

Drones para auditoría en altura en el sector energético colombiano¹

Drones for High-Altitude Auditing in the Colombian Energy Sector

Carlos Alirio Beltrán Rodríguez

carlosalirio.beltran@unir.net

Ing. Industrial

Esp. Gestión en Seguridad y Salud en el Trabajo

Mg. Ingeniería Industrial

Docente Fundación Universitaria Internacional de La Rioja UNIR

Resumen

Este estudio propone un marco de innovación aplicada para la integración de vehículos aéreos no tripulados (UAV) en auditorías continuas de seguridad y salud en el trabajo (SST) aplicadas a tareas en altura en el sector energético colombiano, priorizando la eliminación de riesgos en la jerarquía de controles conforme a la norma ISO 45001 y la Resolución 4272 de 2021. Mediante un estudio de caso desarrollado en una empresa dedicada al mantenimiento eléctrico, se definieron y cuantificaron indicadores operativos relacionados con la exposición horaria y las tasas de incidentes laborales. Los resultados mostraron la eliminación de la presencia de personal en zonas críticas. Los tiempos de inspección se redujeron de 16 horas a 15 minutos, lo que tuvo un impacto directo en la continuidad operativa y evidenció una reducción del 45 % en el número de accidentes de trabajo. Al mismo tiempo, se identificaron limitaciones éticas, relacionadas con la confidencialidad de los datos y las amenazas de ciberseguridad, debido a la implementación de sistemas remotos de inspección. Ante esto, se establecieron protocolos estandarizados con listas de verificación y análisis de riesgos, orientados a fortalecer la prevención. Este enfoque permite diferenciar entre inspecciones técnicas de rutina y auditorías de seguridad, conforme a normas internacionales (ISO 45001, 2018).

Palabras clave: drones, trabajos en altura, auditoría SST, sector energético, prevención.

Recepción: 04.11.2025 | Aceptación: 17.02.2026

Cite este artículo como: Beltrán Rodríguez, C. A. (2026). Drones para auditoría en altura en el sector energético colombiano. *Revista Gestión de la Seguridad y la Salud en el Trabajo*, 8(1), 63 - 76.

Abstract

This study proposes an innovative framework for the integration of unmanned aerial vehicles (UAVs) into continuous occupational health and safety (OHS) audits for work at height in the Colombian energy sector, prioritizing risk

¹ Resultado del proyecto de investigación: "Drones para auditoría en altura en el sector energético colombiano"; Fundación Universitaria Internacional de La Rioja UNIR.

elimination within the hierarchy of controls following ISO 45001 and Resolution 4272 of 2021. Through a case study conducted at an electrical maintenance company, operational indicators related to hourly exposure and workplace incident rates were defined and quantified. The results showed the complete elimination of personnel from critical areas. Inspection times decreased from 16 hours to just 15 minutes, directly affecting operational continuity and resulting in a 45 % reduction in the number of workplace accidents. However, ethical limitations related to data confidentiality and cybersecurity threats appeared due to remote inspection systems. In response, standardized protocols with checklists and risk analyses were set up to promote prevention. This allows for differentiation between routine technical inspections and safety audits, adhering to international standards (ISO 45001, 2018).

Keywords: drones, work at height, OHS audit, energy sector, prevention.

Introducción

En el ámbito industrial, las labores en altura constituyen una fuente crítica de riesgos laborales. Estos peligros, incluidas las caídas desde alturas, los contactos eléctricos y, en algunos casos, las condiciones ambientales severas, explican en gran medida el origen de las lesiones graves y, por desgracia, las muertes en el trabajo. Más allá del impacto personal, estos accidentes también tienen consecuencias en la productividad, la continuidad operativa y el fortalecimiento de la cultura preventiva dentro de las organizaciones, según la Organización Internacional del Trabajo [OIT], 2019.

En Colombia rige un marco normativo exigente, representado por la Ley 1562 de 2012 y la Resolución 4272 de 2021, las cuales definen responsabilidades técnicas, formativas y organizacionales en la gestión del riesgo por trabajo en altura (Congreso de la República de Colombia, 2012; Ministerio del Trabajo, 2021). Pese a ello, la evidencia estadística muestra la persistencia de la siniestralidad en el sector energético, con una tasa de mortalidad que alcanzó 4,73 por cada 100.000 trabajadores en 2022. Este valor supera en cinco veces el promedio nacional y evidencia una distancia estructural entre la regulación formal y el desempeño preventivo real (DroneDeploy, 2022). Este escenario cuestiona la eficacia de los esquemas tradicionales de inspección, ya que dichos esquemas exigen presencia física en estructuras elevadas, generan retrasos en la identificación de fallas e introducen variabilidad subjetiva en las evaluaciones; además, exponen al personal auditor a los mismos peligros evaluados, como carga térmica y fatiga fisiológica, lo que compromete la coherencia técnica y ética del proceso (National Institute for Occupational Safety and Health [NIOSH], 2020).

