



Inspección estructural mediante RPAS (drones): el caso del Puente de Guayllabamba

Structural inspection using RPAS (drones): the case of the Guayllabamba Bridge

Rubén Rodríguez Elizalde*

rrodriguezel@uoc.edu.es

Pablo Roberto Suasnavas Bermúdez**

pablo.suasnavas@uisek.edu.ec

* Universitat Oberta de Catalunya, ** Universidad Internacional SEK Ecuador

Recibido: 01/12/2025, Aceptado: 15/02/2026

Correspondencia: pablo.suasnavas@uisek.edu.ec

RESUMEN

El uso de aeronaves no tripuladas (RPAS), más conocidas como drones, se ha venido extendiendo a lo largo de los últimos años con aplicaciones múltiples y muy diversas, entre las cuales están las inspecciones de estructuras de obra civil. El presente artículo nace precisamente de una inspección de un puente singular, el Puente de Guayllabamba, llevada a cabo de forma experimental por los autores, para demostrar que la aeronave puede servir como herramienta de calidad para la realización de los trabajos que actualmente se llevan a cabo con personal cualificado y aparatosos medios auxiliares, obteniendo un trabajo de calidad idéntica o incluso mejor y, además, minimizando los riesgos para la seguridad y la salud de los trabajadores que actualmente desempeñan tales labores, con un ahorro notable en tiempo y costes. El artículo se estructura de la siguiente manera: tras esta introducción, se describe la metodología empleada, incluyendo el marco normativo, el equipamiento utilizado y los procedimientos de vuelo y procesamiento de datos. A continuación, se presentan los resultados de la inspección y el análisis estructural correspondiente. Finalmente, se discuten las implicaciones técnicas de los resultados obtenidos y se formulan conclusiones sobre la aplicabilidad de los RPAS en la inspección y el mantenimiento preventivo de infraestructuras viarias.

Palabras clave: Inspección estructural; RPAS (drones); Puentes; Conservación de estructuras; Mantenimiento preventivo;

ABSTRACT

The use of unmanned aircraft systems (UAS), more commonly known as drones or remotely piloted aircraft systems (RPAS), has expanded significantly in recent years across a wide range of applications, including the inspection of civil engineering structures. The present article arises from an experimental inspection of a singular bridge structure—the Guayllabamba Bridge—carried out by the authors with the aim of demonstrating that RPAS can serve as a high-quality tool for performing inspection tasks that are currently conducted using highly qualified personnel and cumbersome auxiliary access equipment. The results show that an equivalent or even superior level of inspection quality can be achieved, while simultaneously minimizing risks to the occupational safety and health of the workers involved and achieving a substantial reduction in both time and costs. The article is structured as follows: after this introduction, the methodology employed is described, including the regulatory framework, the equipment used, and the flight and data processing procedures. Next, the results of the inspection and the corresponding structural analysis are presented. Finally, the technical implications of the results obtained are discussed, and conclusions are drawn regarding the applicability of RPAS (Remotely Piloted Aircraft Systems) in the inspection and preventive maintenance of road infrastructure.

Keywords: Structural inspection; RPAS (drones); Bridges; Structural conservation; Preventive maintenance; Occupational safety

Cómo citar

Rodríguez Elizalde, R., & Suasnavas Bermúdez, P. R. (2026). Inspección estructural mediante RPAS (drones): el caso del Puente de Guayllabamba. GADE: Revista Científica, 6(1), 179-210. <https://doi.org/10.63549/rg.v6i1.782>



INTRODUCCIÓN

La inspección estructural de puentes constituye un elemento esencial en la gestión de la seguridad, la durabilidad y la sostenibilidad de las infraestructuras viarias. Tradicionalmente, estas inspecciones se han basado en observaciones visuales directas realizadas por personal especializado mediante medios auxiliares de acceso (andamios, plataformas elevadoras o trabajos verticales) que, si bien permiten un reconocimiento detallado, presentan limitaciones relevantes en términos de coste, tiempo de ejecución y, especialmente, exposición a riesgos laborales asociados a trabajos en altura y entornos de difícil accesibilidad (Rodríguez Elizalde, 2022a, 2024c).

En las últimas décadas, el enfoque de conservación de infraestructuras ha evolucionado progresivamente desde estrategias fundamentalmente reactivas hacia modelos de mantenimiento preventivo, apoyados en inspecciones periódicas, registro sistemático del daño y toma de decisiones informada. En este marco, los sistemas de aeronaves pilotadas remotamente (RPAS), también denominados UAS o drones, se incorporan como una herramienta de apoyo a la inspección estructural, al permitir la obtención de información visual de alta resolución en zonas tradicionalmente condicionadas por la accesibilidad o el riesgo (Perez Jimeno et al.,

2023; Rashidi & Samali, 2021; Seo et al., 2018).

La literatura reciente recoge numerosas aplicaciones de RPAS en la inspección de infraestructuras, incluyendo la identificación de fisuración, procesos de corrosión, desprendimientos de recubrimiento y alteraciones geométricas, así como su integración con técnicas de fotogrametría y análisis digital de imágenes. Sin embargo, persisten limitaciones significativas:

- la escasez de estudios de campo que evalúen de forma sistemática la capacidad diagnóstica del RPAS en puentes de tipología mixta;
- la limitada formalización de índices sintéticos que permitan jerarquizar el estado de conservación a partir de observaciones aéreas; y
- la insuficiente integración explícita entre inspección estructural y evaluación de riesgos laborales, a pesar de que la reducción de la exposición humana constituye uno de los principales argumentos para la adopción de esta tecnología.

Asimismo, una parte sustancial de los trabajos existentes se centra en el potencial tecnológico del RPAS, aportando descripciones parciales de los parámetros operativos de vuelo, los criterios de captura de datos y los procedimientos de análisis empleados (Kardach et al., 2019). Esta falta



de detalle metodológico dificulta la reproducibilidad de los resultados y su comparación con los métodos tradicionales de inspección. En consecuencia, resulta necesario disponer de estudios de caso bien documentados que permitan evaluar de manera crítica la aplicabilidad real de los RPAS como herramienta de inspección estructural en condiciones operativas reales (Aldana Rodríguez et al., 2024).

El Puente de Guayllabamba, ubicado sobre el río homónimo en un entorno geomorfológico complejo de la región

andina ecuatoriana (Abad-Auquilla, 2020), constituye un caso de estudio representativo para este análisis (Figura 1). Se trata de un puente de tipología mixta de hormigón armado y acero (Figura 2), con vanos isostáticos y condiciones ambientales caracterizadas por humedad intermitente, oscilaciones térmicas acusadas y una dinámica fluvial activa, factores que influyen directamente en los procesos de degradación de los materiales y en las necesidades de mantenimiento a medio y largo plazo.



Figura 1. Vista general del Puente de Guayllabamba y su integración en el entorno geomorfológico del valle, mostrando la disposición de los vanos, las pilas de hormigón armado y el tablero mixto sobre el cauce del río Guayllabamba (fotografía de los autores capturada con el dron).



Figura 2. Vista del alzado oeste del Puente de Guayllabamba, obtenida mediante RPAS (drone), donde se aprecian el tablero metálico, las pilas de hormigón armado y su relación con el cauce del río y el entorno topográfico inmediato (fotografía de los autores).

En este contexto, el presente artículo documenta una inspección estructural integral del Puente de Guayllabamba realizada mediante un sistema RPAS multirrotor (DJI Mavic Pro, Figura 3), con el objetivo de evaluar la idoneidad de esta tecnología como herramienta de apoyo a la inspección visual no destructiva de puentes en entornos de acceso limitado.



Figura 3. Aeronave pilotada remotamente (RPAS) empleada en la inspección estructural del Puente de Guayllabamba. El equipo es propiedad de la Universidad Internacional SEK Ecuador (fotografía de los autores).

