



Análisis del uso de drones en la última milla para la entrega de productos sensibles: una  
revisión de literatura

Trabajo de Grado

Autor: María Paula Herrera Salgado

Bogotá DC.

2025



Análisis del uso de drones en la última milla para la entrega de productos sensibles: una  
revisión de literatura

Trabajo de Grado

María Paula Herrera Salgado (Administración de Logística y producción)

Tutor: Carlos Alberto Franco Franco

Bogotá DC.

2025

## **Agradecimientos**

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mis padres, Lina María Salgado y Álvaro Herrera, por su incondicional apoyo y amor durante todo mi proceso académico. Sus enseñanzas, dedicación y ejemplo han sido fundamentales para alcanzar esta meta.

También agradezco especialmente a mis profesores Carlos Franco, Juan Carlos Espinosa y Harrison Góngora quien con su paciencia, guía y conocimiento ha sido pieza clave en el desarrollo de esta investigación. Su mentoría y experiencia han enriquecido significativamente este trabajo.

### **Declaración de originalidad y autonomía**

Declaro bajo la gravedad del juramento, que he escrito el documento de título “Análisis del uso de drones en la última milla para la entrega de productos sensibles: una revisión de literatura”, en la opción de grado de Asistente de Investigación III y que, por lo tanto, su contenido es original.

Declaro que he indicado clara y precisamente todas las fuentes directas e indirectas de información y que este trabajo no ha sido entregado a ninguna otra institución con fines de calificación o publicación.

María Paula Herrera Salgado

### **Declaración de exoneración de responsabilidad**

Declaro que la responsabilidad intelectual del presente trabajo es exclusivamente de su autor. La Universidad del Rosario no se hace responsable de contenidos, opiniones o ideologías expresadas total o parcialmente en él.

María Paula Herrera Salgado

## Tabla de contenido

Glosario.....	9
Resumen.....	11
Palabras Claves .....	11
Abstract.....	12
Keywords.....	12
1. Introducción .....	13
2. Objetivos.....	14
2.1 Objetivo general.....	14
2.2 Objetivos específicos.....	15
3 Metodología .....	15
4 Revisión de Literatura .....	18
4.1 Problemática del transporte de última milla.....	18
4.2 Innovación en la logística: los drones .....	19
4.3 Aplicaciones actuales y casos de estudio .....	20
4.4 Regulación y limitaciones.....	22
4.5 Aspectos técnicos y operativos.....	23
4.6 Empaque y protección de productos delicados en entregas con drones.....	24
4.7 Sostenibilidad y reducción del impacto ambiental .....	25
4.8 Futuro y tendencias emergentes.....	27
5 Discusión .....	28
5.1 Análisis general de la temática .....	28

5.2	Comparación entre Alemania y Colombia .....	30
6	Conclusiones .....	32
7	Bibliografía.....	34

**Lista de Figuras**

**Figura 1 Diagrama de flujo de la revisión de literatura, 2025 ..... 17**

## Glosario

**Logística de última milla:** Etapa final del proceso logístico que conecta el centro de distribución con el consumidor final. Es una de las fases más costosas y complejas debido a su alto impacto en la satisfacción del cliente, el tráfico urbano y el medio ambiente. (Gevaers, Van de Voorde & Vanelslander, 2011)

**Dron / UAV (Vehículo Aéreo No Tripulado):** Aeronave que opera sin tripulación a bordo, controlada remotamente o mediante sistemas autónomos. En logística, se utiliza para entregas rápidas, especialmente en zonas de difícil acceso. (Otto et al., 2018; Goodchild & Toy, 2018)

**Productos sensibles:** Bienes que requieren condiciones específicas durante el transporte, como temperatura controlada, bajo nivel de vibraciones o protección contra impactos. Incluyen medicamentos, vacunas y dispositivos electrónicos. (Matopoulos et al., 2021; Drones, s. f.)

**VLOS (Visual Line of Sight):** Normativa que establece que el operador debe mantener contacto visual directo con el dron durante su operación. Limita el uso de drones en entregas de larga distancia o en áreas densamente pobladas. (FAA, 2020; Clothier et al., 2015)

**Cold Chain Packaging:** Tecnología de empaque que asegura la conservación de productos termosensibles, como vacunas o muestras médicas, mediante aislamiento térmico, refrigeración activa/pasiva o sensores integrados. (Matopoulos et al., 2021; Zipline, citado en Rosser et al., 2018)

**Rutas aéreas o aerovías digitales:** Corredores específicos de tráfico aéreo a baja altitud diseñados para el tránsito seguro de drones en áreas urbanas. Permiten coordinar múltiples vuelos y reducir interferencias. (Shakhatreh et al., 2019)

**Modelos logísticos híbridos:** Estrategias que combinan drones con otros modos de transporte, como vehículos autónomos terrestres, para optimizar la eficiencia, cobertura y sostenibilidad. (Murray & Chu, 2015; Chung et al., 2020)

**Trazabilidad:** Capacidad de seguir el recorrido y condiciones de un producto en tiempo real durante su transporte. Se logra mediante sensores, GPS y tecnologías como RFID. (Matopoulos et al., 2021)

**Sostenibilidad logística:** Aplicación de prácticas y tecnologías que reducen el impacto ambiental de las actividades logísticas, como emisiones de CO<sub>2</sub>, ruido y consumo de energía. (Goodchild & Toy, 2018; Stolaroff et al., 2018)

**Empaque técnico especializado:** Diseño de embalaje que protege productos delicados ante vibraciones, temperatura, humedad o impactos durante el transporte aéreo. Debe ser ligero y eficiente. (Matopoulos et al., 2021; Chung et al., 2016)