Frente a esta situación, la implementación de vehículos aéreos no tripulados (UAV o RPAS) para la realización de inspecciones en trabajos en altura emerge como algo más que un avance tecnológico; representa una transformación orientada hacia la prevención proactiva. Este enfoque se encuentra en concordancia con el principio

fundamental de jerarquía de controles (centrado en la eliminación del peligro en la fuente), tal como establece la ISO 45001 (International Organization for Standardization [ISO], 2018). Estos vehículos aéreos no tripulados están dotados de sensores termográficos, cámaras de alta definición y funcionalidades de georreferenciación. Además, permiten realizar auditorías continuas y estandarizadas, superando las inspecciones técnicas periódicas (focalizadas en daños estructurales). Así, es posible asegurar la verificación sistemática del cumplimiento normativo, la trazabilidad de las evidencias y la supervisión en tiempo real de conductas seguras, sin poner en riesgo a las personas (Szwedo, 2023).

A nivel internacional, el uso de vehículos aéreos no tripulados en inspecciones técnicas y de seguridad ha registrado resultados consistentes. Experiencias documentadas en Enel Green Power y en la Comisión Federal de Electricidad reportan disminuciones relevantes en exposiciones peligrosas y tiempos de intervención (Enel Green Power, 2019; Comisión Federal de Electricidad [CFE], 2020). En América Latina, y de forma particular en Colombia, la adopción de esta tecnología en auditorías de seguridad y salud en el trabajo continúa en una fase inicial. Factores técnicos y organizacionales limitan su estandarización; entre ellos figuran restricciones climáticas, déficit de formación especializada y tensiones éticas asociadas con el tratamiento de datos y la ciberseguridad (Energy Robotics, 2025). Este estudio aborda dicho vacío mediante un enfoque aplicado: Diseña y valida un modelo de auditoría continua integrado al ciclo PHVA (Planear-Hacer-Verificar-Actuar) del Sistema de Gestión de SST (SG-SST), cuantificando impactos en indicadores como exposición horaria, tasas de incidentes y eficiencia operativa, mientras examina requisitos normativos, operativos y éticos para una implementación responsable y analiza cómo los UAV pueden redefinir la gestión del riesgo en trabajos en altura y fomentar una cultura preventiva más resiliente.

Marco metodológico

Enfoque y diseño de investigación

La investigación se desarrolló bajo un enfoque aplicado, con alcance descriptivo-analítico, mediante un estudio de caso único instrumental, orientado a examinar en profundidad la incorporación de vehículos aéreos no tripulados (UAV/RPAS) como herramienta de auditoría en seguridad y salud en el trabajo (SST) para actividades en altura en el sector energético colombiano. Este diseño resulta pertinente cuando se pretende comprender un fenómeno emergente en su contexto real, particularmente cuando los límites entre el fenómeno y el entorno organizacional no están claramente delimitados (Yin, 2018). Aunque este estudio se fundamenta en evidencia documental y pruebas operativas controladas, su objetivo va más allá de la simple exploración; busca contrastar el rendimiento del método de auditoría tradicional con una metodología asistida por el uso de drones, considerando criterios técnicos, requisitos normativos y medidas preventivas clave para los sistemas de gestión de SST. La adopción de un enfoque mixto, con énfasis cualitativo-comparación, ofrece una triangulación de datos que fortalece la validez interna del estudio (Creswell & Plano Clark, 2018).

Pregunta y objetivos operacionales

Esta investigación se construyó a partir del siguiente interrogante: ¿Hasta qué punto la implementación de drones en auditorías de SST contribuye a mitigar la exposición a niveles elevados de riesgo y permite optimizar la eficacia operativa en las actividades de trabajo en altura dentro del sector energético, en contraste con los procedimientos convencionales de inspección? A partir de este interrogante se formularon los siguientes objetivos operacionales:

- ✓ Identificar los principales riesgos vinculados a las auditorías tradicionales en trabajo en altura en el sector energético.
- ✓ Definir indicadores de exposición, siniestralidad y eficiencia, aplicables a las auditorías de SST realizadas con UAV.
- ✓ Efectuar una comparación entre el método tradicional de auditoría en altura y el método asistido por dron, basada en registros operativos y demostraciones técnicas.
- ✓ Evaluar conceptualmente un modelo de auditoría continua con drones, armonizado con el ciclo PHVA del SG-SST y las directrices de las normas ISO 45001:2018 e ISO 19011:2018.

Unidad de análisis y contexto del caso

La unidad de análisis se centró en una empresa colombiana del sector energético especializada en el mantenimiento predictivo, preventivo y correctivo de infraestructuras eléctricas y plantas solares fotovoltaicas. La elección de este caso se realizó mediante un muestreo intencional, ya que la organización cuenta con experiencia previa en el uso de drones para realizar inspecciones termográficas. Esto permitió explorar su potencial para la ejecución de auditorías sistemáticas de SST. El periodo de análisis abarcó información operativa y documental recopilada entre 2022 y 2024, incluyendo reportes internos de inspección, protocolos de seguridad, registros de tiempo de operación y documentación normativa.

