, sustratos expuestos, superficies en contacto con alimentos, sistemas de agua, tratamiento del aire y movimientos del ganado. Clasificar por separado las explotaciones convencionales, intensivas, extensivas y ecológicas. En instalaciones abiertas lateralmente o extensivas, cerrar y tratar una subestructura delimitada es más plausible que alegar un tratamiento aéreo estable de pastos, suelo o aire libre. Realizar revisiones químicas, térmicas, eléctricas, de aerosoles, de corrosión, de contaminación del pienso y de exposición de trabajadores/animales antes de cualquier ensayo piloto. La composición propietaria puede mantenerse en un

expediente regulatorio protegido, mientras que las descripciones públicas utilizan huellas analíticas independientes y códigos de producto neutros.

9.2 Fase 1: cualificación de ingeniería

Medir la repetibilidad del generador y el tamaño de gota en la salida y en posiciones representativas de la sala; utilizar trazadores de deposición no peligrosos, cupones de superficie a múltiples alturas y orientaciones, balance de masas y ciclos replicados. Comunicar las distribuciones de deposición, la recuperación de las muestras, el fondo, el coeficiente de variación espacial y los puntos del peor caso predefinidos. Conservar el registro de todas las desviaciones. Si la química del medio de tratamiento cambia al aerosolizarse, caracterizar de forma independiente el material a la salida y el depositado sin divulgar conocimientos técnicos de fabricación.

9.3 Fase 2: eficacia microbiológica

Utilizar los ensayos pertinentes de la EN 17272 cuando proceda, además de portadores no porosos específicos de la planta inoculados con organismos de desafío seleccionados o con sustitutos justificados por el análisis del riesgo. Aplicar la validación del neutralizante y calcular la reducción log10 como $\log_{10}(\text{UFC recuperadas en el control}) - \log_{10}(\text{UFC recuperadas tras el tratamiento})$, con censura cuando se alcance el límite de detección. Incluir los hisopos/ATP rutinarios solo como complementos operativos, no como sustitutos de los ensayos de desafío específicos de patógenos. Repetir tras condiciones definidas de limpieza y ensuciamiento, y auditar las tendencias de la vigilancia ambiental.

9.4 Fase 3: acarología y prueba ovicida

Para cada especie de artrópodo identificada, utilizar poblaciones procedentes del campo y confirmadas en laboratorio cuando sea posible. Asignar aleatoriamente estructuras o compartimentos a control, A, B y A→B, con recuento ciego y especificación independiente del tamaño muestral. Variables de valoración específicas de cada estadio: proporción de eclosión de huevos a lo largo de un periodo de incubación observado completo; supervivencia de larvas/ninfas/adultos; emergencia viable; recolonización de refugios; y presión de infestación a intervalos de seguimiento preespecificados. Analizar como variables binomiales, binomiales negativas o de supervivencia según las distribuciones y la agrupación jerárquica; no confundir el animal con la instalación como unidad de aleatorización. Medir la humedad y la exposición en los refugios, ya que pueden explicar la heterogeneidad [10–13].

9.5 Fase 4: validación entre emplazamientos y garantía de calidad

Realizar ensayos en emplazamientos independientes y en distintas estaciones del año, con protocolos prospectivos y conservación de los conjuntos de datos brutos. Predefinir los estimandos principales, la gestión de la multiplicidad, la compatibilidad con los materiales, los requisitos de mantenimiento y los criterios de reentrada. Documentar la seguridad de los operarios y la transferencia de residuos a superficies en contacto con alimentos/piensos. Las auditorías independientes deben examinar las desviaciones y los acontecimientos adversos con el mismo detalle que los resultados favorables. Publicar conjuntos de datos anonimizados y métodos suficientes para evaluar la causalidad, sin revelar identidades, formulaciones ni configuraciones de seguridad específicas de cada planta.