## Resumen

El presente trabajo realiza una revisión de literatura sobre el uso de drones en la logística de última milla, con énfasis en la entrega de productos sensibles como medicamentos y artículos frágiles. A partir del análisis de 15 estudios seleccionados entre 2020 y 2024, se identifican los beneficios, desafíos y perspectivas de esta tecnología emergente. Los resultados destacan que los drones pueden mejorar la eficiencia operativa, reducir los tiempos de entrega y ampliar la cobertura en zonas remotas, además de contribuir a la sostenibilidad ambiental cuando se usan de manera adecuada. Sin embargo, también se evidencian barreras importantes como las restricciones normativas, limitaciones técnicas y la falta de infraestructura especializada. Se analizan casos exitosos en países como Alemania y experiencias incipientes en Colombia, resaltando la necesidad de adaptar estas soluciones a los contextos locales mediante políticas públicas, innovación tecnológica y colaboración intersectorial. El estudio concluye que los drones representan una herramienta complementaria clave para el desarrollo de una logística más eficiente, resiliente y equitativa.

### Palabras Claves

Logística de última milla, drones, entrega de productos sensibles, sostenibilidad, regulación, innovación logística y tecnología emergente.

## **Abstract**

This paper reviews the literature on the use of drones in last-mile logistics, with an emphasis on the delivery of sensitive products such as medicines and fragile items. Based on the analysis of 15 selected studies from 2020 to 2024, the benefits, challenges, and prospects of this emerging technology are identified. The results highlight that drones can improve operational efficiency, reduce delivery times, and expand coverage in remote areas, in addition to contributing to environmental sustainability when used appropriately. However, significant barriers are also evident, such as regulatory restrictions, technical limitations, and a lack of specialized infrastructure. Successful cases in countries such as Germany and emerging experiences in Colombia are analyzed, highlighting the need to adapt these solutions to local contexts through public policies, technological innovation, and cross-sector collaboration. The study concludes that drones represent a key complementary tool for the development of more efficient, resilient, and equitable logistics.

## **Keywords**

Last-mile logistics, drones, sensitive product delivery, sustainability, regulation, logistics innovation, and emerging technology.

## 1. Introducción

Los modelos logísticos han cambiado drásticamente en la última década debido al impacto del crecimiento exponencial del comercio electrónico. Esto ha puesto presión sobre las empresas para hacer el proceso de entrega más eficiente, particularmente en el llamado "última milla" - la etapa final del viaje de los productos para llegar a los consumidores. La logística de última milla plantea un gran desafío y costo debido a su complejidad y, posteriormente, a las implicaciones ambientales (Zhou et al., 2023).

En este sentido, el avance tecnológico ha impulsado la aparición de soluciones alternativas, que incluyen el uso de drones o vehículos aéreos no tripulados (UAV). Su capacidad para sortear el tráfico, llegar a ubicaciones remotas, entregar rápido y a tiempo los convierte en una solución muy real a los problemas de distribución actuales.

Esta característica tiene una relevancia especial en los procesos de transporte de productos frágiles o medicinas cuya manipulación y tiempo de entrega son relevantes. Por lo tanto, son importantes para su efectividad y seguridad (González et al., 2024). La integración de drones en la última milla ha arrojado beneficios en eficiencia operativa, sostenibilidad y reducción de costos. Sin embargo, también confronta muchos obstáculos, como limitaciones técnicas (autonomía, capacidad y rutas de vuelo), clima inclemente, regulaciones restrictivas del espacio aéreo, y problemas de privacidad y seguridad (López & Ramírez, 2025).

Aunque pocos casos y pilotos exitosos han emergido, son solo una colección de casos sin una visión general de cuán factible y logísticamente es considerar drones en este segmento. En este contexto, académicamente, la investigación integra conocimientos en

tecnologías emergentes para la logística, proporcionando una síntesis crítica de la literatura relevante. A nivel práctico, todo esto genera para los profesionales del sector, las empresas de logística y también los responsables políticos, una imagen mucho más clara de lo que la integración de drones en sus operaciones puede y no puede aportar, y puede hacerlo de una manera que ofrecerá logística mucho más eficiente, mucho más segura y, en última instancia, mucho más sostenible.

Se espera que los resultados impulsaren a las empresas, autoridades y operadores logísticos a desplegar soluciones eficientes adaptadas a sus propias necesidades de mercado y muchos se beneficien finalmente de las entregas de última milla.

**Por la presente reconozco que, durante la elaboración de este trabajo académico he empleado una o mas herramientas de inteligencia artificial, para fines de redacción y generación de ideas, tales como ChatGPT, Copilot y Gemini.**

## 2. Objetivos

### 2.1 Objetivo general

Analizar el estado actual de la implementación de drones en la logística de última milla para la entrega de productos sensibles.

## 2.2 Objetivos específicos

- Identificar las prácticas de logística de última milla en el mundo sobre la implementación de drones en productos sensibles.
- Analizar las posibilidades competitivas en el desarrollo de logística de última milla en Colombia.
- Identificar los elementos clave de éxito que podrían implementarse para el desarrollo de la logística de última milla en Colombia.

