

## **Modelamiento térmico 3D aplicado a la inspección de infraestructuras usando vehículos aéreos no tripulados**

Luis Felipe Aguirre Siachoque

### **Resumen**

Existe una tendencia creciente en el uso de vehículos aéreos no tripulados (UAV) para realizar trabajos de inspección de infraestructuras ya que proporciona ventajas únicas en comparación con métodos tradicionales de inspección, porque ha demostrado ser una herramienta de carácter no invasiva, flexible, precisas, eficientes y de bajo coste comparada con el uso de otras herramientas y métodos convencionales, que permiten un evidente ahorro en los costos de adquisición de información, así como también la reducción de probabilidad de accidentes humanos en las inspecciones, sin embargo respecto al uso de sensores térmicos a bordo de UAV existen grandes vacíos que aún deben ser investigados a mayor detalle, tales como sesgos en la automatización del procesamiento de datos, desarrollo de metodologías en función del tipo de infraestructura, otros. En este estudio se realiza la reconstrucción fotogramétrica de un modelo 3D en base a imágenes aéreas térmicas obtenidas con una cámara térmica a bordo de un UAV, a partir de este modelo térmico 3D se procedió a realizar la inspección y detección visual de anomalías térmicas en el edificio patrimonial de El Ingenio, lográndose detectar 107 anomalías de las cuales de las cuales, 62 anomalías fueron verdaderos positivos, 20 como falsos positivos y 25 anomalías fueron identificadas como falsos negativos, finalmente la investigación concluyó un índice de precisión del 75.61% y 71.26% para el índice de repetición.

### **Palabras Clave**

Vehículos Aéreos No Tripulados; Sensores Térmicos; Modelamiento 3D; Inspección; Infraestructura.

### **Drone-based Thermal 3D Modeling applied to infrastructure inspection**

### **Abstract**

There is a growing trend in the use of unmanned aerial vehicles (UAVs) to perform infrastructure inspection work as it provides unique advantages compared to traditional inspection methods, because it has proven to be a non-invasive, flexible, accurate tool, efficient and low cost compared to the use of other conventional tools and methods, which allow an evident saving in the costs of information acquisition, as well as the reduction of probability of human accidents in the inspections, however with respect to the use of sensors thermal aboard UAV there are large gaps that still need to be investigated in greater detail, such as biases in the automation of data processing, development of methodologies depending on the type of infrastructure, others. In this study, the photogrammetric reconstruction of a 3D model based on thermal aerial images obtained with a thermal camera on board a UAV is carried out. From this 3D thermal model, the visual inspection and detection of thermal anomalies was carried out. El Ingenio heritage building, detecting 107

anomalies of which 62 anomalies were true positive, 20 as false positives and 25 anomalies were identified as false negatives, finally the research concluded an accuracy index of 75.61% and 71.26% for the repetition rate.

## Keywords

Unmanned Aerial Vehicles; Thermal Sensor; 3D Modeling; Inspection; Infrastructure

## Introducción

[1] define la inspección de la infraestructura, como la evaluación de las condiciones físicas y funcionales de los sistemas de infraestructura civil como: edificios, carreteras, puentes y tuberías de alcantarillado y agua; donde el proceso de inspección está basado en la visión, con la finalidad de detectar cualquier cambio visual como: derrames, grietas, corrosión o cualquier otro tipo de anomalías presentes en las estructuras durante el transcurso del tiempo.

[2] afirma que el sector de la construcción en Estados Unidos, representa alrededor del 76% del consumo de energía eléctrica y el 40% del consumo de energía primaria donde equipos de calefacción, ventilación, iluminación y aire acondicionado consumen alrededor del 35% en edificios residenciales y el 11% la energía total del edificio en edificios comerciales; [3] detectó mediante el uso de tecnología infrarroja, un 40% de pérdida de energía un total de 135 casas residenciales en la zona metropolitana de Massachusetts – Boston, debido a fugas de aire a través de grietas y fracturas en las infraestructuras encuestadas. [4] manifiesta que un UAV junto con sensores infrarrojos es un método no destructiva ni invasivo que permiten a los inspectores analizar las infraestructuras con eficiencia, precisión en

cortos periodos de tiempo, reduciendo los costos de operación y riesgos en la operación de inspección especialmente en lugares de difícil acceso [5], [6].

Es claro que inspecciones de rutina y mantenimiento son esenciales para el buen funcionamiento de infraestructuras civiles, eléctricas, marinas, nuclear, petróleo, mecánica, oceánica; paradójicamente las prácticas de inspección convencionales se las realiza con menos frecuencia debido a los altos costos, así como los tiempos de larga duración de los procedimientos que implican el desarrollo de éste tipo de trabajos, lo que ocasiona en algunos casos la paralización y/o interrumpiendo del funcionamiento de la infraestructura. [7]. Por otro lado, los métodos convencionales de inspección están sujetos a la subjetividad, experiencia, habilidad y criterios del inspector, lo que conduce a resultados muy limitados y en algunos casos pueden considerados como irrelevantes y no justifican los altos costos por conceptos de inspección.

El uso comercial de los vehículos aéreos no tripulados comúnmente conocidos como UAV (Unmanned Aerial Vehicles), ha tenido un uso creciente de tipo exponencial, debido a la gran versatilidad de uso en casi cualquier campo de aplicación, ya que esta tecnología aporta con una gran capacidad para documentar, comunicar, captar, registrar una gran cantidad de condiciones en tiempo real en función del tipo de sensores a bordo de los UAV a un costo relativamente accesible comparado con el uso de otras tecnologías.

Los vehículos aéreos no tripulados pueden ser categorizados como: un solo rotor, multirotor, ala fija y versiones mixtas (rotor y ala fija) [8]; en el campo de la inspección de infraestructuras los multirrotores tienen claras ventajas en comparación con otros

sistemas como: robustez, fácil maniobrabilidad en espacios pequeños, bajos costos de adquisición, control de variación de la velocidad, capacidad de carga y fácil adaptación para la instalación de sensores adicionales[9]. En este sentido el uso de UAV se ha convertido en una práctica popular y cada vez más usual para realizar trabajos de: inspecciones, evaluaciones, seguimientos de trabajos y obras, ya que proporciona ventajas únicas en comparación con métodos tradicionales de adquisición de información porque ha demostrado ser una herramienta de carácter no invasiva, flexible, precisas, eficientes, de bajo coste comparada con el uso de otras herramientas y métodos convencionales, que permiten un evidente ahorro en los costos de adquisición de información, así como también la reducción de probabilidad de accidentes humanos en las inspecciones [10]–[12], fácil creación de informes detallados, así como la posibilidad de adquirir información con mayor frecuencia. [7] realiza una revisión bibliográfica exhaustiva de 53 artículos científicos publicados referente a tecnologías de inspección visual de infraestructuras; esta revisión reveló que los datos recopilados por estas tecnologías se utilizaron para aumentar la evaluación cualitativa; también se evidenció la utilización de algoritmos, tales como: detección de objetivos y mejoramiento de las imágenes, para la reducir el sesgo del criterio del inspector; por otro lado los algoritmos de planificación de rutas en las tareas de navegación y control ayudaron a reducir la carga de trabajo del inspector.

Muchos autores concuerdan que el uso de UAV en la inspección de infraestructuras, aumentan la valoración cuantitativa de la inspección, conduciendo a la obtención de conclusiones más confiables y objetivas, debido a que los UAV pueden estar equipados con una diversidad de sensores

(ópticos, multispectrales, termales, láser, LiDAR, termómetros, barómetros, otros) que junto a sistemas de alta precisión de posicionamiento global (GPS) que permiten la adquisición precisa de un sin número de información complementaria cualitativa y cuantitativa [11], [13], [14], la cual está a disposición en tiempo real del inspector y ésta permitirá tener más elementos de convicción para tomar decisiones y llegar a conclusiones más confiables respecto a la gestión de la infraestructura [10], considerando una reducción significativa de riesgo del inspector ya que no existe la necesidad de que el inspector esté físicamente o en contacto directo físico con la infraestructura [15]. Adicionalmente las inspecciones oportunas pueden descubrir oportunamente áreas dañadas o con una alta probabilidad de convertirse en dañadas, es decir puede conducir al descubrimiento de problemas potencialmente peligrosos, de esta manera se pueden evitar graves accidentes que conducirán a pérdidas económicas, ambientales y humanas.