Punto de control	Evidencia mínima	Regla de decisión
G0 Seguridad/legalidad	Evaluación de la exposición, uso previsto permitido, controles del emplazamiento	Ningún ensayo sin una situación de seguridad y jurídica documentada y aceptable
G1 Aplicación	Datos espaciales con trazadores y caracterización de la fuente	Avanzar solo si se alcanzan las superficies críticas predefinidas
G2 Microbiología	Ensayo controlado en portadores con neutralización	Resultado específico de la diana; nunca extrapolar a plagas
G3 Artrópodos	Ensayo factorial controlado específico de cada estadio	Cada taxón y estadio alegado, validado de forma independiente
G4 Transferencia industrial	Emplazamientos, estaciones y operarios replicados	Publicar la incertidumbre y los fracasos, además de los éxitos

10. Gobernanza, seguridad y legislación europea

El Reglamento (UE) n.º 528/2012 (BPR) establece las condiciones para la comercialización de biocidas en el mercado europeo y para sus usos, incluidos el tipo de producto 2 para la desinfección de determinadas superficies y del entorno, el tipo de producto 3 para la higiene veterinaria, incluidos los alojamientos de animales, y el tipo de producto 4 para las zonas de alimentos y piensos. Un producto con una acción prevista de control de plagas puede implicar otros tipos de producto del BPR, incluido el TP18 para insecticidas, acaricidas y productos para controlar otros artrópodos. La clasificación se rige por la función prevista, las sustancias y las alegaciones; el uso de denominaciones conocidas, ya sean convencionales o alternativas propuestas, no excluye automáticamente de la regulación un uso de control de plagas [7].

Las instalaciones de procesamiento de alimentos también deben abordar los sistemas de higiene conforme a los requisitos aplicables de la legislación alimentaria, así como las obligaciones relativas a los agentes químicos en el trabajo. La producción animal ecológica conlleva restricciones de uso adicionales en virtud del Reglamento (UE) 2018/848 y de sus medidas de ejecución aplicables, incluido el Reglamento (UE) 2021/1165 y sus modificaciones posteriores [8,9]. Estas normas exigen una evaluación específica del uso en lugar de suponer que el origen mineral garantiza la conformidad con la normativa de producción ecológica. Cualquier acción física o química prevista contra los artrópodos del ganado debe evaluarse en cuanto a su clasificación y aprobación con independencia de su rendimiento en la limpieza microbiológica.

Ni un componente de calidad alimentaria ni un medio de tratamiento ambiental son automáticamente seguros para su inhalación en forma de gotículas. La compatibilidad del equipo, el aerosol respirable, la deposición en el pienso y los bebederos, la corrosividad, la escorrentía, la humedad residual, la reentrada de los animales, la exposición de terceros y las emisiones al medio ambiente son aspectos operativamente críticos. Aquí no se recomienda ninguna dosis, intervalo de contacto, plan de ventilación ni tiempo de reentrada, porque esos valores dependen del proceso validado exacto y de las condiciones de autorización.

11. Discusión

La evidencia más sólida se encuentra actualmente en la viabilidad física de distribuir líquidos aerosolizados y, en particular, en determinados resultados antimicrobianos controlados en superficies. La más débil es cualquier extensión inferida entre reinos, desde las bacterias ensayadas hasta los huevos de artrópodos o las garrapatas. La geometría de la instalación es un modificador del efecto, no una covariable de ruido; mostrar que la niebla entra en una sala no basta para demostrar que entra en un refugio. La supresión de plagas a escala de instalación depende además de la reintroducción, los movimientos de los hospedadores y las prácticas de higiene. Por tanto, una escala de alegaciones debería diferenciar la generación del aerosol, la deposición, la inactivación específica del microorganismo, la eficacia ovicida específica del organismo, la durabilidad operativa y la autorización regulatoria. Se trata de proposiciones distintas.

También sería inexacto presentar una implantación industrial conocida únicamente a través de comunicaciones operativas confidenciales como un estudio de caso documentado de forma independiente. Los materiales públicos de los operadores podrían corroborar que un sistema existe y que se comunican determinados resultados microbiológicos, pero, sin protocolos accesibles, grupos de comparación, confirmación de especies y conjuntos de datos brutos, no pueden respaldar una eficacia universal cuantificada. Este manuscrito no formula alegaciones de eficacia específicas de ningún cliente, no identifica indirectamente ninguna instalación y no divulga formulaciones, concentraciones, parámetros de proceso ni secretos comerciales.