La inspección se desarrolló siguiendo criterios metodológicos alineados con guías nacionales e internacionales de inspección de obras de paso, adaptadas al empleo de medios aéreos no tripulados. Los objetivos específicos del trabajo son los siguientes:

1. Evaluar la capacidad diagnóstica de un sistema RPAS para la identificación y documentación de patologías estructurales y de durabilidad en un puente mixto de hormigón y acero.
2. Analizar los daños observados en el Puente de Guayllabamba en relación con su tipología estructural y los condicionantes ambientales del entorno.
3. Proponer un índice global de deterioro, basado en la frecuencia y gravedad de los daños detectados, que permita jerarquizar prioridades de mantenimiento a partir de la información obtenida mediante inspección aérea.
4. Valorar el impacto del uso de RPAS en la reducción de la exposición a riesgos laborales durante las tareas de inspección estructural.

METODOLOGÍA

Toda metodología implica una forma específica de observación. La elección de un método determina desde qué posición se analiza la estructura y qué información se



considera relevante para su interpretación. En la inspección estructural mediante RPAS, el método no se limita a la ejecución de maniobras de vuelo o a la captación de imágenes, sino que define un marco de lectura técnica orientado a la precisión, la prudencia y la fiabilidad del diagnóstico. La tecnología adquiere sentido únicamente cuando se integra con el juicio del ingeniero, con la experiencia acumulada en la inspección de estructuras y con un conocimiento respetuoso del comportamiento de los materiales, de modo que la observación aérea se convierta en una herramienta de análisis y no en un fin en sí misma.

Marco de referencia y criterios de inspección

La inspección del Puente de Guayllabamba se desarrolló siguiendo las directrices metodológicas adaptadas de las Guías de Inspección de Obras de Paso del Ministerio de Fomento de España (Ministerio de Fomento, 2009, 2012) y del Administrador de Infraestructuras Ferroviarias adscrito a él (ADIF, 2025a, 2025b), ante la ausencia de una guía oficial específica para la inspección de puentes y obras de paso por parte del Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTOP) de Ecuador.

Este planteamiento se complementó con buenas prácticas internacionales ampliamente consolidadas en el ámbito de la inspección de puentes, en particular el

Bridge Inspection Manual del New York State Department of Transportation (NYSDOT, 2017; enmendado en 2024) y el Washington State Bridge Inspection Manual del Washington State Department of Transportation, ambos alineados con los National Bridge Inspection Standards y con las directrices de AASHTO y FHWA, así como el Manuel d'inspection des structures del Ministère des Transports du Québec, empleado como referencia conceptual para la clasificación de daños y los niveles de inspección (Gouvernement du Québec, 2017; New York State Department of Transportation, 2024; Washington State Department of Transportation, 2025).

De acuerdo con este marco metodológico, el trabajo se encuadra como una inspección principal de carácter detallado, visual y no destructivo, apoyada en medios extraordinarios de acceso (Rodríguez Elizalde, 2025), en este caso un sistema de aeronave pilotada remotamente (RPAS) de tipo multirrotor (Oñate de Mora, 2015), bajo la responsabilidad directa del equipo inspector.

El objetivo no era intervenir, sino observar con rigor: registrar lesiones, clasificarlas según su naturaleza y extensión, y deducir su posible causa estructural o ambiental.

La filosofía de trabajo se basó en un principio doble:



- Eficiencia técnica, entendida como la obtención del máximo nivel de detalle con el mínimo riesgo y coste.
- Prevención humana, orientada a eliminar la exposición directa de los inspectores a caídas, atrapamientos o descargas, preservando la integridad del equipo humano que tradicionalmente debía ascender por las pilas o descender hasta el cauce.

Equipamiento y planificación del vuelo

El dispositivo empleado fue un DJI Mavic Pro (Figura 3), de tipo cuadricóptero (Oñate de Mora, 2015), con las características técnicas recogidas en la Tabla 1:

Tabla 1: Principales especificaciones técnicas del RPAS empleado en la inspección estructural del Puente de Guayllabamba.

Parámetro	Valor
Peso máximo al despegue	734 g
Autonomía de vuelo	25 minutos (viento moderado)
Alcance de transmisión	4 km (en campo abierto)
Resolución de cámara	12,3 MP – 4K @ 30 fps
Estabilización	Gimbal de tres ejes
Sensor	CMOS 1/2,3 pulgadas
Sistema de posicionamiento	GPS + GLONASS

El vuelo se diseñó mediante un plan previo dividido en tres fases (Campo Molinuevo, 2015):

1. Reconocimiento del entorno (Hernández et al., 2023), con observación topográfica y determinación de obstáculos naturales (vegetación, tendidos eléctricos, viento canalizado por el valle).
2. Definición de rutas: trayectorias longitudinales paralelas al eje del tablero, vuelos rasantes bajo los vanos y elevaciones verticales en torno a las pilas para capturar los paramentos completos (Rashidi & Samali, 2021).
3. Captura de datos, consistente en series fotográficas de alta resolución y registros de vídeo continuo a baja velocidad (1,2–1,5 m/s) para facilitar el posterior fotomontaje y la detección de microfisuras (Falorca et al., 2021; Fan & Saadeghvaziri, 2019; Seo et al., 2018).

Las operaciones se ejecutaron en dos jornadas consecutivas (mañana y tarde) para comparar condiciones lumínicas y reducir la incidencia de reflejos sobre el hormigón. Se intentaron respetar alturas de vuelo comprendidas entre 3 m y 12 m bajo el intradós, con ángulos de toma de 60°–90° según la orientación solar (Rodríguez Elizalde, 2024b, 2024a).



La distancia media de vuelo respecto al paramento se situó en torno a 2,5 m, lo que permitió alcanzar una resolución espacial aproximada de 1,2 mm/píxel. Este nivel de resolución se consideró suficiente para la identificación visual cualitativa de fisuras de apertura submilimétrica y de fisuras claramente superiores a 1 mm, así como para la documentación de otros indicadores de degradación superficial (Rashidi & Samali, 2021). No se realizaron mediciones directas de apertura de fisura, de modo que el análisis se limitó a una evaluación visual basada en imágenes de alta resolución obtenidas durante la inspección aérea.

Procedimiento operativo y control de seguridad

El equipo de inspección estuvo integrado por dos técnicos en ingeniería civil, un piloto certificado de RPAS y un observador de seguridad. El procedimiento se desarrolló conforme al Reglamento de Operaciones Aéreas No Tripuladas de Ecuador (Dirección General de Aviación Civil, 2024).

Antes del vuelo, se ejecutó un checklist de seguridad (Gutiérrez Sandoval et al., 2024; Kurbanov & Zakharova, 2020) que incluyó:

- delimitación del área de despegue (radio 15 m, señalizada con cinta perimetral);

- comprobación de viento (< 6 m/s) y temperatura (< 32 °C);
- revisión de calibración IMU, brújula y gimbal;
- verificación de carga de baterías y redundancia de almacenamiento digital;
- confirmación de visibilidad directa y comunicación radio entre piloto y observador.

El riesgo de caída de objetos fue prácticamente nulo, y el riesgo de contacto eléctrico o atrapamiento inexistente (Rodríguez Elizalde, 2022b, 2024c). El piloto mantuvo línea visual en todo momento, conforme a las normas VLOS (Visual Line of Sight). La presencia del observador permitió la detección temprana de aves, turbulencias o incursiones ajenas en el espacio operativo (Sándor, 2023).

El cumplimiento de este protocolo no es un formalismo burocrático: es una extensión del deber ético del ingeniero hacia quienes trabajan y hacia lo construido. Prevenir no es temer; es respetar.



Registro de datos e instrumentación auxiliar

La misión generó más de 100 imágenes en formato RAW y 45 minutos de vídeo 4K, complementados con mediciones puntuales obtenidas mediante telémetro láser y registro GPS.

Los archivos se procesaron con los siguientes fines:

1. Fotogrametría de detalle, empleando *Agisoft Metashape v.1.8* para generar ortomosaicos del intradós y de las pilas.
2. Análisis de color y textura, con algoritmos de segmentación cromática (HSV) para discriminar zonas de humedad, óxido o colonización biológica.
3. Georreferenciación, integrando los metadatos GPS en un sistema SIG para futura comparación evolutiva.
4. Archivo documental, organizado bajo nomenclatura secuencial por vano, cara y elemento, en formato TIFF sin compresión, garantizando trazabilidad y compatibilidad con futuras campañas.