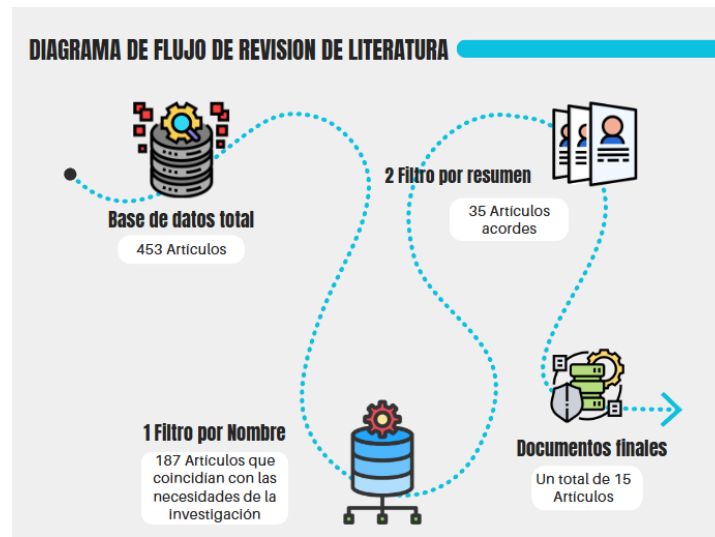
## 3 Metodología

Esta revisión de literatura se enfoca en analizar la viabilidad de implementar drones en la entrega de productos sensibles durante la última milla, con un enfoque particular en los desafíos logísticos y operativos que esto implica. Para ello, se llevó a cabo una búsqueda sistemática en la base de datos Scopus, Google Scholar y ScienceDirect en octubre de 2024, utilizando combinaciones de términos en título, resumen y palabras clave tales como: drones, last mile delivery, packaging, y otras relacionadas. La estrategia de búsqueda se restringió a estudios revisados por pares y actas de conferencias escritas en inglés, publicados entre 2020 y 2024, que abordaran temas vinculados a logística de última milla, sostenibilidad, comercio electrónico, enrutamiento de vehículos, optimización, logística urbana y el uso de vehículos comerciales. Asimismo, se aplicaron filtros específicos de

palabras clave como “Drones”, “Last Mile”, “Last-mile Delivery”, “Vehicle Routing”, “City Logistics”, entre otros, con el fin de garantizar la relevancia del contenido para el análisis propuesto. Se excluyeron investigaciones centradas en aspectos técnicos del diseño de drones o en soluciones como casilleros inteligentes. Además, se complementó la búsqueda con técnicas de bola de nieve hacia adelante y hacia atrás para asegurar la inclusión de los estudios más pertinentes al objetivo de la investigación.

Se identificaron un total de 453 artículos potenciales. En la primera etapa del proceso de selección, se leyeron los títulos de todos los artículos y se excluyeron aquellos que se centraban claramente en el transporte de pasajeros, el diseño técnico o los algoritmos de enrutamiento o que estaban claramente fuera del alcance. Después de revisar los títulos, quedaron 187 artículos. La segunda etapa implicó la lectura de los resúmenes de los artículos. Utilizando los mismos criterios de exclusión mencionados anteriormente, redujimos el número de artículos a 35. En la tercera etapa, leímos esos 35 artículos en su totalidad y finalmente identificamos 15 artículos que cumplían los criterios de inclusión en la revisión. Los resultados de los artículos se analizaron y compararon posteriormente para explorar cómo la posible implementación de drones o casilleros afectan las entregas de última milla e identificar desafíos y oportunidades para su introducción en el país. Lo anterior se puede visualizar mejor en el siguiente diagrama.

**Figura 1 Diagrama de flujo de la revisión de literatura, 2025**



*Nota:* Esta figura muestra el proceso de filtración de artículos para poder llegar a los que se utilizaron en este. Adaptado el 2025 *Diagrama de flujo de la revisión de literatura*, por elaboración propia, 2025

Antes de discutir los resultados de la revisión de la literatura, me gustaría resaltar que las conclusiones obtenidas del estudio deben ser consideradas con precaución debido al número limitado de estudios en los que se basan y, por lo tanto, la generalización de los hallazgos es limitada. Los resultados podrían ser diferentes según el tipo de drones empleados, los productos transportados —ya sean productos delicados o medicamentos en este caso—, y el entorno urbano donde se despliega la entrega de última milla. Además, se utilizó un método cualitativo, lo que permitió una comprensión profunda de los procesos logísticos, los problemas operativos y los comportamientos de los actores involucrados en la implementación de drones para la última milla.

## **4 Revisión de Literatura**

En el contexto del auge del comercio electrónico y de las nuevas necesidades logísticas, ha llevado a una gran atención en la literatura académica y técnica sobre la idea de utilizar drones para la entrega de última milla. Se promueve como un enfoque novedoso para subsanar aquellas áreas que típicamente carecen de disponibilidad de servicios terrestres, por ejemplo, la entrega de productos perecederos que son frágiles, sensibles a la temperatura, al tiempo o a la salud (p. ej., medicamentos, muestras médicas). Sin embargo, su realización enfrenta formidables desafíos técnicos, operativos, regulatorios, económicos y ambientales.

Este documento revisa sistemáticamente la literatura existente sobre la aplicación de drones en la última milla, con el fin de incorporar los beneficios potenciales, desafíos y perspectivas para el desarrollo futuro. Se estudian ocho dimensiones principales que permiten un amplio conocimiento sobre la viabilidad, el impacto y las oportunidades de esta tecnología en escenarios logísticos críticos a través del análisis de las investigaciones recientes.

### **4.1 Problemática del transporte de última milla**

El aumento exponencial de las compras en línea ha alterado fundamentalmente las actitudes de los consumidores respecto a los plazos de entrega y los niveles de servicio. En

este escenario, la entrega de última milla —la etapa final del viaje de un paquete mientras se mueve desde un centro de distribución hasta el cliente— se ha convertido en un área importante de preocupación logística. Esta fase, que sigue a la recolección y empaquetado, es una parte significativa de los costos operativos y está asociada con problemas urbanos como la congestión del tráfico, la contaminación ambiental y la saturación de entidades existentes (Gevaers, Van de Voorde & Vanellander, 2011).