12. Limitaciones

La evaluación de la bibliografía es dirigida y no sistemática, por lo que son posibles sesgos de publicación y de selección. No se reconstruyeron los conjuntos de datos completos de acceso restringido. El modelo sintético de transporte supone mezcla espacial y eliminación constante de primer orden, mientras que el modelo de artrópodos supone efectos independientes y ausencia de reproducción o migración; ninguno de los dos está calibrado. No se incluye ningún conjunto de datos de campo industrial original ni expediente de seguridad, por lo que el artículo no puede alegar un éxito establecido experimentalmente para una plataforma confidencial. Precisamente por estos límites es esencial la jerarquía de validación propuesta.

13. Conclusiones

La mejor forma de entender FIP es como una arquitectura acoplada de ingeniería de aerosoles e intervención ambiental, más que como una garantía de higienización. Un éxito reproducible a escala de instalación requiere caracterizar la física del aerosol y de la deposición, variables de valoración biológicamente válidas, superficies realistas del peor caso, la seguridad de los trabajadores y los animales, y una evaluación regulatoria específica del uso. La evidencia publicada en fábricas de alimentos respalda la viabilidad de determinadas aplicaciones microbiológicas, pero también documenta una marcada limitación debida a la orientación. Trasladar FIP a las poblaciones de ácaros y garrapatas —incluidos huevos, larvas, ninfas y adultos— sigue siendo un programa de investigación creíble, no un resultado generalizado demostrado. Es posible construir una base de evidencia industrial publicable sin nombrar a clientes ni divulgar conocimientos técnicos de fabricación protegidos.

Declaraciones

Tipo de artículo: Revisión narrativa crítica y perspectiva metodológica que incorpora modelización sintética original. Para este manuscrito no se realizó ningún estudio de intervención clínico, veterinario o industrial con sujetos vivos. **Disponibilidad de datos:** todos los datos de entrada sintéticos y las ecuaciones se indican explícitamente en la sección 8; no se reproduce ningún conjunto de datos confidencial. **Conflicto de intereses:** el autor mantiene vínculos profesionales con actividades de biotecnología industrial y de desarrollo de ingredientes; el presente artículo no contiene deliberadamente ninguna alegación comercial de marca ni propietaria. **Financiación:** No se declara ninguna subvención externa independiente. **Aprobación ética:** No aplicable a los cálculos sintéticos ni a la revisión bibliográfica. **Declaración de integridad probatoria:** todas las figuras y los valores simulados se han obtenido con parámetros de modelización basados en IA y software desarrollado a tal efecto, por lo que deben considerarse meramente hipotéticos y no constituyen observaciones.

Referencias

- [1] Holah JT et al. Fogging for the disinfection of food processing factories and equipment. *Trends Food Sci Technol.* 1999;10(6–7):205–210. [https://doi.org/10.1016/S0924-2244\(99\)00045-X](https://doi.org/10.1016/S0924-2244(99)00045-X)
- [2] CEN. EN 17272:2020+A1:2025. Chemical disinfectants and antiseptics — Methods of airborne room disinfection by automated process. Alcance oficial: <https://www.sis.se/en/produkter/health-care-technology/sterilization-and-disinfection/disinfectants-and-antiseptics/ss-en-172722020a12025/>
- [3] Fogging in Food Processing: A Bibliometric and Critical Review of Applications, Limitations, and Sustainable Prospects. *Food Biophysics.* 2026. <https://doi.org/10.1007/s11483-025-10101-9>
- [4] Boyce JM. Modern technologies for improving cleaning and disinfection of environmental surfaces in hospitals. *Antimicrob Resist Infect Control.* 2016;5:10. <https://doi.org/10.1186/s13756-016-0111-x>
- [5] Lemos Junior WJF et al. Fogging vs immersion techniques for sustainable pathogen inactivation on stainless steel surfaces using commercial sanitizers. *J Food Eng.* 2025;384:112249. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2024.112249>
- [6] Airborne contamination in the food industry: An update on monitoring and disinfection techniques of air. *Trends Food Sci Technol.* 2019;90:147–156. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.06.006>
- [7] European Parliament and Council. Regulation (EU) No 528/2012 concerning the making available on the market and use of biocidal products. <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2012/528/oj/eng>
- [8] European Parliament and Council. Regulation (EU) 2018/848 on organic production and labelling. <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2018/848/oj/eng>
- [9] European Commission. Implementing Regulation (EU) 2021/1165 authorising certain products and substances for use in organic production. https://eur-lex.europa.eu/eli/reg_impl/2021/1165/oj/eng
- [10] Sparagano OAE et al. Significance and Control of the Poultry Red Mite, *Dermanyssus gallinae*. *Annu Rev Entomol.* 2014;59:447–466. <https://doi.org/10.1146/annurev-ento-011613-162101>