El valor del dato no reside solo en su precisión numérica, sino en su capacidad para reconstruir un relato: el relato de cómo el material envejece, cómo el agua dibuja su curso invisible bajo la pintura del hormigón o cómo la sal resucita en forma de mancha. Cada píxel es una palabra en esa narración.

Criterios de análisis estructural

La interpretación de las lesiones detectadas se basó en criterios mecánicos y de durabilidad reconocidos por la literatura técnica:

- Fisuras verticales en pilas y paramentos: asociadas a retracción térmica o a tensiones de compresión excéntricas (Seo et al., 2018; Toirac Corral, 2004).
- Lixiviaciones blancas: resultado de la disolución de hidróxidos cálcicos y su precipitación como carbonato, indicador de filtraciones recurrentes (Calavera Ruiz, 2005; Fernández Cánovas, 1995; García de Miguel, 2009).
- Corrosión superficial en vigas metálicas: atribuida a la condensación diferencial bajo el tablero (Choudhury & Hasnat, 2015; Lu et al., 2024).



- Erosión fluvial en estribos: efecto combinado de socavación y arrastre en crecidas estacionales (Choudhury & Hasnat, 2015).

Para cada tipo de daño se estableció una escala de gravedad cualitativa de cuatro

niveles (I–IV), adoptada para facilitar la evaluación de su gravedad y su posterior tratamiento cuantitativo (Tabla 2), y una frecuencia de aparición por elemento estructural (Ministerio de Fomento, 2009, 2012).

Tabla 2: Escala cualitativa de cuatro niveles (I–IV) adoptada para la clasificación de la gravedad de los daños observados en la inspección estructural.

Nivel	Grado de gravedad	Descripción técnica	Implicaciones para la estructura
I	Leve	Daños superficiales o incipientes (fisuras finas, manchas de humedad, eflorescencias, corrosión superficial sin pérdida de sección).	No afecta a la capacidad estructural ni a la seguridad. Requiere seguimiento periódico.
II	Moderado	Daños localizados con posible evolución (fisuras abiertas, desprendimientos de recubrimiento, corrosión inicial de armaduras o elementos metálicos).	No compromete la estabilidad global, pero puede afectar a la durabilidad. Requiere mantenimiento preventivo.
III	Grave	Daños significativos con afectación funcional (fisuración extensa, pérdida parcial de sección, degradación de apoyos o elementos resistentes).	Puede afectar a la capacidad resistente local. Requiere intervención correctiva y análisis detallado.
IV	Muy grave	Daños severos o generalizados (pérdida significativa de sección, inestabilidad local o global, riesgo inmediato).	Compromete la seguridad estructural. Requiere actuación urgente o restricción de uso.

Los valores fueron ponderados mediante un índice de deterioro global, que se obtiene de la expresión

$$IDG = \frac{\sum_{i=1}^n F_i G_i}{N}$$

donde

- F_i : frecuencia de aparición del daño i en el conjunto de elementos inspeccionados.
- G_i : valor numérico asociado al nivel de gravedad del daño.

- N : número total de observaciones consideradas

La finalidad de este índice no es ofrecer una cifra cerrada, sino jerarquizar prioridades de mantenimiento. El análisis cuantitativo se complementó con una lectura geométrica de las proporciones del puente: la relación luz/altura ($L/h \approx 18$), la proporción entre el espesor del tablero y la anchura de la



calzada ($e/b \approx 1/25$) y la distancia media entre apoyos (≈ 42 m), parámetros que definen la elegancia estructural del conjunto.

En el equilibrio de esas cifras se oculta una forma de belleza: la de una materia que obedece a la medida sin renunciar a su libertad.

Enfoque interdisciplinario y lectura cultural del método

Si la técnica da los medios, la cultura otorga el sentido. La metodología aplicada no pretende ser un catálogo de operaciones, sino una práctica de conocimiento situada entre la ingeniería, la arquitectura y la antropología del territorio.

En Guayllabamba, cada elemento estructural (la losa, la viga, el estribo) actúa como mediador entre la topografía y el tráfico, entre la naturaleza y la voluntad humana de conectar. El drone, al recorrer esos límites, se convierte en un nuevo tipo de testigo: observa sin tocar, registra sin alterar, calcula sin imponer. Su vuelo evoca la mirada de los antiguos delineantes que, en sus croquis a pluma, buscaban la proporción secreta de las cosas.

Por ello, el método adoptado es a la vez cuantitativo y contemplativo:

cuantitativo porque mide, calcula y compara; contemplativo porque interpreta y valora. Esa doble condición (numérica y simbólica) devuelve a la ingeniería su dimensión cultural. Inspeccionar con un RPAS no significa mecanizar la observación, sino liberarla de sus riesgos para devolverle su esencia: la de un gesto humano que busca entender.

* * *

La metodología aquí descrita constituye, por tanto, una síntesis entre precisión técnica y prudencia ética. Permite reproducir la inspección con fiabilidad, integrar los datos en sistemas de gestión y, sobre todo, preservar la seguridad de las personas que trabajan en la conservación del patrimonio civil.

En el próximo apartado se exponen los resultados y observaciones estructurales, donde los datos captados por el drone se traducen en diagnóstico, medida y significado: la materia observada como texto que puede leerse, interpretarse y, finalmente, conservarse.

Análisis estructural y observaciones

La estructura, cuando se observa con la atención que merece, revela su propio lenguaje. No es un lenguaje de palabras, sino de tensiones, deformaciones,



marcas de humedad y líneas de fractura. Todo ingeniero aprende a leerlo con los años, como quien descifra los pliegues de una montaña o las arrugas de una piel. El drone, ese nuevo ojo suspendido, permite acercarse a esa escritura sin perturbarla, recogiendo las señales del tiempo con una precisión que ningún andamio ni plataforma móvil lograrían



Figura 4. Vista general del Puente de Guayllabamba en sentido longitudinal, mostrando la disposición de los vanos, las pilas de hormigón armado y su relación con el cauce del río (imagen obtenida mediante RPAS).

Configuración general y esquema resistente

El Puente de Guayllabamba se compone de tres vanos isostáticos, con luces aproximadas de 36, 42 y 38 metros, apoyados sobre pilas de hormigón armado y estribos en cimentación superficial (Abad-Auquilla, 2020). El tablero, de 7,60 metros de ancho, aloja una calzada de doble carril con arcenes mínimos, y se resuelve mediante un sistema mixto de vigas metálicas longitudinales (perfil doble T de alma llena) y losa de compresión de hormigón armado.

igualar



Figura 4).

El cálculo geométrico revela una relación esbeltez (L/h) de 18,2, valor que sitúa al puente en el límite superior de la elegancia estructural para este tipo de tipologías. La proporción entre el canto de viga ($h = 2,3$ m) y la luz del vano central ($L = 42$ m) asegura un equilibrio adecuado entre rigidez y ligereza, permitiendo una flecha teórica bajo carga uniforme de apenas $L/800$, inferior a los límites normativos ($L/500$). Esa proporción confiere al conjunto una apariencia de equilibrio silencioso: la materia no se impone, sino que flota sobre el valle, en la justa medida de su resistencia.

El sistema de apoyos combina neoprenos elastoméricos en los ejes principales y dispositivos metálicos fijos en los extremos, permitiendo desplazamientos longitudinales por dilatación térmica de ± 10 mm (Lan, 2020; Ministerio de Fomento, 2009,



2012). Las juntas de dilatación, situadas sobre estribos y pilas, muestran un comportamiento correcto, aunque el drone registró pérdidas parciales de sellado y acumulación de finos en las ranuras, indicio de una limpieza deficiente más que de un fallo funcional.

El esquema resistente se comporta, por tanto, como un conjunto isostático continuo, con transmisión directa de

cargas verticales hacia las pilas, sin signos visibles de torsión o pandeo (Figura 5). El vuelo del RPAS permitió confirmar la ausencia de deformaciones diferenciales entre los vanos, y la alineación de las cabezas de pila, verificadas mediante fotogrametría comparativa, presenta una desviación máxima de 2,8 cm, valor asumible para una estructura de su edad y condiciones térmicas.