Los UAV permiten automatizar la mayor parte de los flujos de trabajo de control y navegación convirtiéndola en una inspección casi autónoma excepto la planificación de vuelo, el despegue y aterrizaje, lo que permiten reducir la carga de trabajo del inspector haciendo más fácil el desarrollo de los trabajos mejorando significativamente la productividad, eficiencia y precisión del proceso de inspección, con lo que se reduce tanto la subjetividad del inspector [16]–[18], también permiten realizar la inspección sin la necesidad de interrumpir el funcionamiento normal del sistema de la infraestructura [19], así como su exposición ante cualquier posible evento adverso que puede desencadenar en un accidente; sin embargo, el uso correcto de los UAV demanda cierto conocimiento cognitivo y

capacidades físicas por parte de los inspectores. Por otro lado también es importante mencionar ciertas desventajas asociadas al uso de estas tecnologías, por ejemplo es necesario aclarar que el uso de estas tecnologías se pueden ver afectadas significativamente por perturbaciones externas en el entorno [10], también debido a que la mayor parte del proceso de inspección está automatizado es muy probable que a corto plazo el inspector vaya perdiendo conciencia, conocimiento de la situación, percepción de los elementos del entorno, sesgo de automatización, exceso de confianza en el sistema y sentido suspicaz de vigilancia para la detección de alguna anomalía en la inspección. Es muy importante tener en cuenta estas ventajas y desventajas, donde el inspector debería ser consciente y entender todas estas limitaciones asociadas al momento de utilizar estas tecnologías [20]–[23], finalmente aún existen grandes vacíos que aún deben ser investigados a mayor detalle, tales como: sesgos en la automatización del procesamiento de datos y desarrollo de metodologías en función del tipo de infraestructura.

Las aplicaciones en este campo son infinitas, por ejemplo, en la inspección visual para la identificación de daños respecto a tanques de almacenamiento, puentes [24]–[28], edificios [29], monitoreo de carreteras [30], líneas de transmisión, monitoreo de tuberías, detección de fugas y grietas [31]–[34], búsqueda y operaciones de rescate, evaluación rápida en caso de algún desastre medio ambiental, topografía con fines de construcción [35]–[37], gestión de la construcción [29], [38]–[40], gestión de la calidad durante el proceso de construcción [41]–[43], gestión de demolición de infraestructuras [44]

La tendencia de uso para temas de inspección de infraestructuras está inclinándose por el uso de sensores a bordo de UAV debido a que la intervención humana en operaciones de inspección y evaluación en diversos tipos de infraestructuras es de alto riesgo y peligro, por lo tanto, los usos de un UAV se convierten en una opción económicamente viable, debido a que permiten automatizar los procesos de adquisición de datos a altas frecuencias temporales; sin embargo, actualmente existen varias opciones de sensores (ópticos, multiespectrales, térmicos) y varios tipos de UAV (de ala fija, de rotor y sistemas mixtos) para realizar este tipo de trabajos de inspección, lo que desencadena un sin número de preguntas y cuestionamientos referente a que configuración de UAV y sensor es el más adecuado para realizar un determinado tipo de trabajo. Considerando estos antecedentes, las preguntas de investigación planteadas en este estudio son:

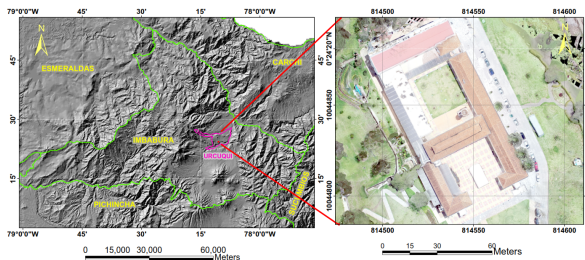
1. ¿Qué tipo de UAV es el más adecuado para realizar tareas de inspección?
2. ¿Es posible detectar anomalías en la inspección de infraestructuras mediante el uso de sensores térmicos a bordo del UAV?
3. Los modelos 3D térmicos son útiles para detectar anomalías térmicas en infraestructuras

## **Desarrollo**

### **Área de Estudio**

El estudio se desarrolló en un edificio patrimonial, el Ingenio Azucarero San José es un inmueble patrimonial que se construyó dentro de la Hacienda San José localizada en el cantón San Miguel de Urququí a 22 km del noroccidente de la capital de Imbabura en

Ecuador, este edificio es una infraestructura que data del año 1910, estuvo dotado con maquinaria alemana e impulsado por un sistema de acueducto bañado por las aguas de la cuenca hídrica de la Reserva Cotacachi-Cayapas, se constituyó como uno de los ingenios más avanzados del país y de la región. En 1964 migró del sistema de acueducto a la utilización de energía eléctrica, en su mejor época llegó a producir 240 sacos de azúcar diarios, que se comercializaban en la zona norte del país principalmente en las ciudades de Quito e Ibarra, El Ingenio paró sus operaciones en 1992 debido al surgimiento de nuevas industrias. Actualmente sobre el complejo de El Ingenio se implementaron la: biblioteca, laboratorios, aulas y oficinas administrativas de la Universidad de Investigación Yachay Tech, esta iniciativa nace de la interacción de dos conceptos: el paisaje y el aprendizaje, logrando un sistema de recorridos que hacen que la estructura sirva para el conocimiento y de fondo para apreciar el paisaje (Ver Fig.1)



**Figura 1: Localización geográfica del área de estudio**

## Materiales y Equipos

Es evidente que no existe un protocolo estándar único y exitoso aplicable a todo tipo de infraestructura, debido a que cada infraestructura presenta características únicas, condiciones geográficas, ambientales y climáticas distintas; de manera general existen procedimientos

estándares respecto a materias de inspección basados en (a) técnicas visuales, (b) técnicas analíticas (modelos 3D, uso multisensores, láser, infrarrojo para mejorar detección anomalías como grietas, fracturas, corrosión, etc.) y (c) técnicas incorporando sensores estructurales que permitirán examinar la salud y análisis estructural de las infraestructuras [45]. De manera general existen ciertos parámetros de gran relevancia que deben considerarse al momento de escoger una u otra opción y/o configuración que tienen que ver con obtener el mejor rendimiento, precisión y versatilidad en el cumplimiento exitoso de una inspección. [45] y el autor de esta investigación proponen los siguientes parámetros a tomarse en cuenta:

1. Tiempo de vuelo: se debería considerar UAV que tengan autonomía de vuelo de mínimo 20 minutos por cada juego de baterías, con el fin de que se convierta en eficiente la inspección.
2. Capacidad de adaptación de sensores a bordo: Mientras más versátil y flexible sea el UAV para llevar sensores a bordo será más útil el UAV; es decir si UAV está adaptado para volar con una cámara óptica, multiespectral o termal y capacidad de video de alta resolución será un equipo mucho más útil que un UAV que solo pueda volar con una cámara óptica.
3. Capacidad de carga útil: un UAV que tenga capacidad de carga adicional, presenta ventajas significativas ante otros UAV.
4. Iluminación adicional: emisores de luz instalados al UAV proporcionará cierta iluminación extra que se requiere para mejorar la inspección visual en ciertas infraestructuras complejas.
5. Larga telemetría: normalmente las estructuras no siempre se encuentran cerca de la ubicación del inspector, por

tal motivo si el UAV posee una alta capacidad de alcance entre el control remoto y el equipo permitirá realizar inspecciones sin dificultad a estructuras localizadas a largas distancias.

6. Detección de Obstáculos: sensores de proximidad y detección de obstáculos, son consideradas como características sobresalientes que sin duda le da un valor agregado significativo a los UAV que permiten este tipo de configuración.
7. Versatilidad de operación: en materia de inspección de infraestructuras se requiere que el UAV permita tareas de operación tanto automatizadas como manuales, adicionalmente con la ayuda de los sensores de proximidad debe permitir volar en modo manual a escasos metros de la infraestructura con el fin de constatar, verificar o descartar la existencia o no de alguna anomalía detectada.