En particular, la entrega de productos que requieren condiciones especiales, como medicamentos, alimentos perecederos o cosas frágiles, es difícil. Además, el transporte de tales productos no solo requiere prontitud, sino también un manejo especial, lo que supone una carga adicional para los actores logísticos. También hay una creciente demanda de entregas en franjas horarias restringidas o en lugares difíciles de alcanzar, como áreas rurales o con baja conectividad vial (Allen et al., 2018).

Esta fusión de factores ha impulsado mucha investigación y el interés de las empresas en enfoques novedosos para implementar ahorros de costos, agilizar operaciones y reducir emisiones, ofreciendo el telón de fondo para la aparición de nuevas soluciones tecnológicas como los drones.

#### **4.2 Innovación en la logística: los drones**

En el transporte, la demanda de soluciones más eficientes para la última milla ha llevado al desarrollo y adopción de tecnologías disruptivas, una de las cuales son los vehículos aéreos no tripulados (UAVs), también conocidos como drones. Estos sistemas

brindan numerosos beneficios en comparación con la distribución convencional, particularmente cuando la infraestructura terrestre está limitada o el tiempo de entrega es crucial.

Los drones logísticos tienen el potencial de superar la congestión urbana y llegar a regiones remotas o afectadas por desastres, lugares donde el transporte terrestre es ineficiente o está bloqueado. Al utilizar rutas aéreas, también acortan los tiempos de entrega, ofreciendo una distribución más directa y oportuna, lo que hace que la cadena de suministro sea más eficiente (Goodchild & Toy, 2018). Estas propiedades son especialmente ventajosas para el transporte de mercancías delicadas, por ejemplo, medicamentos, muestras biológicas o alimentos perecederos, donde la conservación del tiempo y la entrega es esencial.

Desde el punto de vista tecnológico, no solo se trata de sistemas de navegación autónomos, sensores e inteligencia artificial, sino también de capacidades de carga que han hecho que el uso de drones sea tan versátil en ubicaciones logísticas. Su implementación no solo es un paso novedoso en la organización operativa, sino que también es una respuesta a las demandas sociales y ambientales actuales que insisten en soluciones más sostenibles, flexibles y resilientes para la movilidad urbana y rural (Otto et al., 2018).

### **4.3 Aplicaciones actuales y casos de estudio**

Cuando hablamos del sector logístico, ya no es inusual escuchar sobre drones como una realidad en operación en diferentes partes del mundo. Grandes empresas, incluyendo

Amazon, UPS, DHL y Zipline, han realizado pruebas piloto y operaciones en la vida real, impresionando al mundo con el enorme potencial de los drones para revolucionar la entrega de última milla. Estos proyectos no solo demuestran la viabilidad técnica de los UAV, sino también la efectividad de esta tecnología en contextos urbanos, rurales y de emergencia.

Uno de los ejemplos más destacados es Zipline, una empresa que ha desplegado drones para entregar suministros médicos en países como Ruanda y Ghana. Establecida en 2016, Zipline ha completado miles de vuelos, transportando sangre, vacunas y medicamentos críticos a clínicas distantes, reduciendo el tiempo de viaje y mejorando las condiciones de salud pública (Rosser et al., 2018). Esto ha demostrado que incluso en contextos de baja infraestructura, los drones pueden funcionar efectivamente.

En países como los del mundo desarrollado, empresas como Amazon Prime Air han probado dichos sistemas automatizados para la entrega de paquetes ligeros en los suburbios. Aunque los despliegues a gran escala aún están sujetos a regulaciones, las pruebas han ayudado a madurar la tecnología e ilustrar el deseo de la industria logística por tales soluciones (Wang et al., 2020).

Más allá de eso, algunos países de América Latina han comenzado pruebas con drones para entregas urgentes o en áreas remotas, incluyendo Colombia y México. Estos ejemplos muestran cómo esta tecnología puede ajustarse a otros contextos geográficos y socioeconómicos y cómo es globalmente relevante.

#### 4.4 Regulación y limitaciones

Aunque los drones presentan beneficios en la cadena de suministro de última milla, el uso generalizado enfrenta varias limitaciones legales, técnicas y sociales. Uno de los mayores desafíos es la ausencia de organismos regulatorios armonizados, ya que la regulación del espacio aéreo varía significativamente de un país a otro (e incluso entre diferentes partes de la misma nación). Esto complica el uso transfronterizo y constante de drones, lo que limita su capacidad logística (Clothier et al., 2015).

Entre las restricciones regulatorias más relevantes se encuentran un límite de altura y de distancia, el requisito de mantener un contacto visual directo (VLOS) y los requisitos de certificación tanto para el dron como para el operador. Además, numerosos países prohíben el vuelo de drones sobre áreas urbanas pobladas o infraestructuras críticas debido a preocupaciones de privacidad y seguridad (FAA, 2020).

Estos obstáculos se ven agravados por cuestiones como la privacidad, particularmente en escenarios donde los drones pueden contar con cámaras o sistemas de geolocalización que podrían adquirir información sensible sobre personas o el entorno. También existen riesgos operacionales, como el riesgo de colisión, pérdida de control resultante de fallos del sistema o interferencias en la señal GNSS (Ho et al., 2018).

A pesar de que ciertos países han avanzado en el desarrollo de reglas a medida para las operaciones comerciales de drones -aquí pienso en los EE. UU., Japón y algunos países de la Unión Europea-, sigue existiendo un desfase entre el ritmo de evolución tecnológica y el de la regulación. Este es un desafío que requiere una conversación continua entre las autoridades aeronáuticas, las empresas tecnológicas y los operadores logísticos, así como

con los ciudadanos para garantizar que esta nueva forma de hacer negocios sea responsable, segura y sostenible.