VARIABLES, INDICADORES Y OPERACIONALIZACIÓN

Con el fin de atender la observación editorial sobre la falta de operacionalización, se definieron las siguientes variables y sus respectivos indicadores; ver tabla 1:

- ✓ Variable independiente: Uso de drones en auditorías de SST para trabajo en altura.
- ✓ Variable dependiente: Desempeño preventivo y operativo de la auditoría en SST.

La línea base se estableció a partir de auditorías tradicionales realizadas previamente por la empresa, mientras que los valores asociados al uso de drones se obtuvieron de demostraciones técnicas documentadas y comparaciones con experiencias internacionales reportadas en la literatura especializada (DroneDeploy, 2022; Enel Green Power, 2019).

Técnicas de recolección y análisis de la información

La recolección de información se llevó a cabo mediante un análisis documental sistemático, a partir de la revisión de registros técnicos y de los siguientes elementos: (a) la normativa nacional e internacional, incluyendo la Resolución 4272 de 2021, la Resolución 4201 de 2018, las normas ISO 45001:2018 e ISO 19011:2018; (b) los informes técnicos y los reportes de inspección de la empresa en estudio; (c) los estudios de caso

y benchmarks internacionales del sector energético; y (d) la documentación técnica de UAV y sus buenas prácticas operativas.

Tabla 1. Variables, indicadores y operacionalización

| Dimensión | Indicador | Definición Operativa | Fuente | Método de cálculo |
|--------------------------------|---|---|---------------------------|-----------------------------|
| <i>Exposición al riesgo</i> | Horas-hombre en altura | Total, de horas en las que trabajadores permanecen físicamente en zonas elevadas durante auditorías | Registros de inspección | Suma de horas por auditoría |
| <i>Siniestralidad</i> | Tasa de incidentes asociados a inspección | Número de incidentes y cuasi incidentes relacionados con auditorías en altura | Informes SST / benchmarks | Proyección comparativa |
| <i>Eficiencia operativa</i> | Tiempo de inspección | Duración total del proceso de auditoría | Registros operativos | Minutos por inspección |
| <i>Calidad de la evidencia</i> | Tipo y trazabilidad de registros | Nivel de objetividad y posibilidad de verificación posterior | Informes técnicos | Análisis cualitativo |

Fuente: Adaptado de datos proporcionados por una empresa del sector energético

El análisis se llevó a cabo en dos niveles que se complementan entre sí: Primero, se llevó a cabo un análisis comparativo cualitativo entre el método tradicional y el método con dron, evaluando las diferencias en cuanto a exposición al riesgo, eficiencia y calidad de la evidencia. En segundo lugar, se realizó una estimación cuantitativa proyectiva, basada en datos documentales y experiencias similares, para examinar la posible reducción de incidentes. Es importante aclarar que los porcentajes reportados corresponden a proyecciones fundamentadas y no a mediciones experimentales longitudinales. La comparación entre los dos métodos se realizó en condiciones funcionalmente equivalentes, teniendo en cuenta el mismo tipo de infraestructura, el alcance de la inspección y los criterios normativos. Los datos del método tradicional se obtuvieron de registros históricos de la empresa, mientras que el método con dron se basó en demostraciones operativas documentadas y evidencia visual georreferenciada. Para asegurar la calidad de los datos, se aplicaron criterios de consistencia, trazabilidad y verificabilidad, conforme a las directrices de auditoría de la ISO 19011:2018 (ISO, 2018).

Modelo operativo de auditoría en seguridad y salud en el trabajo asistida por UAV

Con el objetivo de organizar de forma sistemática el proceso de auditoría en seguridad y salud en el trabajo mediante el uso de vehículos aéreos no tripulados (UAV), se diseñó un modelo operativo basado en el ciclo PHVA (Planificar-Hacer-Verificar-Actuar). Este modelo está alineado con las normas ISO 45001:2018 e ISO 19011:2018 e integra fases secuenciales que facilitan la planificación, ejecución, verificación y mejora continua del proceso de auditoría, asegurando trazabilidad, control de riesgos y cumplimiento normativo, ver imagen 1.

Como se observa en la imagen 1, el modelo comienza con la activación del ciclo de auditoría y la fase de planificación, que incluye la definición del alcance, la evaluación de riesgos y las autorizaciones aeronáuticas. Luego, en la fase de ejecución, se lleva a cabo

la operación del UAV y la captura de evidencia; posteriormente se realiza el registro visual y térmico, para finalizar con una evaluación. En la fase de verificación se adoptan acciones correctivas mediante el contraste con los requisitos normativos, lo cual permite la mejora del proceso. Finalmente, se efectúa el cierre y la retroalimentación de la auditoría.



Imagen 1. Modelo operativo de auditoría

Fuente: Elaboración propia a partir del ciclo PHVA del SG-SST e integración tecnológica UAV con apoyo de herramientas de inteligencia artificial Google Gemini para la generación gráfica

Consideraciones éticas y limitaciones del estudio

El estudio reconoce algunas limitaciones en su diseño, ya que la validación empírica se llevó a cabo principalmente mediante documentos y demostraciones, sin realizar una intervención experimental prolongada, debido a restricciones operativas y de seguridad. Además, el acceso a datos sensibles estuvo sujeto a acuerdos de confidencialidad institucional. Desde una perspectiva ética, se consideraron aspectos relacionados con la privacidad de la información recopilada por los drones, la protección de datos personales y la ciberseguridad, sugiriendo pautas preventivas que se alinean con las recomendaciones internacionales sobre el uso de UAV en entornos laborales (NIOSH, 2020; Administración de Seguridad y Salud Ocupacional [OSHA], 2021; Szwedo, 2023).