El UAV utilizado en esta investigación fue un dron de marca DJI, modelo: Matrice 600 Pro, el cual está equipado con un sistema modular de redundancia triple DJI A3 Pro y funciones de vuelo inteligentes para garantizar un funcionamiento seguro y estable en todo momento; este dron cuenta con seis baterías de vuelo inteligente, con un diseño mecánico con tren de aterrizaje retráctil de despliegue rápido y brazos plegables incorporados, lo que permite obtener visitas despejadas en 360 grados desde su cámara. Con un peso sin carga de 9.5 kg y un peso máximo en orden de vuelo de 15.5 kg, el Matrice 600 Pro es un equipo capaz de satisfacer las necesidades específicas de una multitud de sensores [46]. El sensor a bordo del UAV fue una cámara térmica infrarroja de onda larga de marca FLIR modelo Zenmuse XT; esta cámara proporciona imágenes infrarrojas de alta sensibilidad ( $<50 \text{ mK}@f/1.0$ ) a 640/30 fps con lente de 9 mm, al igual que con otros

sistemas de cardán DJI de 3 ejes, el sensor Zenmuse XT se puede montar en el UAV Matrice 100/200/600 o Inspire 1 y transmitir una vista en HD en vivo mediante la aplicación móvil gratuita DJI GO. Esto hace que el sensor sea excelente para aplicaciones térmicas aéreas tales como inspección y mantenimiento, búsqueda, rescate y en agricultura de precisión. Hay dos versiones del cardán y la cámara Zenmuse XT: Zenmuse XT-Performance y Zenmuse XT-Radiometry [47]. Para esta investigación, se utilizó la cámara Zenmuse XT-Radiometry; esta cámara puede medir la temperatura para cualquier posición en una imagen con una precisión de  $\pm 10^\circ\text{C}$ , cuando las condiciones ambientales son ideales, la cámara proporciona una precisión de  $\pm 5^\circ\text{C}$ .

## Metodología

El marco de la investigación se dividió en cuatro fases principales: (1) diseño de los planes de vuelo, trayectorias y ángulos de adquisición de las imágenes aéreas térmicas, (2) procesamiento fotogramétrico de las imágenes, generación de nube de puntos, modelamiento 3D térmico, (3) detección visual de anomalías térmicas de la infraestructura, y (4) validación in situ de las anomalías detectadas visualmente.

## Adquisición de Datos

En la fase de adquisición de imágenes termales aéreas, se tomaron en cuenta tres actividades generales al momento de adquirir datos por medio de UAV's descritas en [48], las cuales contemplan: 1) Diseño de las rutas y trayectorias de inspección, seguimiento, ángulos de adquisición, alturas de vuelo y planes generales de vuelo para el UAV; 2) Identificación de posibles puntos o áreas donde se presume que existe algún tipo de anomalías así como los puntos críticos para la captura de imágenes aéreas; y 3) tratamiento fotogramétrico para la

reproducción y modelamiento 3D de las imágenes aéreas.

Para lo cual se usó cámara térmica Zenmuse XT en un dron marca DJI modelo matrice 600 Pro, el UAV estaba controlado por un inspector que realizó el despegue y el aterrizaje de manera manual, mientras que la adquisición de imágenes fue considerando un plan de vuelo de carácter autónomo. [49] sugieren que la adquisición de datos termales se realicen antes del orto y ocaso del sol, para reducir la probabilidad de adquirir datos erróneos que conduzcan a falsos positivos debido a la radiación solar directa sobre la infraestructura, adicionalmente [50] recalca que existen otros factores climáticos o ambientales que pueden afectar las temperaturas superficiales de la infraestructura como por ejemplo: humedad, velocidad del viento, cobertura de nubes, precipitaciones previas, interferencias fuertes de ondas de radio o wifi en el aire [51]; por tal motivo el UAV sobrevoló 3 veces el edificio patrimonial El Ingenio el 8 de mayo de 2019 durante horas de la tarde y noche, específicamente entre las 18:00 y las 19:30 (hora local, UTC - 5 h), la altura de los dos vuelos fue de 35m y un vuelo sobre 40m el suelo con una superposición horizontal y vertical del 90%, un ángulo de cámara de 90° para el vuelo de tipo de doble cuadrícula a una velocidad constante de 2.0 m/s y un ángulo de cámara entre imágenes de 4° y 10° para los dos vuelos de tipo circular a una velocidad constante de 15.0 m/s (Ver Tabla N° 1).

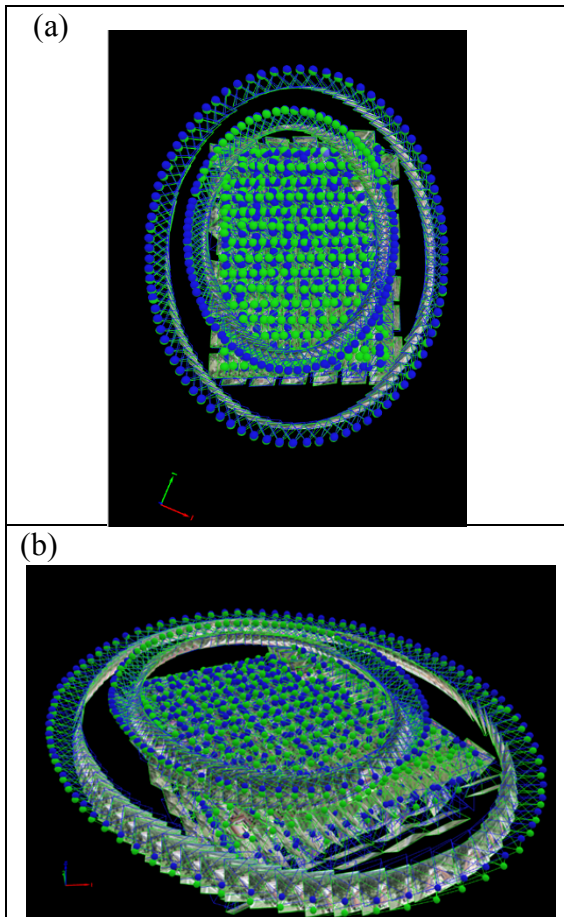
<b>Angulo de cámara (°)</b>	90	4° (entre imágenes)	10° (entre imágenes)
<b>Hora de adquisición (UTC - 5H)</b>	18:00 – 18:25	18:35 – 18:55	19:05- 19:25
<b>Resolución Espacial (cm)</b>	6,61	6,61	15,54

**Tabla N° 1: Configuración general de adquisición de imágenes térmicas para cada vuelo**

La cámara térmica radiométrica utilizada tiene una resolución de (640 x 512 x pixel), longitud focal: 529,412 pixel / 9 mm, tamaño de pixel: 17 μm. Las fotografías aéreas obtenidas tienen una resolución radiométrica de 24 bits y una resolución espacial de entre 6,61 cm y 15,54 cm; en resumen, se realizaron tres vuelos la misma tarde con diferentes ajustes de altura y ángulos de cámara, pero manteniendo constante la velocidad de adquisición para cada tipo de vuelo (doble cuadrícula y circular) y el mismo traslape horizontal y vertical del 90%; adicionalmente se tomaron fotografías fijas en varios ángulos y se grabaron videos los cuales se usaron para la reconstrucción del modelo térmico en 3D (Ver Fig. 2.)

**Figura 2: Planes de vuelo: (a) Doble cuadrícula y (b) Circular**

<b>Parámetro</b>	<b>1er Vuelo</b>	<b>2do Vuelo</b>	<b>3er Vuelo</b>
<b>Plan de Vuelo</b>	Doble Cuadrícula	Circular	Circular
<b>Altitud (m)</b>	35	35	40
<b>Velocidad (m/s)</b>	2	15	15
<b>Traslape Horizontal y Vertical (%)</b>	90	90	90



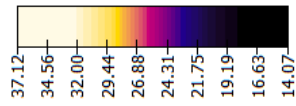
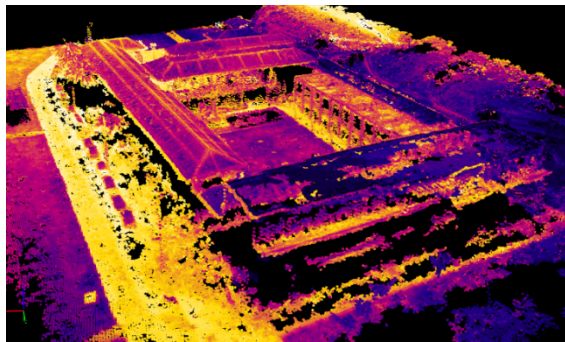
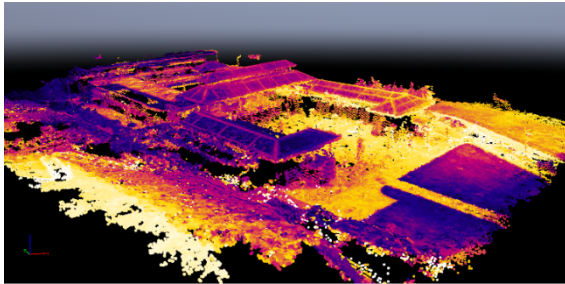
[11] sugiere que el diseño de la trayectoria (plan de vuelo) para el levantamiento de fachadas es de tipo cuadrícula y debe comenzar en una esquina y continuar con el barrido paralelo hasta la esquina final de esa línea de la fachada, luego bajar hasta continuar con la siguiente línea de vuelo y así sucesivamente hasta haber cubierto y documentado toda la fachada y finalmente el UAV continuará con la siguiente fachada. En nuestro caso debido a la gran cantidad de objetos (postes de luz, palmeras, árboles, autos, etc.) los cuales estaban a muy próximas a El Ingenio, algunas fachadas no fueron documentadas ni inspeccionadas a detalle; una vez concluidas las fachadas que, si fueron posibles documentar con el UAV, se procedió a documentar el techo considerando una trayectoria de tipo cuadrícula. En este estudio se realizaron dos vuelos complementarios considerando trayectorias circulares con ángulos entre imágenes  $4^\circ$  y  $10^\circ$  con el fin de aumentar el

número de matches y puntos en común, de esta manera optimizar el nivel de detalle del modelo 3D sobre todo en aquellas fachadas con presencia de obstáculos cercanos que imposibilitaron una adecuada adquisición de imágenes termales aéreas.