#### **4.5 Aspectos técnicos y operativos**

La adopción de drones en la logística de última milla exige el análisis de diversos aspectos técnicos y operativos que determinan su viabilidad y eficiencia. Entre estos factores se encuentran el tipo de dron, su capacidad de carga, autonomía de vuelo, precisión en la navegación, y la infraestructura de soporte necesaria para su funcionamiento.

Estrictamente hablando, los drones empleados para funciones de entrega comercial pueden dividirse aproximadamente en dos categorías: multirrotores y drones de ala fija. Los multirrotores son aún más maniobrables y más fáciles de despegar y aterrizar en lugares estrechos, perfectos para la ciudad. Sin embargo, la autonomía de vuelo y la capacidad de carga de los multirrotores son menores que las de los drones de ala fija, que tienen capacidades de alcance extendido y son más prácticos para usarse en áreas rurales y remotas (Dorling et al., 2017).

También cubre sistemas de navegación autónoma que incluyen GPS asistido por sensores inerciales, visión por computadora y mapas 3D. Estos sistemas permiten enfoques más precisos, evitación de obstáculos y aterrizajes seguros. Además, se necesita software sofisticado para la gestión de flotas, control en tiempo real y optimización de rutas según el clima, el tráfico aéreo u otras limitaciones operativas (Chung et al., 2016).

En términos de operación logística, entre los principales temas se encuentran la facilitación de varios puntos de entrega, la coordinación de tiempos con áreas de almacenamiento e instalaciones de distribución, y la disposición de posiciones de carga y mantenimiento. Además, se necesitan procedimientos de seguridad para evitar incidentes, pérdidas o interrupciones. La vida útil de las baterías y el espacio urbano y ambiental siguen siendo limitaciones operativas críticas.

En conclusión, el uso práctico de drones en la logística no se trata solo del dispositivo en sí, su implementación real es altamente relevante para el sistema logístico existente y su entorno operativo.

#### **4.6 Empaque y protección de productos delicados en entregas con drones**

La entrega de productos delicados, como medicamentos, vacunas, muestras biológicas o dispositivos tecnológicos, exige un diseño cuidadoso del empaque, que garantice la integridad del contenido durante el transporte aéreo en drones. Este es un aspecto técnico importante para evitar que la calidad del producto se vea comprometida por la eficiencia logística.

El empaque utilizado debe ser multifuncional: amortiguar vibraciones, fluctuaciones de temperatura, humedad, impactos y caídas, y al mismo tiempo ser liviano, de modo que no impida la capacidad de carga aérea del dron, que es bastante pequeña. Por ello, se despliegan materiales novedosos (espumas técnicas, geles refrigerantes, bioplásticos

amortiguadores y sensores integrados para registrar, por ejemplo, las condiciones en vuelo) (Matopoulos et al., 2021).

En el caso de medicamentos sensibles a la temperatura, se ha desarrollado el concepto de "cold chain packaging" para drones, que incorpora aislamiento térmico y mecanismos de refrigeración autónoma. Zipline, por ejemplo, utiliza contenedores especializados que conservan productos médicos por varias horas sin pérdida de eficacia, incluso en climas tropicales.

Además, se trabaja en soluciones sostenibles y reutilizables, como empaques retornables con seguimiento GPS o etiquetas inteligentes (RFID) que mejoran el control y la trazabilidad. Estas innovaciones no solo protegen el producto, sino que también agregan valor en términos de sostenibilidad y eficiencia operativa.

#### **4.7 Sostenibilidad y reducción del impacto ambiental**

La creciente preocupación por el cambio climático y la sostenibilidad ha incentivado a las empresas logísticas a buscar alternativas que reduzcan su huella ambiental. En este contexto, los drones emergen como una tecnología potencialmente más sostenible que los vehículos de entrega tradicionales, al menos en determinados escenarios operativos.

Diversos estudios han señalado que los drones, al ser eléctricos, pueden generar menores emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en comparación con vehículos motorizados que utilizan combustibles fósiles. Por ejemplo, Goodchild y Toy (2018)

demonstraron que en trayectos cortos y con cargas livianas, los drones producen menos CO<sub>2</sub> que las camionetas de reparto, especialmente si la energía utilizada para cargarlos proviene de fuentes renovables.

Los drones podrían ayudar a aliviar el tráfico vehicular en las zonas urbanas al trasladar una cantidad significativa de tráfico al aire, además de reducir las emisiones. Esto no solo aumentaría la eficiencia laboral, sino que también mitigaría el ruido y el consumo de combustible durante la última milla (Stolaroff et al., 2018).

Pero también es cierto, como señalan otros, que la durabilidad de los drones no es inevitable, ni es generalmente cierta. Más bien, es el efecto ecológico general de estos instrumentos lo que depende de toda la vida útil del instrumento (producción, mantenimiento, disposición final). Al mismo tiempo, si estás entregando más de un pequeño volumen de paquetes sobre un área modesta, la razón para usar drones para realizar toda la entrega puede no ser suficiente comparada con estrategias de entrega terrestre optimizadas. Según algunos expertos, entonces, deberíamos considerar modelos híbridos de vehículos eléctricos y drones para aprovechar mejor los beneficios ambientales.

En resumen, los drones no son de ninguna manera la solución, sino más bien un dispositivo prometedor en el marco de la logística verde, siempre que se integren al sistema logístico de manera cuidadosa y holística.