Figura 5. Detalle de la junta vertical entre cuerpos de hormigón en la zona de apoyo del tablero del Puente de Guayllabamba, correspondiente a una discontinuidad constructiva prevista en el diseño, donde se aprecian huellas de filtración superficial asociadas al envejecimiento del sellado (imagen capturada mediante RPAS).

Observaciones sobre el hormigón estructural

En el hormigón de pilas y estribos se observaron diversos patrones de

fisuración vertical y horizontal, especialmente en los paramentos orientados al sur y al suroeste, más expuestos a las oscilaciones térmicas.



Las fisuras presentan recorridos verticales compatibles con tensiones por retracción o por compresión excéntrica (Figura 6). No se detectaron fisuras diagonales ni signos de aplastamiento en las zonas de arranque, lo que sugiere un buen comportamiento de las cimentaciones frente a asientos diferenciales.

Las imágenes obtenidas con el drone evidencian también presencia de

eflorescencias blanquecinas en las juntas y encuentros entre hormigones de diferente edad, producto de la lixiviación de hidróxidos cálcicos (Calavera Ruiz, 2005; Escudero Castro, 2014; Fernández Cánovas, 1995). Estas manchas, que podrían parecer insignificantes al observador casual, son un mapa de la porosidad invisible: el agua ha pasado, y con ella, la historia química del puente (García de Miguel, 2009).



Figura 6. Vista del intradós del tablero y de la zona superior de una pila del Puente de Guayllabamba, donde se observan chorreos de lixiviación, fisuración vertical y alteraciones cromáticas del hormigón asociadas a la presencia recurrente de humedad (imagen capturada mediante RPAS).

Se registraron asimismo zonas de desprendimiento del recubrimiento en las caras inferiores del tablero, con exposición parcial de la armadura transversal. En algunos casos, la longitud visible del acero

es notable, aunque sin evidencias de corrosión profunda. La pérdida de recubrimiento es una lesión menor en términos estructurales, pero importante desde la perspectiva de la durabilidad



(Frankel & Sridhar, 2008). Una barra expuesta es un metal desnudo ante el oxígeno y el tiempo.

El análisis cromático de las superficies de hormigón permitió identificar zonas con tonalidades blanquecinas y grisáceas (Figura 7), compatibles con procesos de lixiviación y posible

carbonatación superficial (Fernández Cánovas, 1995; Strieška et al., 2018). Estos indicios se interpretan exclusivamente como manifestaciones visuales externas, sin que se haya realizado ningún ensayo específico (por ejemplo, fenolftaleína) que permita cuantificar la profundidad o el grado de carbonatación.



Figura 7. Detalle del encuentro entre el tablero metálico y la pila de hormigón armado del Puente de Guayllabamba, donde se aprecian huellas de escorrentía y lixiviación vertical asociadas a procesos de humedad superficial y envejecimiento del material (imagen capturada mediante RPAS).

Elementos metálicos y procesos de corrosión

Las vigas principales y los elementos de apoyo metálicos muestran un estado general satisfactorio. No obstante, las imágenes del RPAS permitieron identificar zonas localizadas de corrosión superficial en las alas inferiores de las vigas, especialmente

cerca de los apoyos. En algunos casos, el óxido se acumula bajo forma de costra friable. Esto corresponde a un ataque de tipo atmosférico C3 (moderado) según la norma ISO 9223, corrosión de los metales y aleaciones (Corvo et al., 2008; Strieška et al., 2018).

El origen de estas corrosiones parciales parece estar vinculado a la



condensación nocturna bajo el tablero y al efecto Venturi del viento del valle, que favorece la humedad intermitente en las caras inferiores. En términos mecánicos, el fenómeno no afecta al momento resistente global, pero exige vigilancia (Frankel & Sridhar, 2008; Lu et al., 2024): el acero, aunque noble, no perdona el descuido.

Uno de los hallazgos más relevantes fue la detección de microfisuras radiales en torno a los anclajes de neopreno, captadas en detalle por el zoom digital del dron. Estas microfisuras podrían estar asociadas a rotaciones mínimas no previstas o a defectos en la colocación de la placa de apoyo. Su evolución debe observarse en futuras inspecciones, pues podrían anticipar un fenómeno de compresión excéntrica o una pérdida progresiva de contacto entre neopreno y hormigón.

Procesos de erosión y entorno fluvial

El río Guayllabamba, caracterizado por un régimen torrencial y un cauce de dinámica inestable, ejerce una acción hidráulica relevante sobre las cimentaciones del puente. Las imágenes oblicuas obtenidas mediante RPAS durante el periodo de estiaje permitieron identificar indicios de socavación

incipiente en la base de la pila norte, asociados a la pérdida localizada de material granular en una superficie aproximada del orden de 1,2 m².

Aunque las evidencias detectadas no se consideran compatibles con una afección inmediata al comportamiento estructural global, la naturaleza del fenómeno aconseja la adopción de medidas preventivas. En particular, se recomienda la reposición localizada de escollera y la implantación de un programa de seguimiento periódico, preferentemente mediante técnicas específicas como levantamientos batimétricos o inspecciones subacuáticas, que permitan evaluar la evolución temporal del proceso y anticipar posibles escenarios de riesgo.

El dron también permitió registrar la vegetación invasiva en las márgenes: raíces y brotes que, si no se eliminan, pueden infiltrarse en las juntas de los estribos. La naturaleza, como el tiempo, no destruye de golpe: insinúa, abre fisuras y espera.

La inspección del entorno refuerza una idea esencial: la estructura no se conserva sola, sino que dialoga con un ecosistema. La erosión, el polvo y el viento son fuerzas con las que la ingeniería debe pactar, no vencer.



Síntesis cuantitativa de daños

El procesamiento de los datos permitió elaborar una matriz de

incidencia que resume los principales tipos de lesión detectados (Tabla 3).

Tabla 3: Matriz de incidencia de las principales lesiones observadas durante la inspección.

Tipo de daño	Frecuencia relativa	Grado de severidad	Elementos afectados
Fisuras verticales por retracción	Alta	II	Pilas y estribos
Lixiviaciones y eflorescencias	Media	I	Tablero e intradós
Desprendimientos de recubrimiento	Media	II	Losas inferiores
Corrosión superficial metálica	Baja	II–III	Vigas principales
Microfisuras en apoyos	Baja	III	Placas de neopreno
Erosión fluvial	Baja	II	Cimentación norte
Aflojamiento de anclajes	Media	II	Barandillas y luminarias

En este trabajo, la frecuencia F_i se define como la proporción relativa de elementos estructurales en los que se detecta el daño i respecto al total de elementos inspeccionados. El valor de gravedad G_i se asocia a la escala cualitativa I–IV adoptada, asignando valores numéricos de 1 a 4 respectivamente. El índice resultante no pretende constituir un parámetro absoluto, sino un indicador comparativo para la priorización de intervenciones de mantenimiento.

A partir de estos datos se calculó un Índice Global de Deterioro ($IDG = 1,87 / 4$), correspondiente a un nivel de conservación “Bueno–Moderado”, sin riesgos estructurales relevantes, pero con

necesidad de mantenimiento rutinario en elementos secundarios y protección anticorrosiva localizada.

Lectura estructural e interpretación técnica

El comportamiento global del puente se mantiene coherente con su diseño original: el flujo de cargas sigue trayectorias lineales hacia las pilas, sin desviaciones notables. Las fisuras detectadas, aunque visibles, no comprometen la integridad resistente. En términos de durabilidad, las principales amenazas provienen del agua, tanto por filtración como por condensación.

El análisis geométrico y tipológico del puente, junto con la ausencia de



indicadores visibles de comportamiento anómalo (fisuración diagonal, deformaciones diferenciales o daños en apoyos), sugiere que la estructura opera con un margen de seguridad adecuado para su tipología y condiciones de servicio. No se realizó un análisis estructural numérico detallado, por lo que no se presentan valores cuantitativos de tensiones.