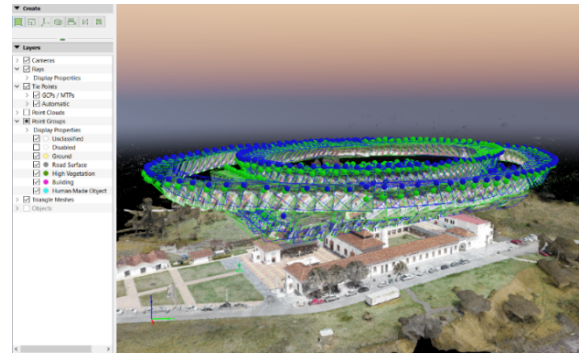
### Procesamiento Fotogramétrico

Se procesaron en total 695 fotografías aéreas en formato \*.jpg radiométrico (RJPG) el cual es una imagen RGB de 24 bits con compresión la cual incluye información radiométrica completa de datos de temperatura incorporados en cada píxel y es compatible con el software FLIR. El procesamiento fotogramétrico se realizó empleando el software Pix4D (Pix4D S.A, Switzerland), software que genera productos en 3D a partir de imágenes bidimensionales; el proceso fotogramétrico de reconstrucción 3D de imágenes se completó en 30 minutos, obteniéndose un promedio de 1629 keypoints por imagen, con una optimización de la cámara de 3,13% (diferencia relativa entre los parámetros de la cámara interna inicial y optimizada) y el número de coincidencias por imagen calibrada se procesó con una media aritmética de 409 coincidencias. Del proceso fotogramétrico se obtuvieron los siguientes productos basados en información térmica: (a) nube de puntos con valores de temperatura, (b) ortofotografía, malla, (c) modelo digital de superficie térmico y (d) modelo 3D térmico y un reporte detallado de control de calidad (Ver Fig. 3)

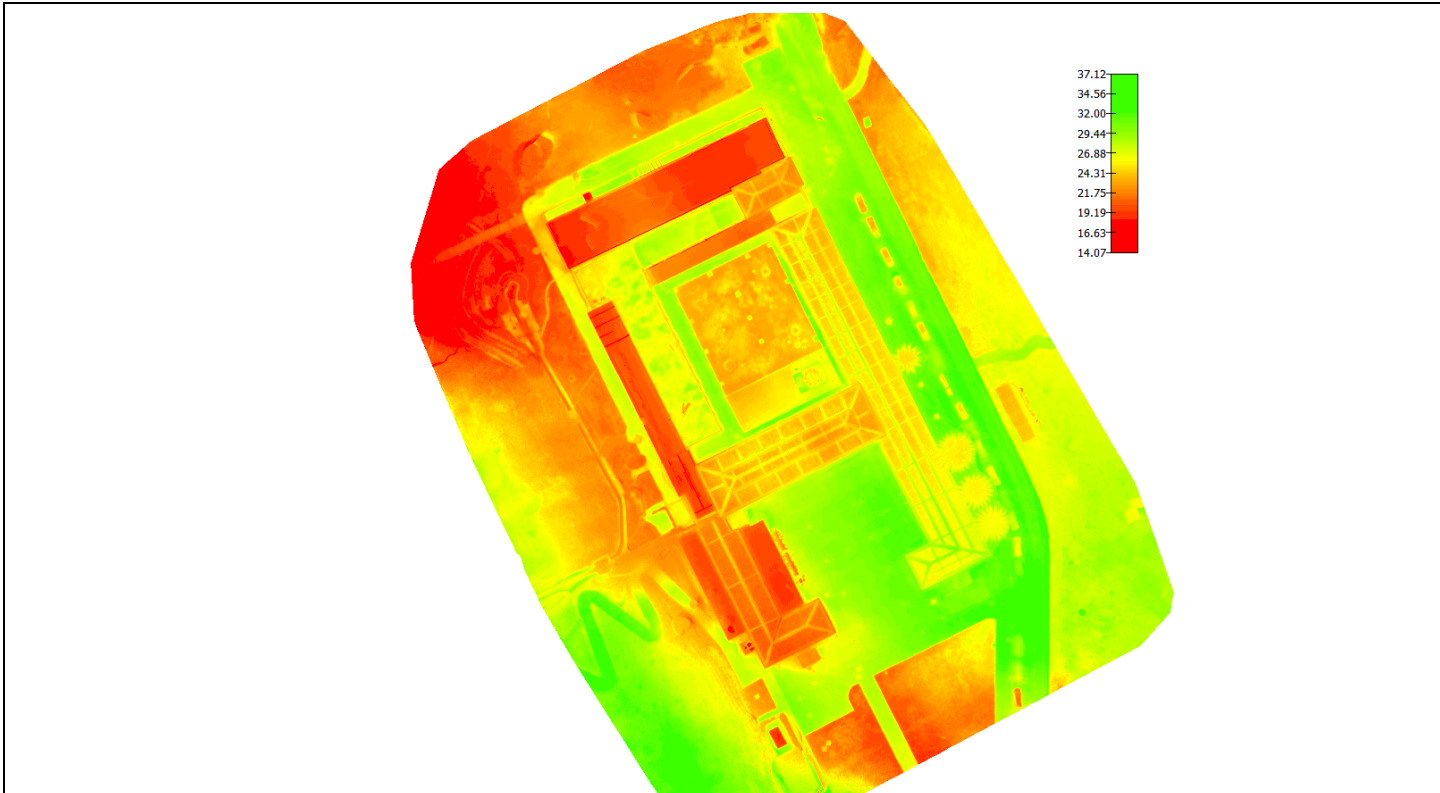
**(a) Nube de Puntos**



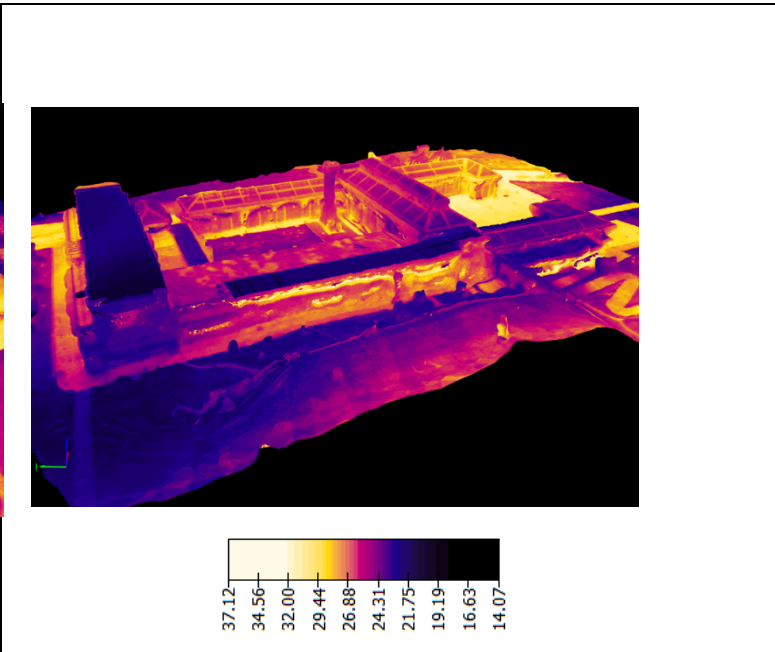
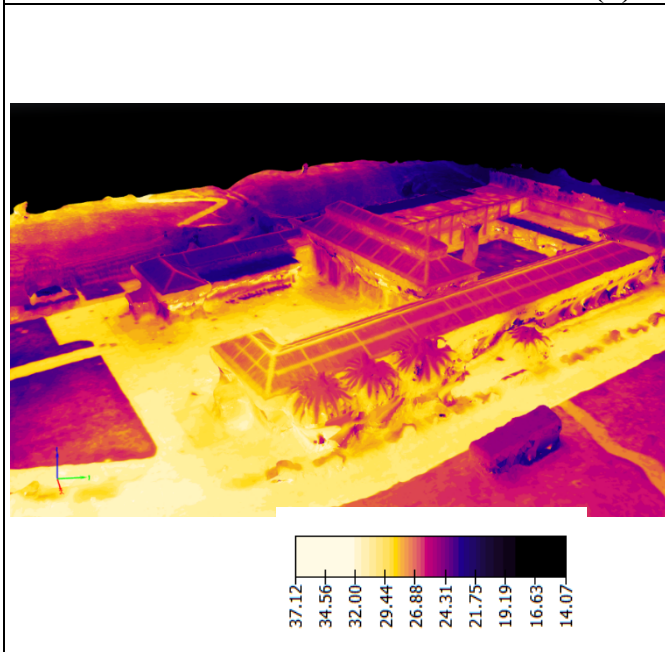
**(b) Ortofotografía Aérea**