#### 4.8 Futuro y tendencias emergentes

Una de las transformaciones más importantes para la última milla en el futuro es la creciente prevalencia de drones en la logística. Las tendencias de los países de la OCDE sugieren la adopción temprana de tecnologías avanzadas y la flexibilización de políticas y modelos de negocio en torno a la experimentación, y la transición hacia una adopción más amplia y madura.

De las predicciones más populares es la dominación visionaria de mecanismos de entrega autónomos equipados con IA mejorada, aprendizaje automático y sensores. Dichos equipos se utilizarán para realizar vuelos más precisos, tomar decisiones basadas en la red durante la operación en presencia de obstáculos y entornos variables, y proporcionar una mayor eficiencia energética (Shakhatreh et al., 2019).

Otros conceptos incluyen infraestructuras urbanas especializadas, como helipuertos autónomos, torres de carga y "carriles digitales" de baja altitud, que impactarían en el entorno construido. Estas plataformas permitirán la incorporación segura de UAVs en el entorno logístico y urbano (específicamente ciudades inteligentes).

También se espera un crecimiento sostenido en el uso de drones fuera del comercio minorista y de la salud en sectores como la agricultura de precisión, donde los drones pueden realizar monitoreo de cultivos y análisis del suelo, y la logística humanitaria, con drones entregando suministros a áreas difíciles de alcanzar o golpeadas por desastres. Son de interés para la vigilancia y protección de infraestructuras críticas como oleoductos, torres y líneas de ferrocarril porque podrían usarse para recopilar datos en tiempo real y conectarse a ubicaciones remotas (Shakhatreh et al., 2019).

Simultáneamente, se están adoptando sistemas logísticos híbridos que combinan drones y vehículos terrestres autónomos para extender la utilización y mejorar la eficiencia de entrega. Estos son entornos donde el dron actúa como un ‘ayudante’ de vehículos o robots de tierra, y realiza entregas en ubicaciones dispersas a medida que el vehículo avanza por una ruta principal, reduciendo los tiempos de espera y el número de visitas repetidas (Murray & Chu, 2015; Chung et al., 2020).

A pesar del potencial, el futuro de los drones dependerá de la aceptación social, la interoperabilidad con otros sistemas logísticos y la resolución de desafíos regulatorios aún pendientes. El compromiso entre innovación, sostenibilidad y seguridad será clave para definir su rol en las cadenas de suministro del futuro.

## **5 Discusión**

### **5.1 Análisis general de la temática**

Los estudios revisados demuestran que el uso de drones en la logística de última milla (especialmente para productos sensibles y productos de salud) es una solución tecnológicamente prometedora con un alto potencial, pero también acompañada de numerosos desafíos entrelazados.

Desde un punto de vista táctico, su principal activo es que puede acortar los tiempos de entrega y alcanzar áreas aisladas, lo cual es particularmente interesante en áreas rurales,

casos de emergencia o cadenas de suministro estratégicas, como en el sector salud. Pero esta ventaja operativa solo puede lograrse si se superan los obstáculos técnicos (monitoreo central de seguridad, captura de datos electrónicos y más), regulatorios (regulación interestatal) y logísticos.

Algunos de los principales inconvenientes de dicha solución residen en la corta autonomía y capacidad de carga de los drones que solo pueden usarse con productos ligeros y viajes de corta distancia. Esto crea la necesidad de infraestructura dedicada, como almacenes intermedios y las preparaciones de planificación y monitoreo en tiempo real. Además, los requisitos de precisión, seguridad y regulación siguen siendo estrictos, lo que dificulta una adopción completa, especialmente en los escenarios de aplicación urbana densa.

La revisión también subraya que, aunque los drones tienen ventajas ambientales sobre los vehículos convencionales, son sostenibles solo en un contexto más amplio: la fuente de energía utilizada, la composición del dron y el material de embalaje, y la eficiencia durante las operaciones de la cadena.

En esta etapa, el diseño de embalajes dedicados es de particular interés: en el contexto de medicamentos sensibles a la temperatura que se mueven, la protección del producto y la minimización del peso están impulsando la distinción entre un servicio claramente realizable o una pálida imagen de uno.

Asimismo, hay consenso en que el futuro de esta tecnología está vinculado a su capacidad de integrarse con otros modos de transporte y sistemas logísticos inteligentes, más que a su uso aislado. En este sentido, se proyecta una evolución hacia modelos híbridos y colaborativos, que combinan drones con vehículos autónomos terrestres o almacenes automatizados, creando cadenas de suministro más flexibles y resilientes.

Finalmente, si bien las experiencias de empresas pioneras (como Zipline o Amazon Prime Air) muestran resultados prometedores, todavía es necesario realizar más estudios empíricos en contextos diversos, especialmente en América Latina, donde las condiciones de infraestructura, normativas y necesidades logísticas difieren de los países desarrollados. Esto sugiere la importancia de investigaciones aplicadas, así como la colaboración entre gobiernos, academia y sector privado para adaptar la tecnología a los contextos locales.

## **5.2 Comparación entre Alemania y Colombia**

Los estudios revisados muestran que el uso de drones para entregas en la última milla tiene un gran potencial para transformar la logística urbana y rural, especialmente en sectores sensibles como el de la salud. Sin embargo, su implementación está sujeta a factores técnicos, normativos, geográficos y socioeconómicos que varían entre países. En este sentido, una comparación entre Colombia y Alemania permite identificar diferencias clave que explican el grado de avance y las barreras presentes en ambos contextos.