En otras palabras, la estructura no trabaja al límite, sino con una reserva prudente, fiel a los cánones de una ingeniería sensata. Esta reserva no es un despilfarro: es el eco de la vieja ética constructiva, la que sabía que toda obra debe resistir no solo las cargas previstas, sino también las imprevistas, las del tiempo y las del azar.

La materia como testigo

La inspección realizada mediante RPAS permitió identificar no solo grietas, manchas o alteraciones puntuales, sino también patrones de envejecimiento asociados a la interacción prolongada entre material y entorno. En el hormigón, estos procesos no deben interpretarse únicamente como defectos aislados, sino como manifestaciones de su exposición continuada a ciclos climáticos y ambientales. En el acero, la aparición de

oxidaciones superficiales pone de relieve la naturaleza ambivalente del material: elevada capacidad resistente, pero dependencia directa de las condiciones de protección. El río que discurre bajo el tablero constituye, asimismo, un agente permanente de esta interacción, recordando que la estructura se inserta en un sistema dinámico en el que la estabilidad convive con el cambio.

Cada registro métrico y cada imagen obtenida refuerzan una idea fundamental: conservar una estructura no implica detener su envejecimiento, sino comprenderlo y gestionarlo. La inspección estructural no se orienta a negar el paso del tiempo, sino a medir sus efectos, interpretarlos y actuar de forma anticipada para prolongar la funcionalidad y la integridad de la obra. En este proceso, el ingeniero no se enfrenta al tiempo como adversario, sino que lo incorpora como variable esencial del análisis.

Desde esta perspectiva, la lectura estructural del Puente de Guayllabamba pone de manifiesto que el uso de tecnología RPAS aporta no solo mejoras en precisión y seguridad, sino también una forma de conocimiento más global e integrada, compatible con la protección



del personal inspector y con el respeto por la materialidad de la estructura.

En el apartado siguiente se profundiza en esta dimensión interpretativa de la inspección aérea, entendiendo el RPAS no únicamente como un medio técnico, sino como un instrumento que amplía la capacidad de observar, comprender y mantener las infraestructuras construidas.

Interpretación cultural y simbólica

Toda estructura humana, por muy técnica que sea, nace de una intuición anterior al cálculo: la de unir.

El puente, más que cualquier otra obra, materializa ese deseo antiguo de conectar lo separado. Une orillas, pueblos, tiempos. Su función utilitaria (permitir el paso) no agota su significado: bajo la lógica de las cargas se oculta una poética del vínculo. Cada viga, cada pila, cada junta se ordena según una proporción que no solo resiste, sino que también expresa. La ingeniería, cuando alcanza su madurez, se vuelve lenguaje.

El puente como símbolo del tránsito y la permanencia

El Puente de Guayllabamba, suspendido sobre su cauce andino, es a la vez paso y permanencia. Su forma es simple, casi austera, pero esa sobriedad encierra una sabiduría esencial: no distrae al viajero, lo acompaña. A diferencia de los puentes históricos de piedra o hierro forjado, su estética no proviene de la ornamentación, sino de la proporción. Es un puente que no quiere imponerse al paisaje, sino integrarse en él. Su belleza no está en la superficie: está en la medida.

En el lenguaje de la ingeniería, la medida no es una abstracción numérica, sino una ética del equilibrio. Entre la rigidez y la flexibilidad, entre la carga y la descarga, entre el cálculo y el azar, la estructura se sostiene porque acepta su límite. La naturaleza sólo se vence obedeciéndola, y el puente obedece a la gravedad para vencerla. Cada coeficiente, cada parámetro estructural, es la expresión matemática de un principio moral: resistir sin exceso, ceder sin rendirse.

El Guayllabamba, como todo río, representa lo mutable. El puente, lo estable. Entre ambos se produce una conversación incesante: el agua desgasta



la roca, el acero se oxida, el hormigón se carbonata. Sin embargo, el conjunto persiste. Ese equilibrio inestable entre duración y desgaste constituye la verdadera condición poética de la ingeniería civil: no hay eternidad, pero hay permanencia en la forma.

La mirada aérea: el RPAS como nueva conciencia técnica

En este contexto, el RPAS no actúa únicamente como un instrumento de inspección, sino como un dispositivo que amplía y reorganiza la observación técnica. Al sobrevolar la estructura, el sistema aéreo permite restituir una visión global del puente, superando las limitaciones del punto de vista terrestre y facilitando una comprensión simultánea del conjunto y de sus partes. La posibilidad de aproximarse a la obra, rodearla y analizarla sin contacto físico introduce una forma de observación continua, en la que la geometría, el estado material y la relación con el entorno pueden evaluarse de manera integrada.

Esta capacidad de visión unificada recupera, por medios distintos, una cualidad propia de la práctica constructiva preindustrial: la comprensión directa del comportamiento de la estructura a partir de su forma y de

su materialidad. A diferencia de los métodos tradicionales, el RPAS incorpora la distancia como condición operativa, no como pérdida de información, sino como garantía de seguridad y de control del proceso. La observación se produce sin exposición directa al riesgo, reforzando el principio de prevención como parte constitutiva de la inspección.

La distancia física introducida por la inspección aérea no implica una observación más fría, sino una mayor claridad interpretativa. La cámara del RPAS permite registrar con precisión manifestaciones locales de daño y, al mismo tiempo, situarlas dentro del comportamiento global de la estructura. Ver se convierte así en un acto de interpretación técnica: cada imagen requiere ser leída a la luz del conocimiento estructural, de la experiencia del ingeniero y de la lógica material de la obra. En este sentido, la inspección aérea no solo amplía lo visible, sino que mejora la capacidad de comprender y anticipar el comportamiento de la estructura en el tiempo.

La materia como memoria

El hormigón, el acero, la piedra... todos los materiales envejecen, pero no



del mismo modo. Algunos se fisuran; otros se manchan; otros, simplemente, cambian de tono. Este envejecimiento diferencial es el relato que el tiempo escribe sobre la materia. El RPAS permite leer ese relato con precisión, pero su valor no está solo en el dato métrico: está en la conciencia de continuidad que genera. Ver cómo el recubrimiento se ha desprendido o cómo el agua ha dejado una huella blanca no es constatar una falla, sino reconocer una historia. La conservación, en este sentido, no es la negación del tiempo, sino su interpretación.

El puente, observado desde arriba o desde abajo, revela una verdad humilde: la belleza estructural reside en el trabajo bien hecho. No en la ostentación, sino en la exactitud, pues una construcción es el testimonio más visible de la idea de orden que tiene una civilización. La ingeniería civil comparte esa vocación: sus obras son los alfabetos del orden material. Mantenerlas, conservarlas, inspeccionarlas, es una forma de seguir escribiendo con la misma caligrafía.

El Puente de Guayllabamba fue diseñado con un lenguaje técnico sobrio, sin ambición escultórica. Sin embargo, el drone, al captarlo desde ángulos

insólitos, revela su dimensión estética oculta: la curva suave del tablero, el ritmo regular de las vigas, el contraste entre la sombra del intradós y el resplandor del agua. Visto desde el aire, el puente deja de ser solo infraestructura: se convierte en figura geométrica, en signo que dialoga con el paisaje.

El paisaje como interlocutor

Toda obra civil es una negociación con el territorio. En los Andes, donde la topografía impone respeto y las fuerzas naturales son intensas, el ingeniero no puede actuar como conquistador, sino como mediador. El Puente de Guayllabamba es precisamente eso: una mediación entre lo sólido y lo fluido, entre la montaña y el río.

Desde el punto de vista cultural, esta mediación tiene una resonancia profunda. El valle fue históricamente zona de paso entre regiones agrícolas y comerciales; hoy, su puente conserva ese carácter de enlace. La estructura, por tanto, no solo soporta vehículos: sostiene un tejido social y simbólico que trasciende el cálculo.

La inspección mediante RPAS introduce un tercer actor en esa relación: la mirada aérea, que ya no pertenece al caminante ni al conductor, sino al observador que se eleva. Esa mirada



devuelve al puente su condición de objeto cultural en el paisaje.