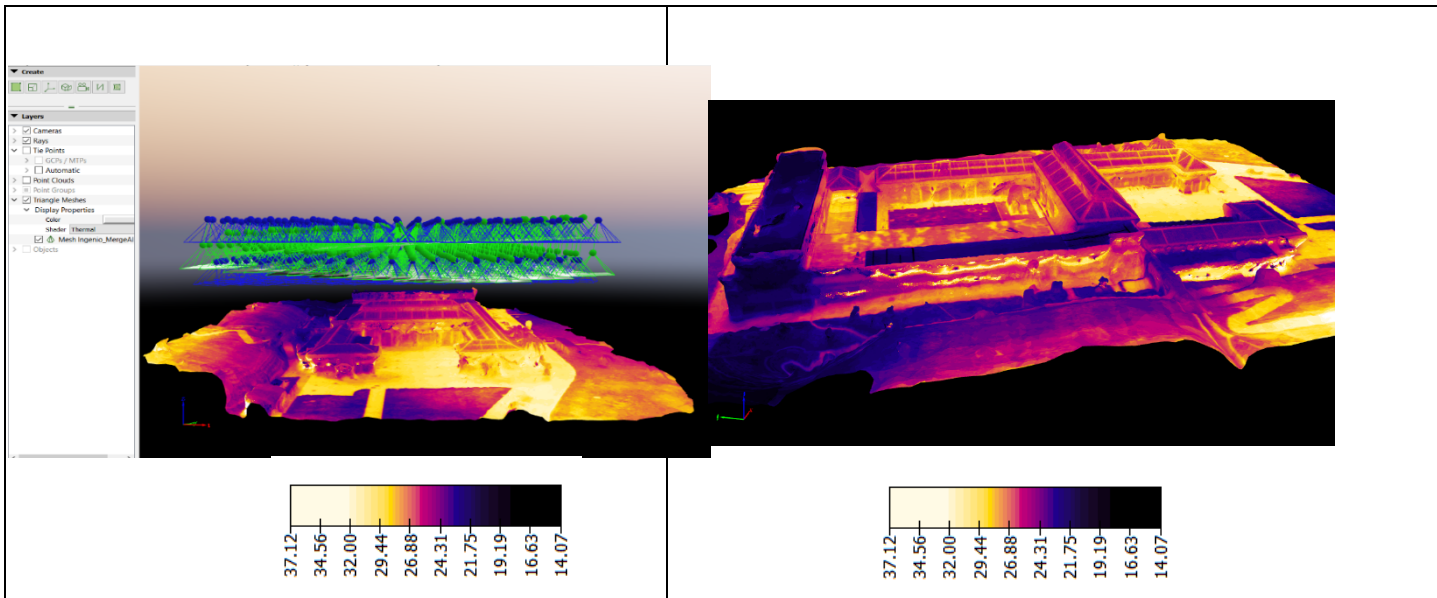


**(c) Modelo Digital de Superficie Térmico**



**(d) Modelo Termal 3D**





**Figura 3: Productos derivados a partir de las imágenes termal aéreas**

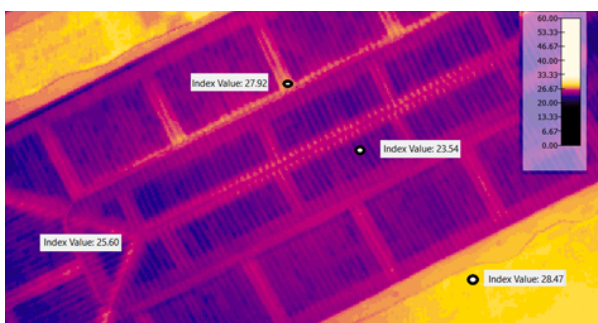
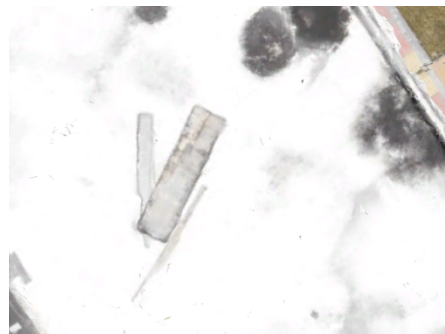
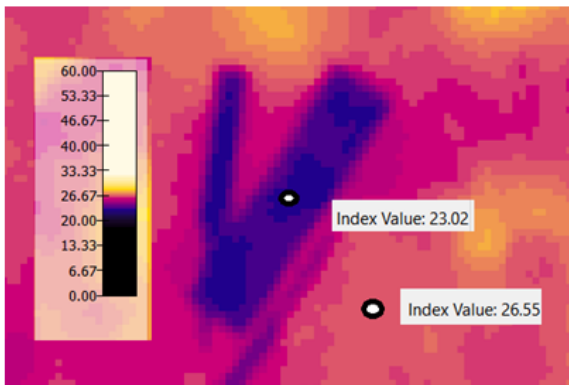
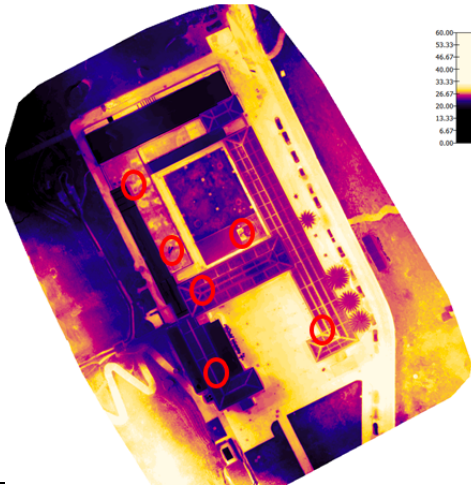
### Análisis Visual de Inspección