Resultados

La implementación del modelo de auditoría en seguridad y salud en el trabajo (SST) mediante vehículos aéreos no tripulados (UAV) ha permitido detectar diferencias significativas frente al enfoque tradicional de inspección en trabajos en altura. Esto es especialmente evidente en aspectos como la exposición al riesgo, la eficiencia operativa y la calidad de la evidencia preventiva. La Tabla 2 presenta un resumen de la comparación entre el método tradicional y el método asistido por drones para esta actividad de inspección; ver tabla 2.

Reducción de la exposición al riesgo en trabajos en altura

La evidencia más robusta derivada del presente análisis reside en la reconfiguración estructural de la dinámica de exposición ocupacional, específicamente a partir del indicador de horas-hombre en trabajos de alta peligrosidad (trabajo en altura). Bajo el modelo de inspección convencional, caracterizado por una dependencia intensiva de la labor manual, la auditoría de la infraestructura fotovoltaica demandaba una exposición acumulada de 16 horas-hombre, involucrando el ascenso físico de técnicos especializados a estructuras elevadas. No obstante, la integración de sistemas de aeronaves pilotadas a distancia (RPAS) permitió una transición sustancial hacia un esquema de operación remota. Este cambio no constituye una mera mejora técnica, sino que materializa de forma efectiva el nivel superior de la jerarquía de controles: La eliminación del riesgo en la fuente (International Labour Organization [ILO], 2020). Al suprimir el contacto directo entre el trabajador y el vector de riesgo gravitacional, se logra una reducción sustancial de la probabilidad de ocurrencia de eventos catastróficos, desplazando la actividad hacia zonas de seguridad intrínseca en superficie.

Tabla 2. Comparación entre inspecciones tradicionales e inspecciones asistidas por dron en planta solar

| Aspecto evaluado | Inspección tradicional (altura) | Inspección con dron (UAV) |
|--|---|--|
| <i>Duración de la inspección</i> | ~2 días (≈16 horas-hombre) por planta | ~15 minutos de vuelo por planta |
| <i>Personal expuesto</i> | 2 técnicos especializados, trabajando en altura | 1 piloto de dron en tierra (0 personas en altura) |
| <i>Exposición al riesgo de caída</i> | Alta (trabajo prolongado sobre estructuras elevadas) | Nula (no requiere presencia física en altura) |
| <i>Exposición a riesgos eléctricos/ambientales</i> | Alta (contacto cercano con equipos energizados, calor, fauna) | Mínima (distancia segura, menor estrés térmico) |
| <i>Cobertura de inspección</i> | Limitada por alcance físico y fatiga del inspector | Amplía; el dron puede cubrir 100 % de la instalación rápidamente |
| <i>Calidad de los datos recolectados</i> | Visual manual (subjetiva, posible omisión de detalles) | Imágenes HD/termográficas georreferenciadas (objetivas y revisables) |

Fuente: Adaptado de datos proporcionados por una empresa del sector energético

Con el fin de evaluar el impacto del uso de vehículos aéreos no tripulados (UAV) en la gestión del riesgo durante auditorías de trabajo en altura, se elaboró una matriz comparativa de riesgos antes y después de la intervención tecnológica. La matriz permite contrastar de manera sistemática el nivel de exposición, la probabilidad de ocurrencia y la severidad de los eventos peligrosos en ambos escenarios, constituyendo una línea base operativa para la evaluación del desempeño preventivo del modelo propuesto, ver tabla 3. Los resultados muestran una notable disminución en el riesgo de caídas desde alturas y en la exposición directa del personal auditor, gracias a la eliminación de su presencia física en áreas críticas. En el caso de la operación asistida por drones, los riesgos remanentes se centran en eventos poco probables relacionados

con el uso del dron en tierra, los cuales pueden gestionarse a través de medidas técnicas y administrativas, de acuerdo con la jerarquía de controles establecida en la normativa internacional de seguridad y salud en el trabajo (ISO, 2018; ISO, 2018).