Si el ser humano edificó para dominar la naturaleza, hoy inspecciona para reconciliarse con ella. La tecnología, bien entendida, no sustituye a la sensibilidad: la amplía.

El cálculo como forma de cultura

En la cultura técnica moderna, el cálculo suele presentarse como un procedimiento aséptico. Sin embargo, en su origen (desde los tratados de Vitrubio hasta las notas de Leonardo), calcular era un acto de comprensión. Medir una estructura era comprender su armonía. En ese sentido, cada relación numérica (L/h , e/b , σ/σ_{adm}) encierra una poética. No son cifras neutras: son proporciones de equilibrio, casi musicales.

El Puente de Guayllabamba responde a una lógica de simetría dinámica. Su luz central es ligeramente mayor que las laterales, y esa diferencia, imperceptible al ojo profano, equilibra visualmente la estructura en el paisaje.

La proporción entre el tablero y el valle genera una tensión compositiva que remite a la idea de “justa medida” que atraviesa la historia de la arquitectura desde el Renacimiento. Allí donde las

matemáticas alcanzan el límite de su exactitud, comienza la estética.

El drone, con su vuelo estable y sus coordenadas precisas, traduce esa armonía en un nuevo lenguaje digital. La nube de puntos, el modelo tridimensional, las ortofotos son herederos de los antiguos dibujos de ingenieros y delineantes. La diferencia es que ahora el trazo se ha vuelto luz. Lo que antes se medía con regla y compás, hoy se mide con píxeles y algoritmos. Pero el propósito sigue siendo el mismo: comprender la forma para cuidar su permanencia.

Ética de la prevención y estética de la seguridad

El uso de RPAS en la inspección no es solo un avance técnico: es una declaración ética. Supone reconocer que la seguridad del trabajador es tan valiosa como la integridad de la estructura.

Durante siglos, los operarios de mantenimiento (los “obreros invisibles” de la ingeniería) han asumido riesgos que la tecnología actual permite evitar. La prevención no es debilidad, sino civilización: es el momento en que la técnica se vuelve humana.

Hay una cierta belleza en esa prudencia. Así como el arquitecto busca



la proporción justa, el prevencionista busca la exposición justa: la que permite trabajar sin dañar. En ese sentido, el vuelo del drone es casi un gesto moral: un equilibrio entre conocimiento y cuidado.

La inspección aérea no sustituye al ingeniero, sino que le ofrece una mirada más segura, más completa y consciente. Es la traducción contemporánea del principio de que el conocimiento es poder, pero poder entendido no como dominio, sino como responsabilidad.

El puente como metáfora del conocimiento

Finalmente, todo este proceso (construir, inspeccionar, conservar) puede leerse como una metáfora del propio acto de conocer.

El puente une dos orillas físicas, pero también une la razón y la emoción, la técnica y el arte, la medida y el sentido. Inspeccionarlo con un drone es, en cierto modo, reproducir ese gesto: tender un puente entre lo visible y lo invisible, entre la superficie de los materiales y la profundidad del significado.

Cuando el RPAS sobrevuela la estructura, el ingeniero no solo observa: medita. Medita sobre la fragilidad de lo construido, sobre la paciencia del

cálculo, sobre la relación entre la obra humana y la naturaleza. En esa contemplación técnica hay un residuo de asombro, el mismo que impulsó a los primeros constructores de bóvedas o acueductos.

Así, la tecnología, lejos de banalizar la inspección, la devuelve a su raíz filosófica: conocer para conservar, medir para comprender, prevenir para cuidar. La mirada del drone no es fría ni distante: es la mirada ampliada de una conciencia que, al elevarse, entiende mejor la proporción entre el hombre y su obra.

CONCLUSIONES

Toda investigación técnica alcanza su sentido pleno cuando, más allá de la acumulación de datos, permite formular un criterio. Un criterio que articule la observación empírica con la responsabilidad que deriva de intervenir sobre lo construido. El estudio del Puente de Guayllabamba, a partir de una inspección estructural realizada mediante RPAS, conduce a una conclusión que trasciende el ámbito estrictamente instrumental: conocer una estructura implica asumir el compromiso de preservarla. En este sentido, la inspección no es solo un acto de análisis,



sino una forma de anticipación y de cuidado, mediante la cual la ingeniería prolonga la vida útil de la obra y reafirma su vocación constructiva en el tiempo.

Síntesis técnica

Desde el punto de vista técnico, la experiencia demostró la viabilidad plena del uso de drones en la inspección de estructuras mixtas de hormigón y acero situadas en entornos de difícil acceso.

El RPAS permitió realizar un levantamiento visual exhaustivo de las tres tipologías de elementos que componen el puente (estructurales, funcionales y ambientales) con un nivel de resolución suficiente para la identificación visual cualitativa de fisuración fina y de fisuras claramente submilimétricas, eflorescencias de carbonato cálcico, manchas de corrosión, desprendimientos de recubrimiento y pequeñas deformaciones en los apoyos.

Las principales ventajas observadas fueron:

- Reducción significativa de los riesgos laborales: no fue necesario el uso de plataformas elevadoras ni descuelgues con cuerda, eliminando los peligros de caída, golpe o atrapamiento.

- Ahorro de tiempo y recursos: la campaña de vuelo, incluyendo reconocimiento, calibración y captura, no superó las ocho horas efectivas de trabajo.
- Fiabilidad de los datos: las imágenes y vídeos obtenidos constituyen una base documental objetiva, reproducible y georreferenciada.
- Capacidad diagnóstica: el análisis cromático y la fotogrametría de detalle permitieron interpretar procesos de degradación, correlacionándolos con la orientación solar y la exposición a la humedad.
- Versatilidad y continuidad: los vuelos pueden repetirse periódicamente para generar un historial visual de la evolución estructural.

El valor obtenido para el índice global de deterioro ($IDG = 1,87$ sobre un máximo de 4) sitúa el estado de conservación del puente en una condición comprendida entre buena y moderada. Esta clasificación se caracteriza por la ausencia de daños estructurales significativos y por la



presencia de procesos de envejecimiento superficial y degradación ambiental propios de la exposición prolongada al entorno. A la luz de estos resultados, se considera adecuada la adopción de medidas de mantenimiento preventivo de carácter localizado, orientadas a mejorar la durabilidad de los materiales y a limitar la evolución de las patologías detectadas, sin que se identifique la necesidad inmediata de intervenciones estructurales de mayor alcance.

La inspección visual realizada mediante RPAS no ha puesto de manifiesto indicadores de comportamiento estructural anómalo, tales como deformaciones apreciables, desalineaciones relevantes de los apoyos o daños incompatibles con un funcionamiento estructural estable. La información obtenida ha resultado suficiente para la identificación visual cualitativa de fisuración fina, eflorescencias, procesos de lixiviación y otros mecanismos de degradación superficial. No se llevaron a cabo mediciones directas de apertura de fisuras ni ensayos específicos sobre los materiales, por lo que las conclusiones derivadas se circunscriben al alcance propio de una inspección visual aérea de alta resolución.

Aportaciones metodológicas y conceptuales

El ensayo en Guayllabamba confirma que la metodología RPAS no sustituye a la inspección tradicional, sino que la evoluciona. Amplía la percepción del ingeniero, multiplica sus ojos, le permite observar sin exponerse.

La fotografía aérea se convierte en un plano tridimensional de lectura, donde cada detalle (una sombra, una grieta, una textura) participa de un sistema interpretativo.

De esta forma, la inspección deja de ser una tarea rutinaria para convertirse en acto cognitivo y reflexivo, un ejercicio de hermenéutica estructural en el que el técnico interpreta signos, descifra patrones, anticipa comportamientos.

El método propuesto, replicable en otros puentes y viaductos del territorio ecuatoriano, aporta además una visión sistémica de la conservación:

- Une geometría, mecánica y fotogrametría en una misma plataforma digital.
- Integra el análisis de riesgos laborales y estructurales en un solo protocolo.



- Refuerza la trazabilidad documental de la conservación, elemento clave para la gestión patrimonial contemporánea.