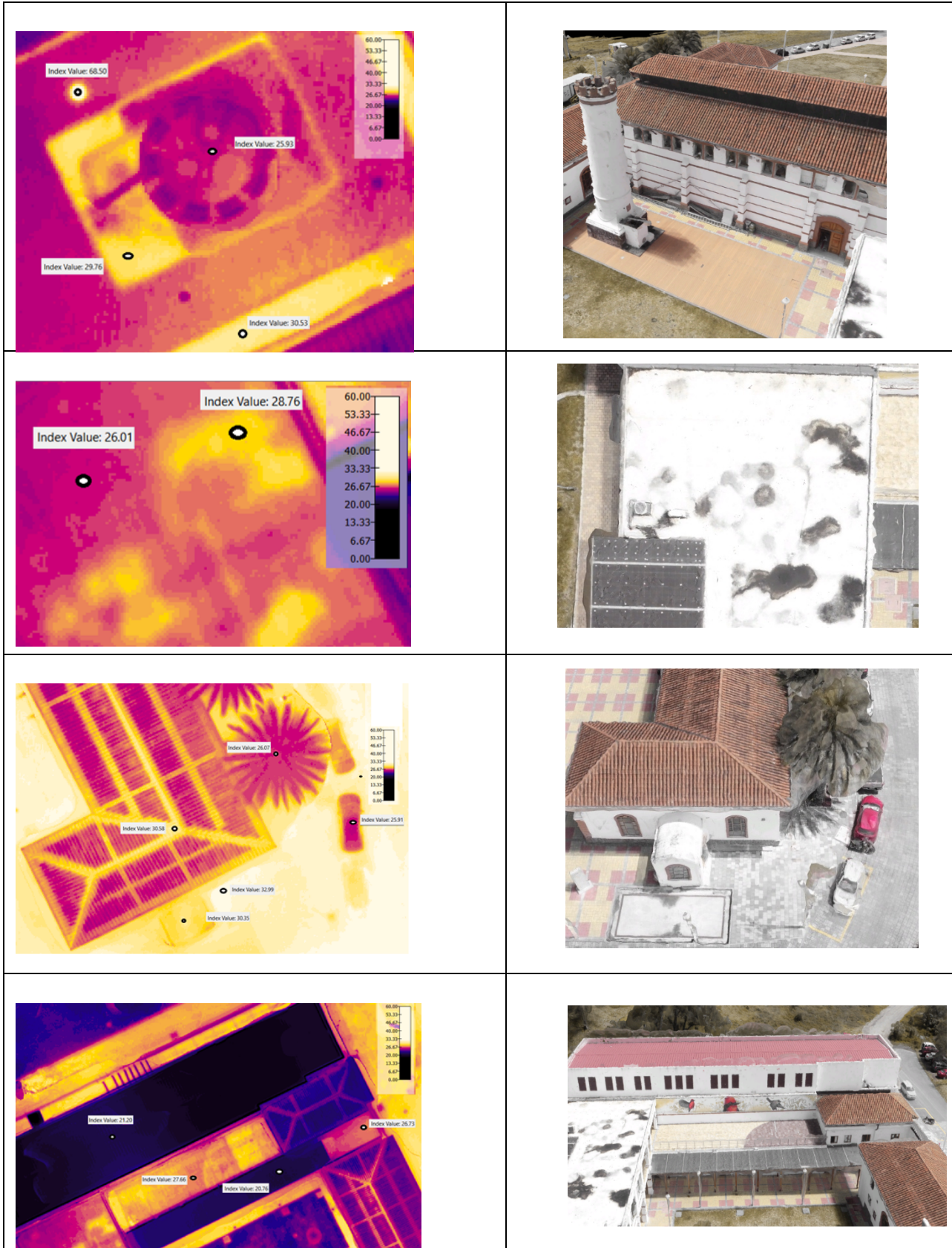
El análisis preliminar de inspección basado en la detección visual supone que una anomalía térmica se define como aquellas regiones en las que ocurren cambios repentinos o anormales de temperatura en una imagen térmica [50], por lo tanto la inspección visual en primera instancia se deberá centrar en buscar cambios bruscos de temperatura en la imagen los cuales son comúnmente denominados bordes térmicos, siempre considerando la posibilidad de introducir involuntariamente falsos positivos en el análisis preliminar. Un procedimiento común es la determinación de umbrales dinámicos mínimos y máximos para la detección inicial de anomalías de

temperatura, es decir cada objeto el cual es parte de la infraestructura en general tendrá umbrales específicos sobre los cuales se detectarán las posibles anomalías. Para este estudio se analizaron solamente el 34.10 % de todas las imágenes, es decir 237 de las 695 imágenes termal aéreas, esto se debe a que todas las fotografías se adquirieron con un alto porcentaje de traslape horizontal y vertical (90%) entre imágenes, lo que se traduce en que varias imágenes cubren casi la misma área de terreno.

Se detectaron visualmente 107 anomalías térmicas basados en la identificación de bordes térmicos en toda la infraestructura usando principalmente el modelo termal 3D y las 237 imágenes individuales (Ver Fig. 4)

### Detección Visual de Anomalías Térmicas





**Figura 4: Detección visual de anomalías termales**

## Validación in situ de las anomalías detectadas

Una vez finalizado el proceso de detección visual de anomalías, se procedió con la respectiva campaña de validación in situ, en la inspección de campo fueron verificadas 107 anomalías térmicas de las cuales, 62 anomalías como verdaderos positivos, 20 anomalías como falsos positivos y 25 anomalías fueron identificadas como falsos negativos. El método de evaluación para obtener el porcentaje de precisión se definió tal y como lo describe [50] como la fracción de anomalías verdaderas positivas entre la sumatoria de verdaderos positivos y falsos positivos; mientras que para el índice de repetición del trabajo se determinó como la fracción de anomalías verdaderas positivas entre la sumatoria de verdaderos positivos y falsos negativos (Ver Ecuación 1 y 2)

$$\text{Precisión} = \frac{Vp}{Vp+Fp} \quad (1)$$

$$\text{Índice de Repetición} = \frac{Vp}{Vp+Fn} \quad (2)$$

Donde:

**Vp:** Verdadero Positivo

**Fp:** Falso Positivo

**Fn:** Falso Negativo

Una puntuación alta de precisión significa que la mayoría de las detecciones de fugas o anomalías son reales, mientras que una puntuación alta de repetición significa que la mayoría de las anomalías reales son detectadas. La investigación concluyó un índice de precisión del 75,61% y 71,26% para el índice de repetición.

## Discusiones

La industria de la construcción ha sido una rama que ha adoptado lentamente la implementación de estas nuevas tecnologías emergentes [52], en consecuencia muy poca investigación se ha destinado a las posibles aplicaciones enfocados a la ingeniería de la construcción y gestión comparada con otros campos; sin embargo, los UAV de rotor han demostrado su potencial en facilitar la construcción en muchos aspectos [9], por ejemplo Chan, 2015, afirma que las inspecciones en puentes mediante el uso de UAV redujeron el costo de inspección en aproximadamente 1/3 y el tiempo de manera significativa. Por otro lado, la innovación tecnológica de UAV ha desafiado las nuevas regulaciones sobre directrices y normas en muchos países en desarrollo y mucho más en países subdesarrollados, donde existe una ausencia de regulaciones y leyes a nivel de país que normen el uso y su funcionamiento.

Los UAV son considerados como herramientas eficaces para la recopilación actualizada de datos espaciales, los cuales pueden proporcionar a los gobiernos nuevas formas de integrar los procesos de planificación, impuestos, gestión integral de desastres, control, mitigación, agricultura, medio ambiente, ingeniería así como adaptación al cambio climático [53]. [54] resalta que es común la inexistencia o insuficiencia de información térmica de una infraestructura al momento de una auditoría energética, lo que conlleva en muchos de los casos a los inspectores que realicen una sobre o subestimación de los modelos energéticos y selección ineficaz de estrategias de mejoras.

Los UAV tienen la capacidad de capturar información en 2D y 3D a altas resoluciones espaciales y temporales, lo cual permiten

realizar muy fácilmente tareas de inspección de infraestructuras complejas minimizando al máximo el riesgo de exposición del inspector a cualquier tipo de factor de peligro, por lo tanto los UAV aplicados a la inspección ofrece varios beneficios considerando varios puntos de vista, por ejemplo el social ya que resuelve problemas de seguridad laboral reduciendo varios riesgos asociados inherentes a las tareas de inspección; otro punto de vista es el económico el cual el uso de UAV es relativamente rentable ya que son capaces de producir información compleja a muy bajos costos en tiempo muy cortos comparados con el empleo de otros equipos y/o maquinarias; por otro lado está el punto de vista ambiental ya que los UAV no utilizan combustibles fósiles para su funcionamiento y por ende no producen emisiones de dióxido de carbono en relación con otros equipos de construcción.

Las fotografías aéreas adquiridas por medio de los UAV y de los sensores a bordo permitirán la obtención de nubes de puntos, ortofotografías, modelos digitales de superficies y modelos 3D por medio del empleo de técnicas fotogramétricas. El proceso de creación de un modelo 3D de cualquier objeto en general a partir de imágenes comúnmente se llama reconstrucción 3D y se basa básicamente en la extracción automática de miles de puntos en común entre imágenes, donde cada grupo de puntos en común generan puntos en 3D, el éxito de la reconstrucción es que exista un alto porcentaje de traslape o superposición ya sea horizontal o vertical entre las imágenes, mientras más aéreas en común existirá mayor cantidad de puntos en común y mucho mayor será la precisión de la reconstrucción 3D.