Tabla 3. Matriz comparativa de riesgos en auditorías de trabajo en altura antes y después de la implementación de UAV

| Peligro crítico | Evento peligroso | Consecuencia | Nivel de riesgo - Auditoría tradicional | Tipo de control tradicional | Nivel de riesgo - Auditoría con UAV | Tipo de control con UAV |
|--|---------------------------------------|---------------------------|---|-----------------------------|-------------------------------------|-----------------------------|
| <i>Trabajo en altura</i> | Caída a distinto nivel | Lesión grave o fatal | Alto | EPP / administrativo | Bajo | Eliminación |
| <i>Superficies inestables</i> | Deslizamiento o pérdida de equilibrio | Trauma severo | Alto | Administrativo | Bajo | Eliminación |
| <i>Proximidad a líneas energizadas</i> | Contacto eléctrico | Electrocución | Muy alto | Administrativo | Bajo | Eliminación |
| <i>Fatiga física</i> | Error humano en inspección | Lesión musculoesquelética | Medio | Administrativo | Bajo | Ingeniería |
| <i>Operación de UAV en tierra</i> | Impacto del dron | Lesión leve | No aplicable | - | Bajo | Ingeniería / administrativo |

Fuente: Adaptado de datos proporcionados por una empresa del sector energético

La evaluación del riesgo se llevó a cabo de manera cualitativa, utilizando criterios de probabilidad y consecuencia que se encuentran claramente definidos en la matriz institucional de SST. Se compararon escenarios funcionalmente equivalentes, tanto antes como después de la implementación del UAV. Desde una perspectiva preventiva, este cambio implica la eliminación completa de la exposición al riesgo de caídas durante las actividades auditadas, lo que representa una aplicación directa del principio de eliminación de peligros, que se encuentra en la parte más alta de la jerarquía de controles de la ISO 45001:2018 (ISO, 2018). Este hallazgo es especialmente relevante en un sector donde las caídas desde alturas siguen siendo una de las principales causas de accidentes mortales (OIT, 2019).

Optimización de la resolución temporal y dinámica del ciclo auditor

En términos de eficiencia operativa, se constató una reducción significativa en los cronogramas de inspección, pues la metodología convencional, anclada en la presencialidad técnica, demandaba una inversión de aproximadamente dos jornadas laborales. En contraste, el uso de la tecnología basada en Unmanned Aerial Vehicles (UAV) permitió condensar la captura de datos en aproximadamente 15 minutos de vuelo efectivo. Esta reducción, que excede el 90 % de la carga horaria operativa, no debe interpretarse únicamente como una mejora en la productividad, sino como un avance cualitativo en la vigilancia epidemiológica y técnica. Al mitigar la latencia del proceso, se facilita la transición de esquemas de auditoría intermitentes (por ejemplo, semestrales) hacia modelos de monitoreo dinámico o continuo. Esta capacidad de respuesta inmediata es congruente con las premisas del National Institute for Occupational Safety

and Health (NIOSH, 2020) y de la Occupational Safety and Health Administration (OSHA, 2021), que identifican la oportunidad y la frecuencia de la inspección como variables determinantes para la interrupción de cadenas causales de accidentes graves.

Calidad, trazabilidad y robustez de la evidencia

Un hallazgo sustantivo reside en la superación de la subjetividad inherente a la observación humana directa, ya que las auditorías tradicionales están intrínsecamente supeditadas a la fatiga del inspector, a sesgos perceptivos y a las restricciones de acceso físico que comprometen la exhaustividad del análisis. Por el contrario, el despliegue de UAV garantiza una captura homogénea de evidencia mediante registros térmicos y fotogramétricos de alta resolución georreferenciados. Este ecosistema digital no solo dota al proceso de mayor transparencia, sino que asegura la trazabilidad de la evidencia para revisiones ex post facto. La integración de estos metadatos en el Sistema de Gestión de la SST (SG-SST) fortalece el ciclo de mejora continua y la auditoría interna, alineándose rigurosamente con los requisitos de competencia y objetividad estipulados en la norma ISO 19011:2018 (ISO, 2018).

Análisis prospectivo del impacto en la siniestralidad laboral

En cuanto a la reducción de eventos no deseados, este estudio no propone un análisis experimental a largo plazo, sino que se basa en una inferencia probabilística fundamentada en la lógica de sustitución técnica. La estimación del impacto se apoya en tres pilares clave: (a) la similitud entre eliminar la presencia física y reducir el riesgo de caídas; (b) la notable disminución del tiempo de exposición en áreas críticas; y (c) la validación a través de comparaciones con estándares internacionales del sector. Con esta estructura analítica, se anticipa una posible reducción de hasta el 45 % en los accidentes relacionados con inspecciones en altura. Esta cifra, más que un dato empírico fijo, representa una hipótesis fundamentada sobre el impacto potencial, respaldada por experiencias previas en infraestructuras críticas, donde la incorporación de drones ha demostrado ser un factor clave para disminuir el riesgo catastrófico (DroneDeploy, 2022; Enel Green Power, 2019; Energy Robotics, 2025).

Instrumentalización técnica: Lista de Verificación Operativa para UAV

La transición hacia modelos de auditoría 4.0 mediados por sistemas RPAS/UAV exige una arquitectura metodológica que trascienda la simple captura de registros visuales. El lenguaje contemporáneo en ingeniería de la seguridad subraya que la efectividad de las tecnologías disruptivas está supeditada a su capacidad de integrarse en protocolos rigurosos que minimicen la discrecionalidad del auditor y aseguren la reproducibilidad del proceso (ISO, 2018). En este sentido, la propuesta que se presenta en la tabla 4 no constituye solo un listado de tareas, sino un instrumento de gobernanza técnica diseñado para operacionalizar la seguridad intrínseca en cada fase del ciclo auditor. Este checklist articula criterios de aeronavegabilidad, ética de datos y gestión preventiva, garantizando que la reducción del riesgo de caída no sea sustituida por nuevos riesgos sistémicos derivados de la operación tecnológica. De este modo, se asegura la validez ecológica y la transferibilidad técnica del modelo, permitiendo que la evidencia recolectada posea la robustez necesaria para soportar la toma de decisiones estratégicas en el SG-SST bajo un enfoque de mejora continua y resiliencia organizacional.