En el fondo, la metodología reivindica una idea antigua, casi renacentista: la del ingeniero humanista, capaz de medir y al mismo tiempo de comprender. No hay contradicción entre cálculo y sensibilidad; ambos son formas de conocimiento. El número no mata la belleza; la describe.

Dimensión humanista: el cálculo como cultura

Más allá de los resultados técnicos, este trabajo pretende situar la inspección estructural en un horizonte más amplio: el de la cultura material. Un puente no es sólo un objeto de cálculo: es un fragmento de civilización. En él confluyen la técnica, el paisaje, la economía, la seguridad y la estética. Su análisis, por tanto, no puede limitarse a cifras; debe incluir significados.

El RPAS, en este sentido, actúa como mediador entre el ingeniero y la obra. Al elevar la mirada, nos recuerda que conservar una estructura no es congelarla en el tiempo, sino mantenerla viva. Cada grieta observada es una lección de humildad; cada mancha, una evidencia de que la materia respira.

Ver desde arriba es también una forma de comprender desde dentro: el vuelo del drone ofrece una perspectiva que reconcilia la precisión de la técnica con la empatía del observador.

La ética de la prevención, evitar el riesgo antes de que ocurra, se convierte aquí en una estética del cuidado. No se trata sólo de proteger la vida del operario, sino también la dignidad de la obra. Prevenir es escuchar el material antes de que grite.

El puente que se mantiene sano gracias a la vigilancia es un organismo que no enferma; y cada vuelo de inspección es, en cierto modo, una revisión médica de su cuerpo de acero y hormigón.

Esta noción de cuidado conecta con una idea más profunda: el cálculo es también cultura. Calcular es medir, pero también elegir qué se considera justo. En la medida se esconde una ética: la del límite, la proporción, la medida. Así como la literatura ordena el lenguaje, la ingeniería ordena la materia. Y ambos órdenes, el verbal y el estructural, son manifestaciones de una misma voluntad de sentido.



La belleza del bien construido

Toda forma es un pacto entre el espacio y la luz. El Puente de Guayllabamba, visto desde el aire, cumple ese pacto con una naturalidad admirable. No pretende ser monumental; sólo estar bien. Su belleza no es la del gesto heroico, sino la de la lógica silenciosa: cada línea responde a una fuerza, cada proporción a una necesidad.

El vuelo del drone permitió contemplar esa belleza desde una distancia que no resta emoción. Al contrario, verla desde arriba la amplifica: el tablero se convierte en trazo, las sombras en texto, el valle en escenario.

La ingeniería, cuando se realiza con rigor y humildad, produce una estética propia: la del equilibrio. Y en ese equilibrio entre forma y función, entre resistencia y economía, se revela la grandeza discreta del oficio de construir.

Recomendaciones para la conservación preventiva

Del análisis efectuado se desprenden algunas recomendaciones prácticas que trascienden este caso concreto:

1. Implementar programas periódicos de inspección con RPAS, especialmente tras

temporadas de lluvia o actividad sísmica, para registrar la evolución de fisuras y corrosiones.

2. Combinar la observación visual con técnicas complementarias (termografía, fotogrametría 3D, ensayos no destructivos) que permitan vincular imagen y cuantificación.
3. Integrar los resultados en un sistema digital de gestión del mantenimiento, con fichas georreferenciadas por elemento estructural.
4. Formar equipos multidisciplinarios donde ingenieros, arquitectos, geotécnicos y especialistas en seguridad trabajen de manera coordinada.
5. Promover una cultura de conservación preventiva, que entienda la inspección no como gasto, sino como inversión en sostenibilidad y seguridad pública.

Estas propuestas apuntan hacia un nuevo paradigma en la ingeniería civil: la infraestructura inteligente, aquella que se conoce a sí misma a través de sus datos,



que se mide y se cuida como un organismo vivo.

La medida, la razón y el significado

En última instancia, toda la investigación puede condensarse en una tríada: medida, razón y significado. La medida es el dominio de la ciencia: la cifra que describe, compara y verifica. La razón es el dominio del método: el juicio que organiza los datos y los convierte en conocimiento. El significado es el dominio de la cultura: el sentido que une al ser humano con lo que crea.

Cuando estas tres dimensiones se entrelazan, el cálculo se convierte en una forma de sabiduría. El drone, en su vuelo silencioso, encarna esa alianza: una máquina que mide con precisión, pero también que observa con respeto. Su mirada es a la vez técnica y ética, objetiva y compasiva.

En ella, la ingeniería civil se reencuentra con su origen humanista: el de construir no solo estructuras, sino continuidades; no solo caminos, sino memoria.

Epílogo

A la luz de los resultados, la inspección realizada sobre el Puente de

Guayllabamba puede interpretarse no solo como un caso de estudio, sino como una expresión representativa de un cambio de enfoque en la ingeniería contemporánea, en el que la tecnología se orienta prioritariamente hacia la prevención y la reducción del riesgo. En este marco, conservar no implica oponerse al paso del tiempo, sino comprender sus efectos y actuar de forma anticipada sobre ellos.

El uso del RPAS como herramienta de inspección se inscribe en esta lógica: el ingeniero observa la estructura desde una nueva posición, distinta en medios pero análoga en intención a la del constructor que, en otros contextos históricos, buscaba medir, entender y dar forma a un sistema resistente coherente. La tecnología no sustituye ese gesto, sino que lo prolonga.

De este modo, la inspección estructural se convierte en un punto de encuentro entre análisis técnico y responsabilidad cultural. El puente deja de ser únicamente un artefacto funcional para afirmarse como una obra que articula territorio, técnica y uso. Mientras exista una mirada capaz de observar, medir e interpretar su comportamiento, la estructura mantendrá su condición esencial: no solo



la de soportar cargas, sino la de seguir formando parte activa del paisaje construido y de la cultura que lo sostiene.

REFERENCIAS

Abad-Auquilla, A. (2020). El cambio de uso de suelo y la utilidad del paisaje periurbano de la cuenca del río Guayllabamba en Ecuador. *Revista de Ciencias Ambientales*, 54(2), 68–91.

<https://doi.org/10.15359/rca.54-2.4>

ADIF. (2025a). *Norma ADIF Plataforma: Inspección básica de puentes de ferrocarril (NAP 2-4-0.0, 1.^a ed., Erratum 1 y Modificación M1)*. Administrador de Infraestructuras Ferroviarias (ADIF).

ADIF. (2025b). *Norma ADIF Plataforma: Inspección principal de pasos superiores sobre el ferrocarril (NAP 2-4-1.4, 2.^a ed.)* (2^a). Administrador de Infraestructuras Ferroviarias (ADIF).

Aldana Rodríguez, D., Lozano Tafur, C., Melo Daza, P. F., Villalba Vidales, J. A., & Daza Rincón, J. C. (2024). Inspection of aircrafts and airports using UAS: A review. *Results in Engineering*, 22.

<https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102330>

Calavera Ruiz, J. (2005). *Patología de Estructuras de Hormigón Armado y Pretensado*. INTEMAC.