Este estudio abarca únicamente la detección visual de anomalías por parte del inspector,

sin embargo, hasta el momento existen otras técnicas alternativas que minimizan la subjetividad del inspector como es la percepción visual al momento de inspeccionar la infraestructura, tal es el caso de empleo de algoritmos de detección semiautomática y automática basados en el cálculo de umbrales dinámicos de fuga de anomalías [50], otras se enfocan a la aplicación de filtros de paso alto y bajo para resaltar bordes térmicos y posible identificación de fisuras o grietas [55]. Es claro que uno de los objetivos de este trabajo es dar a conocer las ventajas de usar sensores termales en UAV's y el uso de modelos termales 3D para desarrollar trabajos visuales de inspección de infraestructuras e incrementar el uso de los mismos, ya que facilitan la detección de anomalías termales mediante la interacción y manipulación en 360° del modelo 3D y ya no depender del análisis de imágenes individuales para la detección. El mapeo termal 3D tiene muchas ventajas y aplicaciones prácticas, por ejemplo, se puede usar los resultados para proponer mejoras en el diseño de edificios con objetivos de maximizar el ahorro de energía, localización de áreas con pérdidas significativas de calor, identificación de áreas con anomalías térmicas, generación de cartografía aérea de flujos de energía y demás productos que apoyen a una exhaustiva auditoria energética.

## Conclusiones

Los UAV de rotor o mixtos (VTOL) presentan ventajas significativas ante los UAV de ala fija, ya que los de rotor pueden realizar maniobras y movimientos horizontales y verticales para la adquisición de información, mientras que los de ala fija solo pueden realizar movimientos horizontales. Sin embargo, hay que tener en cuenta que independientemente del equipo escogido, la mayor limitación en el uso de

UAV se debe a la duración de la batería o set de baterías que use el UAV, mientras más autonomía de vuelo se tenga mayor será la duración del tiempo de inspección y adquisición de datos del UAV. Otras limitaciones respecto al uso de los UAV en los procesos de inspección es la presencia de objetos cercanos a las infraestructuras, estos objetos obstruyen o bloquean la adquisición de imágenes aéreas produciendo un vacío de información en esas áreas, finalmente es importante recalcar que la mayoría de UAV's están afectados y limitados en su operación a condiciones climáticas adversas como: lluvia, vientos fuertes, granizo y/o nieve.

El método presentado presenta ciertas ventajas comparado con las metodologías tradicionales, tales como disminuir el riesgo y peligro físico del inspector, aumento de la productividad y eficiencia del trabajo ya que se realiza más rápido el trabajo, uso de sensores complementarios para adquirir información adicionales a la capacidad de percepción y experiencia del inspector, etc.; sin embargo, considerando el estado actual del arte y la tecnología vigente, todavía no se podrían sustituir por los métodos tradicionales de inspección, principalmente porque la cámara está diseñada para detectar diferencias de temperatura, pero el proceso aún no es capaz de explicar exactamente o diferenciar que, una anomalía podría darse no siempre por una fuga o grieta, sino que podría darse por el cambio de material, aumentos de temperatura debido a la radiación solar o por la ubicación de componentes separados de la infraestructura, entre otros; por lo tanto la intervención humana en el proceso sigue siendo fundamental para la toma de decisiones complejas y/o conflictivas.

El porcentaje de precisión alcanzado de 75.61% es aceptable en términos del índice

de repetición alcanzado de 71.26%; sin embargo, debe mejorarse la experiencia respecto a la detección visual de anomalías para evitar la detección de falsos positivos y falsos negativos. La contribución principal de este trabajo fue el demostrar la potencialidad de los sensores termales para desarrollar trabajos de inspección visual y detección de anomalías en infraestructura patrimoniales, sin embargo la inspección podría potenciarse mediante el uso complementario de uso de algoritmos automáticos que cuales nos permitirán detectar anomalías con mayor precisión considerando ciertas características geométricas y morfológicas de dichas anomalías como: longitud, grosor, ángulos de inclinación, color, textura, rugosidad, otros. Como trabajo futuro se propone usar el uso de algoritmos de detección automático basado en técnicas de Deep Learning y Machine Learning para la identificación automatizada de anomalías térmicas.

Si se usan sensores termales en UAV para actividades de inspecciones de infraestructuras, se recomienda que se desarrollen los trabajos en ausencia de sol de preferencia por la noche, ya que la reflexión de los rayos solares sobre el material más la reflectividad y emisividad de los materiales pueden afectar las lecturas de temperatura de manera que se obtengan datos no confiables. Esta investigación reveló que los sensores térmicos a bordo de un UAV pudieron detectar satisfactoriamente fugas térmicas y bordes térmicos, los cuales son considerados como cambios bruscos de temperatura, es decir los sensores fueron capaces de detectar perdidas de calor y los resultados finales fueron mostrados en un modelo 3D. Sin embargo, la aplicación de estas técnicas y tecnologías también implicaron la detección de algunos falsos positivos, los cuales principalmente se debe a la presencia de: vidrios en las ventanas, postes de luz,

lámparas o algún tipo de iluminaria, calefactores, ventiladores en movimiento y sombras los cuales demostraron tener el potencial de alterar los valores térmicos de los objetos, conduciendo a lecturas falsas.

### Agradecimiento

El presente trabajo de investigación va dedicado y dirigido con una expresión de gratitud y agradecimiento al SEÑOR. A Johanna, Génesis y Grazzia por su apoyo total y amor incondicional.

A la Universidad de Investigación Yachay Tech y a Paul Arellano PhD, Decano de la Escuela de Ciencias de la Tierra, Energía y Ambiente por su apoyo incondicional en la generación de este trabajo.

### Referencias

- [1] S. J. Fenves, "Artificial Intelligence-Based Methods for Infrastructure Evaluation and Repair," *Ann. N. Y. Acad. Sci.*, vol. 431, no. 1, pp. 182–193, 1984.
- [2] U. D. of E. DOE, "An Assessment of Energy Technologies and Research Opportunities.," *Increasing Effic. Build. Syst. Technol. Quadrenn. Technol. Rev.*, vol. 5, 2015.
- [3] E. C. Shao, "Detecting sources of heat loss in residential buildings from infrared imaging," Massachusetts Institute of Technology, 2011.
- [4] A. Kylili, P. A. Fokaides, P. Christou, and S. A. Kalogirou, "Infrared thermography (IRT) applications for building diagnostics: A review," *Appl. Energy*, vol. 134, pp. 531–549, 2014.
- [5] L. E. Mavromatidis, J. L. Dauvergne, R. Saleri, and J. C. Batsale, "First experiments for the diagnosis and thermophysical sampling using impulse IR thermography from Unmanned Aerial Vehicle (UAV)," in *Proceedings of QIRT Conf., Bordeaux, France, 2014*, pp. 1–8.
- [6] E. Grinzato, "IR thermography applied to the cultural heritage conservation," in *18th world conference on nondestructive testing*, 2012, vol. 46.
- [7] S. Agnisarman, S. Lopes, K. Chalil Madathil, K. Piratla, and A. Gramopadhye, "A survey of automation-enabled human-in-the-loop systems for infrastructure visual inspection," *Autom. Constr.*, vol. 97, pp. 52–76, Jan. 2019.
- [8] A. Chapman, "Types of drones: multi-rotor vs fixed-wing vs single rotor vs hybrid VTOL, DRONE, 3." 2017.
- [9] Y. Li and C. Liu, "Applications of multirotor drone technologies in construction management," *Int. J. Constr. Manag.*, vol. 0, no. 0, pp. 1–12, 2018.
- [10] D. Lattanzi and G. Miller, "Review of robotic infrastructure inspection systems," *J. Infrastruct. Syst.*, vol. 23, no. 3, p. 4017004, 2017.
- [11] C. Eschmann, C.-M. Kuo, C.-H. Kuo, and C. Boller, "Unmanned aircraft systems for remote building inspection and monitoring," in *Proceedings of the 6th European Workshop on Structural Health Monitoring, Dresden, Germany, 2012*, vol. 36.
- [12] S. Nebiker, A. Annen, M. Scherrer, and D. Oesch, "A Lightweight Multispectral Sensor for Micro UAV – Opportunities for Very High Resolution Airborne Remote Sensing ThS 23-UAV for Mapping." XXI ISPRS Congress, Beijing, China.,