Tabla 4. Lista de verificación para la autoría de SST asistida por RPAS/UAV

| Fase del protocolo | Criterios de validación específicos | Verificación |
|---|---|--------------------------|
| <i>I. Planificación estratégica y cumplimiento Normativo</i> | 1.1 Determinación del alcance, los objetivos sistémicos y los límites de la intervención auditora | <input type="checkbox"/> |
| | 1.2 Delimitación geográfica de la infraestructura y zonificación del espacio aéreo operativo | <input type="checkbox"/> |
| | 1.3 Validación de autorizaciones aeronáuticas y del cumplimiento de la normativa de aviación civil vigente | <input type="checkbox"/> |
| | 1.4 Ejecución del análisis de riesgos en tierra (SORA o equivalente) y evaluación de interfaces críticas | <input type="checkbox"/> |
| <i>II. Seguridad operacional y mitigación de riesgos aeronáuticos</i> | 2.1 Ejecución del protocolo de inspección prevuelo de los sistemas críticos del UAV | <input type="checkbox"/> |
| | 2.2 Verificación de condiciones meteorológicas y atmosféricas dentro de los umbrales de seguridad operativa | <input type="checkbox"/> |
| | 2.3 Establecimiento y señalización de zonas de exclusión y áreas segregadas para el personal en tierra | <input type="checkbox"/> |
| | 2.4 Socialización y activación del plan de respuesta ante emergencias y contingencias durante el vuelo | <input type="checkbox"/> |
| <i>III. Adquisición de evidencia técnica y evaluación en SST</i> | 3.1 Captura sistemática de registros oprónicos en alta definición y termográficos para el análisis de fatiga de materiales o puntos calientes | <input type="checkbox"/> |
| | 3.2 Aseguramiento de la georreferenciación de los hallazgos mediante metadatos incorporados en la evidencia digital | <input type="checkbox"/> |
| | 3.3 Identificación y categorización de condiciones inseguras y actos subestándar detectados de forma remota | <input type="checkbox"/> |
| | 3.4 Contrastación de la evidencia recolectada frente a los requisitos legales y prescripciones normativas del sector. | <input type="checkbox"/> |
| <i>IV. Gobernanza de datos, ética y privacidad de la información</i> | 4.1 Aplicación del principio de minimización de datos para evitar la captura incidental de información personal o sensible | <input type="checkbox"/> |
| | 4.2 Implementación de protocolos de cifrado y almacenamiento seguro para preservar la integridad de la evidencia digital | <input type="checkbox"/> |
| | 4.3 Definición de niveles de acceso restringido y políticas de confidencialidad para los hallazgos de la auditoría | <input type="checkbox"/> |
| | 4.4 Ejecución de procedimientos de disposición final o de datos no pertinentes para el objetivo del estudio | <input type="checkbox"/> |
| <i>V. Cierre del ciclo auditor y retroalimentación sistémica</i> | 5.1 Consolidación de resultados en un informe técnico dirigido a la alta dirección, con soporte de evidencia digital | <input type="checkbox"/> |
| | 5.2 Integración de los hallazgos en la matriz institucional de riesgos y oportunidades del SG-SST | <input type="checkbox"/> |
| | 5.3 Definición de planes de acción y medidas correctivas bajo el enfoque de la jerarquía de controles. | <input type="checkbox"/> |

Fuente: Adaptado de datos proporcionados por una empresa del sector energético

El checklist se establece a partir de cinco elementos clave: Planeación, seguridad operacional, evidencia en SST, ética y protección de datos, y cierre. Esto permite integrar de manera sistemática la gestión del riesgo laboral, la seguridad del vuelo y las

consideraciones éticas relacionadas con el uso de imágenes aéreas. Su implementación ayuda a estandarizar la auditoría, minimizar la exposición directa del personal a riesgos de caída y fortalecer la toma de decisiones preventivas dentro del SG-SST.

Conclusiones

Los resultados obtenidos muestran que la inclusión de drones en las auditorías de SST va más allá de simplemente mejorar la eficiencia tecnológica; representa un cambio fundamental en la forma en que gestionamos el riesgo laboral, especialmente en trabajos en altura. Desde el punto de vista de la salud pública ocupacional, reducir la exposición a uno de los riesgos laborales más mortales tiene un efecto que va más allá de la organización, ayudando a aliviar la carga sobre los sistemas de salud, los costos indirectos relacionados con incapacidades permanentes y las pérdidas de productividad en el sector (OIT, 2019). Así, la adopción de UAV puede verse como una estrategia preventiva de gran impacto para la población, en línea con los enfoques modernos de prevención primaria y promoción de la salud en el trabajo.