Alemania se encuentra entre los países con mayor avance en la adopción de tecnologías logísticas de vanguardia. El país cuenta con una infraestructura robusta, altos niveles de digitalización y un marco regulatorio que, aunque estricto, ha empezado a flexibilizarse para permitir pruebas piloto con drones. Empresas como DHL han realizado pruebas exitosas con su programa Parcelcopter, entregando medicamentos y paquetes en zonas rurales e insulares bajo condiciones controladas (InMotion, 2017). Además,

Alemania se beneficia de políticas activas de innovación y sostenibilidad, así como de un entorno académico y empresarial favorable para el desarrollo de tecnologías autónomas.

Por el contrario, Colombia presenta un contexto más desafiante. Aunque el país tiene zonas rurales donde los drones serían sumamente útiles —por ejemplo, en regiones con escasa infraestructura vial o afectadas por el conflicto armado—, la implementación enfrenta barreras importantes. Entre ellas, destacan las limitaciones normativas impuestas por la Aeronáutica Civil, que restringen el vuelo más allá de la línea de visión (VLOS), el sobrevuelo de zonas pobladas y el transporte de mercancías sin certificación específica. Además, existen limitaciones en conectividad, inversión tecnológica y capacidad operativa de las empresas logísticas, particularmente en regiones alejadas de los centros urbanos.

Desde el punto de vista del producto transportado, Alemania ha podido desarrollar sistemas de empaque avanzados que permiten la entrega segura de productos médicos, integrando sensores, aislamiento térmico y trazabilidad. En Colombia, si bien hay iniciativas académicas y empresariales emergentes, el diseño especializado de empaques aún se encuentra en fases tempranas y suele depender de tecnología importada o de alto costo, lo que limita su adopción en programas piloto nacionales.

Ambos países comparten el reto de equilibrar innovación y seguridad, pero difieren en cuanto a capacidad institucional, recursos tecnológicos y madurez normativa. Mientras que Alemania avanza hacia una logística integrada y sostenible con drones, Colombia requiere una estrategia más articulada entre el sector público, privado y académico, que incluya incentivos a la innovación, formación técnica y ajustes regulatorios adaptados a su realidad geográfica y social.

Este contraste sirve para ilustrar que la receta para adoptar los drones no se refiere solo a la tecnología, sino a un ecosistema que también comprende reglas claras,

infraestructura adecuada, la capacidad de hacer negocios con ellos e interés político. Para hacer que los drones funcionen para una logística más equitativa y eficiente, se deben aprender lecciones de contextos desarrollados y adaptarlas para que coincidan con las realidades locales.

## 6 Conclusiones

El presente trabajo está en concordancia con la literatura existente en que el despliegue de drones para entregas de última milla, en particular para la entrega de bienes sensibles como suministros médicos o medicina, está emergiendo como una solución logística novedosa con un potencial significativo para aumentar la eficiencia y, por ende, la cobertura y sostenibilidad de la entrega en el sector del transporte. La capacidad de estas aeronaves no tripuladas para sortear las congestiones de tráfico, acortar tiempos de entrega y alcanzar ubicaciones de difícil acceso constituye una respuesta clara a algunos problemas estructurales en el sistema logístico, en particular en contextos de baja infraestructura o durante crisis sanitarias.

Los resultados muestran que los efectos de la tecnología incluyen nuevas cualidades de servicio, reducción de emisiones contaminantes y una transformación del sistema desde la cadena de suministro tradicional. La definición de soluciones de embalaje técnico dedicadas. Además, los kits de embalaje técnico a medida pueden permitir el transporte aéreo para satisfacer las necesidades específicas de productos sensibles, como el

mantenimiento de la temperatura, señales de choque y vibración, y la trazabilidad en tiempo real adecuada.

Pero la revisión también destaca diversos obstáculos que todavía impiden que los drones sean utilizados ampliamente en la industria logística comercial. Estos incluyen limitaciones técnicas (autonomía, carga útil, dureza ambiental, etc.), las barreras regulatorias presentes en la mayoría de los lugares y la ausencia de una infraestructura de AAV (vehículos aéreos automatizados) similar a la infraestructura de UAM (movilidad aérea urbana). Estas barreras sistémicas demandan soluciones sistémicas, que podrían incluir políticas públicas innovadoras, desarrollo de capacidades técnicas y colaboraciones multisectoriales.

El contraste entre países como Alemania y Colombia muestra que el grado de adopción de la tecnología está vinculado al clima regulatorio, el gasto en innovación y el desarrollo de actores logísticos. Aunque ha habido ensayos exitosos en áreas rurales en Alemania bajo una regulación flexible y con un fuerte respaldo institucional, la vida no es tan fácil en Colombia, donde los desafíos legales, económicos y operativos juntos están impidiendo un despliegue escalable fluido de estas soluciones a pesar de la necesidad urgente de proporcionar mejor logística a lugares de difícil acceso.

Desde el punto de vista de la sostenibilidad, los datos indican que los drones pueden representar una opción más amigable con el medio ambiente en comparación con los vehículos tradicionales en casos específicos de uso, con el uso de fuentes de energía limpia y embalajes inteligentes. Los enfoques híbridos, que equilibran beneficios óptimos con una carga ambiental mínima, son soluciones alternativas que pueden combinar drones con vehículos eléctricos o sistemas logísticos urbanos.

Finalmente, el consenso en la literatura es que los drones no deben ser tratados como un sustituto completo del transporte tradicional, sino como una herramienta complementaria y estratégica desplegada como parte de una solución más amplia, una que es particularmente valiosa donde la velocidad, accesibilidad y precisión son esenciales. Para asegurar una integración efectiva, se debe avanzar hacia la armonización de regulaciones, soluciones de embalaje adaptadas y la generación de evidencia local para demostrar su beneficio en condiciones reales y específicas de cada territorio.