- 2008.
- [13] C. Ékes, “New Technologies and Applications of a Multi-Sensor Condition Assessment for Large-Diameter Underground Pipe Infrastructure,” in *Pipelines 2016*, 2016.
- [14] A. Agrawal, K. Ramalingam, A. Kawaguchi, S. Rozelman, F. Kulcsar, and N. Farooqi, “Remote Monitoring on Internal Condition of Buried Pipe Infrastructures,” in *Structures Congress 2008: Crossing Borders*, 2008, pp. 1–10.
- [15] N. Gucunski, S. H. Kee, H. La, B. Basily, A. Maher, and H. Ghasemi, “Implementation of a fully autonomous platform for assessment of concrete bridge decks RABIT,” in *Structures Congress*, 2015, vol. 2015, pp. 23–25.
- [16] A. Ellenberg, A. Kontsos, F. Moon, and I. Bartoli, “Bridge related damage quantification using unmanned aerial vehicle imagery,” *Struct. Control Heal. Monit.*, vol. 23, no. 9, pp. 1168–1179, 2016.
- [17] M. J. Chae and D. M. Abraham, “Neuro-fuzzy approaches for sanitary sewer pipeline condition assessment,” *J. Comput. Civ. Eng.*, vol. 15, no. 1, pp. 4–14, 2001.
- [18] M. M. Torok, M. Golparvar-Fard, and K. B. Kochersberger, “Image-based automated 3D crack detection for post-disaster building assessment,” *J. Comput. Civ. Eng.*, vol. 28, no. 5, p. A4014004, 2013.
- [19] F. Khan *et al.*, “Investigation on bridge assessment using unmanned aerial systems,” in *Structures Congress 2015 American Society of Civil Engineers*, 2015.
- [20] M. R. Endsley, “Situation awareness in aviation systems,” *Handb. Aviat. Hum. factors*, pp. 257–276, 1999.
- [21] M. R. Endsley and E. O. Kiris, “The out-of-the-loop performance problem and level of control in automation,” *Hum. Factors*, vol. 37, no. 2, pp. 381–394, 1995.
- [22] M. R. Endsley, “Toward a theory of situation awareness in dynamic systems,” *Hum. Factors*, vol. 37, no. 1, pp. 32–64, 1995.
- [23] M. L. Cummings, “The need for command and control instant message adaptive interfaces: Lessons learned from Tactical Tomahawk human-in-the-loop simulations,” *CyberPsychology Behav.*, vol. 7, no. 6, pp. 653–661, 2004.
- [24] B. Chan, H. Guan, J. Jo, and M. Blumenstein, “Towards UAV-based bridge inspection systems: A review and an application perspective,” *Struct. Monit. Maint.*, vol. 2, no. 3, pp. 283–300, 2015.
- [25] S.-E. Chen, C. Rice, C. Boyle, and E. Hauser, “Small-format aerial photography for highway-bridge monitoring,” *J. Perform. Constr. Facil.*, vol. 25, no. 2, pp. 105–112, 2011.
- [26] N. Hallermann and G. Morgenthal, “Visual inspection strategies for large bridges using Unmanned Aerial Vehicles (UAV),” in *Proc. of 7th IABMAS, International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management*, 2014, pp. 661–667.
- [27] L. D. Otero and others, “Proof of concept for using unmanned aerial vehicles for high mast pole and bridge inspections,” 2015.
- [28] J. Wells, B. Lovelace, C. Engineers, and others, “Unmanned aircraft system bridge inspection demonstration project phase II final report,” 2017.

- [29] W. Jizhou, L. Zongjian, and L. Chengming, "Reconstruction of buildings from a single UAV image," in *Proc. International Society for Photogrammetry and Remote Sensing Congress*, 2004, pp. 100–103.
- [30] S. Barfuss, A. Jensen, S. Clemens, and others, "Evaluation and development of unmanned aircraft (UAV) for UDOT needs.," 2012.
- [31] G. Morgenthal and N. Hallermann, "Quality assessment of unmanned aerial vehicle (UAV) based visual inspection of structures," *Adv. Struct. Eng.*, vol. 17, no. 3, pp. 289–302, 2014.
- [32] J. Fernandez Galarreta, N. Kerle, and M. Gerke, "UAV-based urban structural damage assessment using object-based image analysis and semantic reasoning," *Nat. hazards earth Syst. Sci.*, vol. 15, no. 6, pp. 1087–1101, 2015.
- [33] A. Ellenberg, A. Kontsos, I. Bartoli, and A. Pradhan, "Masonry crack detection application of an unmanned aerial vehicle," *Comput. Civ. Build. Eng.*, vol. 2014, pp. 1788–1795, 2014.
- [34] M. J. Henriques and D. Roque, "Unmanned aerial vehicles (UAV) as a support to visual inspections of concrete dams," 2015.
- [35] S. Siebert and J. Teizer, "Mobile 3D mapping for surveying earthwork projects using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) system," *Autom. Constr.*, vol. 41, pp. 1–14, 2014.
- [36] K. L. Fleming, Y. M. A. Hashash, S. McLandrich, N. O'Riordan, and M. Riemer, "Novel technologies for deep-excavation digital construction records," *Pract. Period. Struct. Des. Constr.*, vol. 21, no. 4, p. 5016002, 2016.
- [37] C. Zhang and A. Elaksher, "An Unmanned Aerial Vehicle-Based Imaging System for 3D Measurement of Unpaved Road Surface Distresses 1," *Comput. Civ. Infrastruct. Eng.*, vol. 27, no. 2, pp. 118–129, 2012.
- [38] A. Ekeskär and M. Rudberg, "Third-party logistics in construction: the case of a large hospital project," *Constr. Manag. Econ.*, vol. 34, no. 3, pp. 174–191, 2016.
- [39] Y. Fang, J. Chen, Y. K. Cho, and P. Zhang, "A point cloud-vision hybrid approach for 3D location tracking of mobile construction assets," in *33rd International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2016). Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction*, 2016, vol. 33, pp. 1–7.
- [40] J. Irizarry and D. B. Costa, "Exploratory study of potential applications of unmanned aerial systems for construction management tasks," *J. Manag. Eng.*, vol. 32, no. 3, p. 5016001, 2016.
- [41] A. R. Rumane, *Quality management in construction projects*. CRC Press, 2017.
- [42] D.-Y. Lee, H. Chi, J. Wang, X. Wang, and C.-S. Park, "A linked data system framework for sharing construction defect information using ontologies and BIM environments," *Autom. Constr.*, vol. 68, pp. 102–113, 2016.
- [43] B. A. Tezel, Z. U. H. Aziz, and others, "From conventional to IT based visual management: a conceptual discussion for lean construction," *J. Inf. Technol.*

- Constr.*, vol. 22, pp. 220–246, 2017.
- [44] X. J. Ge, P. Livesey, J. Wang, S. Huang, X. He, and C. Zhang, “Deconstruction waste management through 3d reconstruction and bim: a case study,” *Vis. Eng.*, vol. 5, no. 1, p. 13, 2017.
- [45] L. Duque, J. Seo, and J. Wacker, “Synthesis of unmanned aerial vehicle applications for infrastructures,” *J. Perform. Constr. Facil.*, vol. 32, no. 4, p. 4018046, 2018.
- [46] DJI, “MATRICE 600 User Manual,” 2017.
- [47] DJI, “DJI user manual Zenmuse XT - ZENMUSE XT POWERED BY FLIR.” 2016.
- [48] L. Aguirre, “Vehículos aéreos no tripulados y herramientas de realidad virtual aplicados en la educación ambiental universitaria del presente,” in *Libro de Memorias del “VI Congreso de la Red Ecuatoriana de Universidades y Escuelas Politécnicas para Investigación y Posgrados - VIREDU,”* UTN, Ed. Ibarra - Ecuador: Editorial UTN, 2018, pp. 256–265.
- [49] D. González-Aguilera, S. Lagüela, P. Rodríguez-Gonzálvez, and D. Hernández-López, “Image-based thermographic modeling for assessing energy efficiency of buildings façades,” *Energy Build.*, vol. 65, pp. 29–36, 2013.
- [50] T. Rakha and A. Gorodetsky, “Review of Unmanned Aerial System (UAS) applications in the built environment: Towards automated building inspection procedures using drones,” *Autom. Constr.*, vol. 93, pp. 252–264, Sep. 2018.
- [51] FLIR, “Thermal Imaging Guidebook for Building and Renewable Energy Applications: An Informative Guide for the Use of Thermal Imaging Cameras for Inspecting Buildings, Solar Panels and Windmills.” The Netherlands, 2012.
- [52] E. A. Holt, “Emerging Technology in the Construction Industry: Perceptions from Construction Industry Professionals,” *Age (Omaha)*, vol. 26, p. 1, 2015.
- [53] M. N. Norzailawati, A. Alias, and R. S. Akma, “DESIGNING ZONING OF REMOTE SENSING DRONES FOR URBAN APPLICATIONS: A REVIEW,” *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, vol. 41, 2016.
- [54] I. Shapiro, “10 common problems in energy audits,” *ASHRAE J.*, vol. 53, no. 2, pp. 26–31, 2011.
- [55] J. Canny, “A computational approach to edge detection,” in *Readings in computer vision*, Elsevier, 1987, pp. 184–203.