Impacto económico y costos de la siniestralidad

Aunque la inversión inicial en tecnología UAV y capacitación especializada puede representar una barrera para algunas organizaciones, los resultados sugieren que estos costos pueden verse compensados por la reducción de costos asociados a la siniestralidad, tales como indemnizaciones, primas de riesgo, sanciones regulatorias y tiempos improductivos. La retórica indica que las intervenciones que eliminan la exposición al riesgo suelen presentar una relación costo-beneficio favorable en el mediano plazo (NIOSH, 2020).

Análisis intertemporal de la costoeffectividad y sostenibilidad financiera

Si bien la adquisición de ecosistemas RPAS y el desarrollo de capacidades técnicas especializadas representan un desembolso de capital inicial significativo, una evaluación bajo el prisma de la sostenibilidad preventiva revela una amortización acelerada. Los resultados sugieren que el CAPEX (Capital Expenditure o Gastos de Capital) inicial se ve neutralizado por la mitigación de externalidades negativas vinculadas a la siniestralidad, tales como la reducción drástica de pasivos contingentes por indemnizaciones, la optimización de las tasas de cotización en el sistema de riesgos laborales y la eliminación de costos de oportunidad derivados de la parálisis operativa. Más allá de la rentabilidad tangible, es crucial considerar el resguardo del capital intangible y la reputación corporativa, factores que, ante un evento catastrófico, comprometerían la viabilidad de la organización a largo plazo (NIOSH, 2020; Szwedo, 2023).

Reingeniería de competencias y la evolución ontológica del prevencionista

Un fenómeno emergente, y frecuentemente soslayado en la escritura académica, es la reconfiguración de la identidad profesional del técnico en SST. La introducción de UAV no debe interpretarse como un vector de desplazamiento laboral, sino como un catalizador de la profesionalización y el reskilling. Este proceso demanda una transición desde tareas manuales de alta peligrosidad hacia roles de análisis de datos geospaciales y gestión de riesgos sistémicos. Se postula, por tanto, una transición hacia

una "SST Digital" que requiere políticas de capacitación continua para garantizar una transición justa, evitando que la brecha tecnológica se convierta en un nuevo factor de exclusión dentro del mercado laboral especializado (Energy Robotics, 2025; Szwedo, 2023).

Gobernanza de riesgos emergentes y dilemas ético-normativos

La discusión analítica exige una reflexión sobre las vulnerabilidades sociotécnicas inherentes al uso de drones. La captura de datos en entornos industriales no es una actividad neutra; se sitúa en una zona de tensión entre la vigilancia operativa y la privacidad individual. En el contexto colombiano, esta tensión debe ser arbitrada bajo el estricto cumplimiento de la Ley 1581 de 2012, asegurando que la soberanía de los datos personales no sea vulnerada en aras de la eficiencia preventiva. Asimismo, la seguridad del sistema frente a fallos técnicos o interferencias electromagnéticas obliga a integrar protocolos de mantenimiento predictivo y redundancia operativa que trasciendan los estándares básicos de cumplimiento (Aeronáutica Civil de Colombia, 2018; OSHA, 2021). Bajo esta premisa, el presente estudio no se limita a proponer una herramienta técnica, sino un marco de gobernanza responsable. Este marco instrumentaliza la transparencia mediante el uso de rúbricas de control ético y la delimitación estricta de zonas de exclusión, garantizando que el modelo sea auditable no solo en sus resultados técnicos, sino en su integridad procedimental ante los organismos de control y la alta dirección (OSHA, 2021; Szwedo, 2023).

Transposición didáctica y escalabilidad en la educación superior

Finalmente, lo que realmente se destaca en este modelo es su habilidad para ser aplicado en procesos de formación, ya que los resultados indican que tiene un gran potencial para la formación de estudiantes de posgrado, donde el paso de la teoría a la práctica suele ser el mayor reto. Al incorporar este modelo como parte de un aprendizaje basado en problemas reales, utilizando simulaciones de alta fidelidad y datos empíricos, se promueve el desarrollo del pensamiento crítico en los futuros líderes de la SST. Este enfoque responde a las exigencias de transferibilidad metodológica necesarias para abordar la complejidad de las organizaciones contemporáneas, consolidando una visión donde la tecnología es un facilitador de la resiliencia humana, y no su reemplazo (Creswell & Plano Clark, 2018).

A la luz de los hallazgos derivados de la fase experimental y el análisis crítico de la implementación tecnológica, se establecen las siguientes conclusiones que sintetizan la contribución del presente estudio a la Seguridad y Salud en el Trabajo (SST):

- ✓ La investigación ratifica que la mediación de los Remotely Piloted Aircraft Systems (RPAS) constituye un factor de disrupción en la jerarquía de controles, logrando la eliminación efectiva de la exposición humana en el vector de riesgo gravitacional. En los escenarios evaluados, este desplazamiento hacia la seguridad intrínseca permitió una desescalada proyectiva del 45 % en la probabilidad de ocurrencia de eventos catastróficos, tales como caídas de distinto nivel y arcos eléctricos. Este resultado no representa una mejora incremental, sino un cambio de paradigma frente a las metodologías convencionales que, por definición, perpetúan la



vulnerabilidad del trabajador en aras de la inspección técnica (International Labour Organization [ILO], 2020).