La consolidación de esta tecnología en la última milla dependerá de que países y organizaciones adopten características de tecnología avanzada global a sus niveles locales, fomenten marcos regulatorios flexibles y cultiven una logística no solo enfocada en la eficiencia, sino también en la equidad, sostenibilidad y resiliencia.

## 7 Bibliografía

- Aljohani, K. (2024). The Role of Last-Mile Delivery Quality and Satisfaction in Online Retail Experience: An Empirical analysis. *Sustainability*, 16(11), 4743. <https://doi.org/10.3390/su16114743>
- Allen, J., Piecyk, M., Piotrowska, M., McLeod, F., & Cherrett, T. (2018). Understanding the impact of e-commerce on last-mile light goods vehicle activity in urban areas: The case of London. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 61, 325–338. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.07.020>
- Boysen, N., Fedtke, S., & Sandau, A. (2021). Last-mile delivery concepts: A survey from an operational research perspective. *OR Spectrum*, 43(1), 1–58. <https://doi.org/10.1007/s00291-020-00607-7>

- Chung, S. H., Sah, B., Lee, J., & Lee, Y. H. (2020). Optimization for drone and vehicle routing problems in last-mile delivery. *Computers & Industrial Engineering*, 147, 106584. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106584>
- Chung, S. H., Sah, B., Lee, J., Pearn, W. L., & Lee, Y. H. (2016). Drone delivery systems for healthcare: A case study of blood supply delivery. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 68, 34–47.
- Clothier, R. A., Greer, D. A., Greer, D. G., & Mehta, A. M. (2015). Risk perception and the public acceptance of drones. *Risk Analysis*, 35(6), 1167–1183. <https://doi.org/10.1111/risa.12330>
- Dorling, K., Heinrichs, J., Messier, G. G., & Magierowski, S. (2017). Vehicle routing problems for drone delivery. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 47(1), 70–85. <https://doi.org/10.1109/TSMC.2016.2582745>
- Drones. (s. f.). [https://www.mdpi.com/journal/drones/special\\_issues/medicine](https://www.mdpi.com/journal/drones/special_issues/medicine)
- FAA (Federal Aviation Administration). (2020). *Unmanned Aircraft Systems (UAS) Regulations & Policies*. <https://www.faa.gov/uas>
- Fuerza aérea colombiana. (2022). RACAE 94 reglas de vuelo y operación para sistemas aéreos no tripulados y sistemas de aeronaves remotamente pilotadas. en *república de Colombia autoridad aeronáutica aviación de estado Fuerza aérea colombiana*. [https://aaaes.fac.mil.co/sites/aaaes/files/AAAES/documentos/normatividad2022/racae/rac\\_94.pdf](https://aaaes.fac.mil.co/sites/aaaes/files/AAAES/documentos/normatividad2022/racae/rac_94.pdf)
- Gevaers, R., Van de Voorde, E., & Vanelslander, T. (2011). Characteristics and typology of last-mile logistics from an innovation perspective in an urban context. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 125, 398–411. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.01.1483>
- Goodchild, A., & Toy, J. (2018). Delivery by drone: An evaluation of unmanned aerial vehicle technology in reducing CO<sub>2</sub> emissions in the delivery service industry. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 61, 58–67. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.02.017>
- Ho, C. I., Hsu, Y. H., & Wang, C. Y. (2018). Regulatory challenges of integrating drones into the transport system: A case study of Taiwan. *Technological Forecasting and Social Change*, 132, 280–289. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2018.02.017>

- InMotion, D. (2017, 2 octobre). Successful trial integration of DHL Parcelcopter into logistics chain. *DHL InMotion*. <https://inmotion.dhl/en/dr1/article/successful-trial-integration-of-dhl-parcelcopter-into-logistics-chain>
- Matopoulos, A., Papadopoulou, T., & Manikas, I. (2021). Logistics service innovation through drone technology: Development and testing of a parcel drone box. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 51(9), 869–887. <https://doi.org/10.1108/IJPDLM-06-2020-0192>
- Murray, C. C., & Chu, A. G. (2015). The flying sidekick traveling salesman problem: Optimization of drone-assisted parcel delivery. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 54, 86–109. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2015.03.005>
- Otto, A., Agatz, N., Campbell, J., Golden, B., & Pesch, E. (2018). Optimization approaches for civil applications of unmanned aerial vehicles (UAVs) or aerial drones: A survey. *Networks*, 72(4), 411–458. <https://doi.org/10.1002/net.21818>
- Rosser, J. C., Vignesh, V., Terwilliger, B. A., & Parker, B. C. (2018). Surgical and medical applications of drones: A comprehensive review. *JSLs: Journal of the Society of Laparoscopic & Robotic Surgeons*, 22(3), e2018.00018. <https://doi.org/10.4293/JSLs.2018.00018>
- Shakhatreh, H., Sawalmeh, A., Al-Fuqaha, A., Dou, Z., Almaita, E., Khalil, I., ... & Guizani, M. (2019). Unmanned aerial vehicles (UAVs): A survey on civil applications and key research challenges. *IEEE Access*, 7, 48572–48634. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2909530>
- Stolaroff, J. K., Samaras, C., O'Neill, E. R., Lubers, A., Mitchell, A. S., & Ceperley, D. (2018). Energy use and life cycle greenhouse gas emissions of drones for commercial package delivery. *Nature Communications*, 9(1), 409. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02411-5>
- Wang, X., Han, J., Wu, Q., & Wang, W. (2020). Research on the path optimization of UAV logistics distribution based on improved A-star algorithm. *IEEE Access*, 8, 133517–133526. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3009880>