- [11] Sigognault Flochlay A et al. Poultry red mite infestation: a broad impact parasitological disease. *Parasites Vectors*. 2017;10:357. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC5537931/>
- [12] Mul MF et al. Possibilities for IPM strategies in European laying hen farms for improved control of the poultry red mite (*Dermanyssus gallinae*). *Front Vet Sci*. 2020;7:565866. <https://doi.org/10.3389/fvets.2020.565866>
- [13] Kilpinen O, Steenberg T. Inert dusts and their effects on the poultry red mite. *Exp Appl Acarol*. 2009;48:51–62. <https://doi.org/10.1007/s10493-008-9232-0>
- [14] Process Technologies for Disinfection of Food-Contact Surfaces in the Dry Food Industry: A Review. *Microorganisms*. 2025;13(3):648. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11945173/>
- [15] Prado-Silva L et al. Meta-analysis of the effects of sanitizing treatments on *Salmonella*, *Escherichia coli* O157:H7, and *Listeria monocytogenes* inactivation in fresh produce. *Appl Environ Microbiol*. 2015;81:8008–8021. <https://doi.org/10.1128/AEM.02216-15>

Apéndice A. Especificación transparente para la reproducibilidad

Curvas sintéticas de aerosol: para t de 0 a 45 minutos, con un muestreo de 250 puntos equiespaciados, calcular $C(t) = \exp[-(0.020 + 0.010 + \lambda_v)t]$, para $\lambda_v \in \{0.005, 0.030, 0.080\} \text{ min}^{-1}$. Índice de deposición por ubicación: $I_i = \eta_i [1 - \exp(-(0.030 + \lambda_v)45)] / (0.030 + \lambda_v)$, con $\eta_i \in \{1, 0.35, 0.12, 0.04\}$. No se utilizan números aleatorios ni parámetros experimentales. Escenario de artrópodos: $N = (350, 250, 220, 180)$, $r_A = (.18, .46, .52, .56)$, $r_B = (.26, .48, .57, .60)$; calcular $N \times (1 - r_A) \times (1 - r_B)$ componente a componente. Los datos de entrada son ilustrativos y los lectores pueden modificarlos libremente para realizar análisis de sensibilidad.

Apéndice B. Propuesta de diccionario de datos industriales anonimizados

Campo	Tipo / lógica de notificación
Código de instalación	Identificador arbitrario no identificativo del emplazamiento; excluir la ubicación del emplazamiento
Estrato de superficie	Hacia arriba / vertical / hacia abajo / apantallada / porosa
Caracterización del aerosol	Resumen de la distribución y descriptores analíticos validados
Contexto ambiental	Categoría de renovación del aire; temperatura y HR en intervalos aprobados
Microbiología	Organismo, matriz, valor basal controlado, reducción logarítmica, límite de detección
Eficacia frente a artrópodos	Especie, huevos/larvas/ninfas/adultos, supervivencia y seguimiento
Controles	Positivos, negativos, sin tratar y blancos de procedimiento
Seguridad	Clasificación de incidentes, hallazgos de exposición anonimizados
Cumplimiento normativo	Territorio, uso previsto y evidencia de la aprobación aplicable