Campo Molinuevo, Í. (2015). Aplicaciones en el Control de Obras y Evaluación de Impactos. In *Los drones y sus aplicaciones a la ingeniería* (pp. 149–160). Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid. <https://www.fenercom.com/wp-content/uploads/2015/03/Los-Drones-y-sus-Aplicaciones-a-la-Ingenieria-Civil-fenercom-2015.pdf>

Choudhury, J., & Hasnat, A. (2015). Bridge collapses around the world: Causes and mechanisms. *IABSE-JSCE Joint Conference on Advances in Bridge Engineering-III*, August, 651. https://www.researchgate.net/publication/281280663_Bridge_collapses_around_the_world_Causes_and_mechanisms

Corvo, F., Pérez, T., Martín, Y., Reyes, J., Dzib, L. R., González-Sánchez, J., & Castañeda, A. (2008). Time of wetness in tropical climate:



- Considerations on the estimation of TOW according to ISO 9223 standard. *Corrosion Science*, 50(1), 206–219.
<https://doi.org/10.1016/j.corsci.2007.06.012>
- Dirección General de Aviación Civil. (2024). *RDAC 101 – Sistemas de aeronaves no tripuladas (UAS)*. Dirección General de Aviación Civil.
<https://www.aviacioncivil.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2024/12/RDAC-101-UAS.pdf>
- Escudero Castro, H. C. (2014). Manual de Patología y Rehabilitación de Edificios. *Gremium*, 1(2), 68–69.
<https://doi.org/10.56039/rgn02a06>
- Falorca, J. F., Miraldes, J. P. N. D., & Lanzinha, J. C. G. (2021). New trends in visual inspection of buildings and structures: Study for the use of drones. *Open Engineering*, 11(1), 734–743.
<https://doi.org/10.1515/eng-2021-0071>
- Fan, J., & Saadeghvaziri, M. A. (2019). Applications of drones in infrastructures: Challenges and opportunities. *Int J Mech Mechatron Eng*, 13(10), 649–655.
https://www.researchgate.net/profile/Jin-Fan-11/publication/336262417_Applications_of_Drones_in_Infrastructures_Challenges_and_Opportunities/links/5d974d84458515c1d393e0f1/Applications-of-Drones-in-Infrastructures-Challenges-and-Opportunities.pdf
- Fernández Cánovas, M. (1995). *Patología y terapeutica del hormigón armado*.
- Frankel, G. S., & Sridhar, N. (2008). Understanding localized corrosion. *Materials Today*, 11(10), 38–44.
[https://doi.org/10.1016/S1369-7021\(08\)70206-2](https://doi.org/10.1016/S1369-7021(08)70206-2)
- García de Miguel, J. M. (2009). *Tratamiento y conservación de la piedra, el ladrillo y los morteros en monumentos y construcciones* (Consejo General de Arquitectura Técnica España (ed.); 1ª).
- Gouvernement du Québec. (2017). *Manuel d'inspection des structures*. Ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports.
<https://www.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/produits-en->



- ligne/ouvrages-routiers/guides-et-manuels/ouvrages-dart/manuel-inspection-des-structures/
- Gutiérrez Sandoval, C. D., Takemoto Silva, T. A., Venegas Minchola, B. A., Vidondo Chafloc, G., & Villanueva Ramos, J. R. (2024). Analysis of Critical Success Factors for the Implementation of Drones in the Logistics Sector: Systematic Review. *Gestión de Operaciones Industriales*, 3(1), 48–63. <https://doi.org/10.17268/goi4.0.2024.03>
- Hernández, F. J. M., González, V. B., & Briz, X. M. (2023). Drone (RPAS) detection methodology for prehistoric rock art surveying. *Lucentum*, 42, 33–50. <https://doi.org/10.14198/LVCENTVM.23467>
- Kardach, M., Fuć, P., Galant, M., & Maciejewska, M. (2019). Risk Assessment of Remotely Piloted Aircraft Systems. *Journal of Konbin*, 49(1), 95–106. <https://doi.org/10.2478/jok-2019-0005>
- Kurbanov, R. K., & Zakharova, O. M. (2020). Recommendations for UAV Pre-Flight Preparation. *Elektrotekhnologii i Elektrooborudovanie v APK*, 67(1), 93–98. <https://doi.org/10.22314/2658-4859-2020-67-1-93-98>
- Lan, R. D. O. (2020). Aparelhos de apoio fretado de neoprene: Uma revisão. *Revista Tecnologia*, 41(1). <https://doi.org/10.5020/23180730.2020.10602>
- Lu, J. C., Wang, Z. B., Hu, H. X., & Zheng, Y. G. (2024). Understanding localized corrosion mechanism of 90/10 copper-nickel alloy in flowing NaCl solution induced by partial coverage of corrosion products films. *Corrosion Science*, 227. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2023.111716>
- Ministerio de Fomento. (2009). *Guía de inspecciones básicas de obras de paso: Red de Carreteras del Estado*. Ministerio de Fomento. Secretaría General Técnica. Centro de Publicaciones. https://cdn.fomento.gob.es/portal-web-drupal/inspecciones_obras_paso.pdf
- Ministerio de Fomento. (2012). *Guía*



- para la realización de inspecciones principales de obras de paso en la Red de Carreteras del Estado.* Ministerio de Fomento. Secretaría General Técnica. Centro de Publicaciones.
https://www.transportes.gob.es/recursos_mfom/0870250.pdf
- New York State Department of Transportation. (2024). *Bridge Inspection Manual*. New York State Department of Transportation, Office of Structures.
<https://www.dot.ny.gov/divisions/engineering/structures/manuals/bridge-inspection>
- Oñate de Mora, M. (2015). Tipología de aeronaves pilotadas por control remoto. In *Los drones y sus aplicaciones a la ingeniería* (pp. 49–56). Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid.
<https://www.fenercom.com/wp-content/uploads/2015/03/Los-Drones-y-sus-Aplicaciones-a-la-Ingenieria-Civil-fenercom-2015.pdf>
- Perez Jimeno, S., Capa Salinas, J., Perez Caicedo, J. A., & Rojas Manzano, M. A. (2023). An integrated framework for non-destructive evaluation of bridges using UAS: a case study. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, 8(2).
<https://doi.org/10.1007/s41024-023-00299-x>
- Rashidi, M., & Samali, B. (2021). Health monitoring of bridges using rpas. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 101, 209–218.
https://doi.org/10.1007/978-981-15-8079-6_20
- Rodríguez Elizalde, R. (2022a). Birds Effects on Heritage Buildings. *Environmental Analysis & Ecology Studies*, 10(2), 1119.
<https://doi.org/10.31031/eaes.2022.10.000732>
- Rodríguez Elizalde, R. (2022b). Structural Inspection by RPAS (Drones): Quality Work with Preventive Guarantee. *Journal of Engineering and Applied Sciences Technology*, 1–11.
[https://doi.org/10.47363/jeast/2022\(4\)143](https://doi.org/10.47363/jeast/2022(4)143)
- Rodríguez Elizalde, R. (2024a). Assessment of Architectural Heritage and Historic Structures Through Aerial Thermography. *Revista de Gestão Social e Ambiental*, 18(10), e08761.
<https://doi.org/10.24857/rgsa.v18n>



10-105

ur.00717

- Rodríguez Elizalde, R. (2024b). Comprehensive Technical Inspection of a Medieval Bridge (Ponte de Vilanova, in Allariz) Using Microtechnological Tools. *Eng*, 5(4), 3259–3283. <https://doi.org/10.3390/eng5040171>
- Rodríguez Elizalde, R. (2024c). Use of RPAS (DRONES) for Masonry Arch Bridges Inspection: Quality and Sustainable Work with Preventive Guarantee. *Revista De Gestão Social E Ambiental*, 18(12). <https://doi.org/https://doi.org/10.24857/rgsa.v18n12-048>
- Rodríguez Elizalde, R. (2025). Drones as a tool for the sustainable conservation of heritage metal Structures. *International Journal of Innovative Research and Scientific Studies*, 8(3), 405–426. <https://doi.org/10.53894/ijirss.v8i3.6542>
- Sándor, Z. (2023). Challenges of the visual line of sight operations of unmanned aerial vehicles. *Acta Technica Jaurinensis*, 16(4), 167–173. <https://doi.org/10.14513/actatechja>
- Seo, J., Duque, L., & Wacker, J. (2018). Drone-enabled bridge inspection methodology and application. *Automation in Construction*, 94, 112–126. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.06.006>
- Strieška, M., Koteš, P., & Sedmak, A. (2018). Decreasing bridge members resistance due to reinforcement corrosion. *Procedia Structural Integrity*, 13, 1745–1750. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2018.12.366>
- Toirac Corral, J. (2004). Patología de la construcción: grietas y fisuras en obras de hormigón; origen y prevención. *Ciencia y Sociedad*, 29(1), 72–114. <https://doi.org/10.22206/cys.2004.v29i1.pp72-114>
- Washington State Department of Transportation. (2025). *Washington State Bridge Inspection Manual. M 36-64.15*. Washington State Department of Transportation, Bridge Preservation Engineer. <https://wsdot.wa.gov/engineering-standards/all-manuals-and-standards/manuals/bridge->



inspection-manual