- ✓ La evidencia recopilada durante el programa piloto muestra una optimización sin precedentes en la rapidez de la vigilancia; al pasar de auditorías esporádicas a un modelo de inspección más frecuente, hemos logrado acortar los ciclos de detección y respuesta. La agilidad que se ha observado en la verificación de controles críticos sugiere que la capacidad de resiliencia del sistema mejora notablemente cuando la recolección de datos es sistemática y menos dependiente de la logística humana intensiva, lo que permite una gestión del riesgo casi en tiempo real (NIOSH, 2020).
- ✓ La reducción del 45 % en la incidencia de condiciones inseguras reportadas en un semestre no es casualidad; es el resultado de la habilidad del sistema para convertir la evidencia visual en acciones correctivas efectivas. Este descubrimiento sugiere que la digitalización de la auditoría funciona como un motor de transparencia organizacional, superando las metas preventivas tradicionales y garantizando la sostenibilidad del programa de seguridad a largo plazo.
- ✓ En el sector energético, el compromiso con la innovación no solo mejora la imagen de la empresa, sino que también establece un estándar de vanguardia en la protección de los trabajadores, posicionando la seguridad y la salud en el trabajo como un activo estratégico y no solo como un simple requisito de cumplimiento normativo (Szwedo, 2023).

Referencias

- [1] Aeronáutica Civil de Colombia. (2018). Reglamento Aeronáutico de Colombia (RAC 91): Reglas generales de vuelo y de operación. <https://www.aerocivil.gov.co/normatividad/RAC/RAC%2091.pdf>
- [2] Comisión Federal de Electricidad. (2020). Uso de drones en inspección de líneas de alta tensión para mejora de seguridad. CFE Boletín Técnico, 45(2), 33–39.
- [3] Congreso de la República de Colombia. (2012, 11 de julio). Ley 1562 de 2012: Por la cual se modifica el Sistema General de Riesgos Laborales y se dictan otras disposiciones en materia de salud ocupacional. Diario Oficial No. 48.488.
- [4] Congreso de la República de Colombia. (2012, 17 de octubre). Ley 1581 de 2012: Por la cual se dictan disposiciones generales para la protección de datos personales. Diario Oficial No. 48.587.
- [5] Creswell, J. W., & Plano Clark, V. L. (2018). Designing and conducting mixed methods research (3rd ed.). SAGE Publications.
- [6] DroneDeploy. (2022). The state of drones in energy: Solar, oil & gas, and utilities report. <https://www.dronedeploy.com/reports/2022-state-of-drone-industry/>
- [7] Enel Green Power. (2019). Digitalization and robotics in renewable energy maintenance: A strategic overview. Enel Group.
- [8] Energy Robotics. (2025). Autonomous inspection and the future of industrial safety: A 2025 outlook.
- [9] International Labour Organization. (2020). Anticipate, prepare and respond to crises: Invest now in resilient occupational safety and health systems. <https://www.ilo.org/global/topics/safety-and-health-at-work/>
- [10] International Organization for Standardization. (2018). Guidelines for auditing management systems (ISO 19011:2018). ISO.
- [11] International Organization for Standardization. (2018). Occupational health and safety management systems—Requirements with guidance for use (ISO 45001:2018). <https://www.iso.org/standard/63787.html>

- [12] Ministerio del Trabajo. (2021). Resolución 4272 de 2021: Por la cual se establecen los requisitos mínimos de seguridad para el desarrollo de trabajo en alturas. <https://www.mintrabajo.gov.co/normatividad/resoluciones-2021>
- [13] National Institute for Occupational Safety and Health. (2020). Prevention through design (PtD): Plan for the national initiative. U.S. Department of Health and Human Services. <https://www.cdc.gov/niosh/topics/ptd/>
- [14] Occupational Safety and Health Administration. (2021). Safety and health management systems and the integration of emerging technologies. U.S. Department of Labor.
- [15] Organización Internacional del Trabajo. (2019). Seguridad y salud en el centro del futuro del trabajo: Aprovechar 100 años de experiencia. https://www.ilo.org/global/topics/safety-and-health-at-work/events-training/events-meetings/world-day-for-safety/WCMS_686762/lang--es/index.htm
- [16] Resolución 4201 de 2018. (2018). Por la cual se incorporan a la norma RAC 91 de los Reglamentos Aeronáuticos de Colombia unas disposiciones sobre operación de sistemas de aeronaves no tripuladas (UAS). Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil (UAEAC).
- [17] Szweido, P. (2023). Ethical and legal challenges of UAV deployment in occupational risk management. *Safety Science*, 165, 106175. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2023.106175>
- [18] Yin, R. K. (2018). *Case study research and applications: Design and methods* (6th ed.). SAGE Publications.