

07-005

### **TECHNOLOGY AND METHODOLOGY FOR OBTAINING OMNIDIRECTIONAL 3D THERMAL POINT CLOUDS MODELS OF BUILDINGS**

Ramón Constantí, Amanda (1); Adán Oliver, Antonio (1); Quintana Galera, Blanca (2); Castilla Pascual, Francisco Javier (1); Pérez Andreu, Víctor (1)

(1) Universidad de Castilla-La Mancha, (2) Universidad Nacional de Educación a Distancia

To date, there is scarce research on the creation of 3D Semantic Thermal Models of buildings (3D-STM) using long-range sensors. This research line opens up the field of applications in the world of building energy performance, a main issue in current European research guidelines. This paper presents a new technological platform and methodology that generates an omnidirectional thermal point cloud, as a previous stage of the creation of 3D-STM. The system integrates a large-range laser scanner, a thermal camera, and a motorized pan-tilt head. The system is programmed to capture omnidirectional 3D thermal data of the scene, with wide horizontal and vertical ranges. After carrying out several thermal scans of the scene (a room or a story), a whole 3D omnidirectional thermal point cloud is automatically obtained. In this process, several problems are presented and solved, among others, those derived from the variability of the thermal camera, topics which are scarcely treated in the existing bibliography. This work considerably reduces the thermal noise introduced. The final aim of this project is to integrate 3D-STM with BIM, having a direct impact on the development of future intelligent buildings and on the new energy efficiency paradigms.

Keywords: 3D-STM; BIM; semantic model buildings; thermal model

### **TECNOLOGÍA Y METODOLOGÍA PARA LA OBTENCIÓN DE MODELOS OMNIDIRECCIONALES 3D DE NUBES TÉRMICAS DE PUNTOS DE EDIFICIOS**

En la actualidad, existen escasas investigaciones sobre la creación de Modelos Térmicos Semánticos 3D de edificios (3D-STM) utilizando sensores de largo alcance. Esta línea de investigación abre el campo de aplicaciones en el mundo de la eficiencia energética de los edificios, tema principal en las actuales directrices europeas de investigación. Este artículo presenta una nueva metodología que genera nubes omnidireccionales térmicas de interiores de edificios como paso previo a la creación de 3D-STM. El sistema integra un escáner láser de largo alcance, una cámara térmica y un cabezal de giro e inclinación motorizado. El sistema es programado para capturar datos térmicos 3D omnidireccionales de la escena. Tras realizar varios escaneos térmicos de la escena (a nivel de habitación o de planta), se obtiene automáticamente una nube de puntos térmicos omnidireccionales 3D. En este proceso, se presentan y resuelven varios problemas, entre otros los derivados de la variabilidad de la cámara térmica integrada con el escáner, temas escasamente tratados en la bibliografía existente, reduciendo considerablemente el ruido introducido. El objetivo final del proyecto es integrar 3D-STM con BIM, teniendo un impacto directo en el desarrollo de futuros edificios inteligentes y en los nuevos paradigmas de eficiencia energética.

Palabras clave: 3D-STM; BIM; modelo semántico edificios; modelo térmico

Correspondencia: Amanda Ramón (amanda.ramon@uclm.es); Antonio Adán (antonio.adan@uclm.es)



©2022 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Agradecimientos: Esta investigación ha sido financiada por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (SBPLY/19/180501/ct) y el Ministerio de Ciencia e Innovación (PID2019-108271RB-C31)

## 1. Introducción

Las nubes de puntos constituyen hoy en día una herramienta ampliamente utilizada en el sector AEC (Architecture, Engineering, Construction), especialmente en la conservación y/o renovación de edificios para adecuarlos a las nuevas exigencias y normativas de accesibilidad, habitabilidad y/o eficiencia energética, entre otras. Las nubes de puntos y los modelos digitales de edificios e infraestructuras creados a partir de éstas pueden tener muchos usos, dependiendo de cómo se tomen los datos, cómo se procesen y cómo se empleen junto a otra información para crear modelos estructurados, como, por ejemplo, los modelos tipo BIM (Building Information Model). El tipo de información con el que se pueden enriquecer estos modelos 3D es muy variado: desde información de geoposicionamiento (Webb & Langar, 2019), datos obtenidos desde sensores de contacto, u otro tipo, como color RGB (Peasley, 2013; Vidas et al., 2013) o información térmica obtenida desde cámaras externas o integradas en el sistema (Adán, Prieto, et al., 2019; Gisbert et al., 2021).

A pesar de que la termografía infrarroja como método no destructivo para diagnóstico y prevención de patologías en la edificación (Larsen, 2012) o para la inspección de elementos en arquitectura y patrimonio está muy extendida, su uso junto a nubes de puntos 3D para obtener modelos térmicos de edificios no ha sido apenas explorada más allá del ámbito académico. Las nubes de puntos térmicas 3D permiten al usuario navegar y visualizar una o varias salas de un edificio para obtener una visión integral de las características térmicas de éstas (Cho et al., 2015; Ham & Golparvar-Fard, 2013), lo que permite poner en contexto posibles anomalías de temperatura que, de analizarse con termografía en 2D, ésta ofrecería únicamente una visión parcial del espacio construido. Además, los modelos 3D térmicos pueden ser utilizados como calibración para realizar simulaciones energéticas (Ham & Golparvar-Fard, 2015), detectar elementos constructivos o regiones con distinto comportamiento o inercia térmica. Actualmente, existen algunos grupos de investigación en el ámbito internacional y también nacional centrados en el desarrollo de diferentes sistemas y técnicas, tanto automáticas como semiautomáticas para realizar modelos térmicos 3D de edificios.

Sin embargo, la mayoría de los trabajos existentes sobre modelos térmicos 3D se centran en estudiar elementos constructivos individuales como cerramientos (Fox et al., 2015) o en realizar modelos de puntos térmicos de exteriores de edificios (Iwaszczuk & Stilla, 2017). Muy pocos grupos se centran en estudiar los interiores de las edificaciones desde el aspecto térmico 3D. El matiz de estudiar los espacios interiores implica trabajar con herramientas concretas, como escáneres láser, en combinación con cámaras térmicas, lo que, a su vez, implica ciertas particularidades en la toma de datos dependiendo de si ésta es realizada por un técnico que maneja el sistema y lo coloca en las diferentes posiciones requeridas, o si es una plataforma robótica la que está programada para realizar los escaneados en una o varias posiciones determinadas previamente por un sistema semi o totalmente automático (Adán, Prieto, et al., 2019; Adán, Quintana, et al., 2019).

Existen lagunas evidentes en esta línea de investigación relacionadas principalmente con (1) la creación de modelos de puntos térmicos omnidireccionales que cubran el espacio visible, (2) el tratamiento de la información de temperatura proporcionada con las cámaras térmicas y su asignación a la nube de puntos omnidireccional, (3) el alcance de actuación de los modelos térmicos al nivel de planta y edificio multiplanta, (4) la creación de modelos

geométricos térmicos semánticos estructurados y (4) la integración de estos modelos en formatos estándar BIM.

En el presente artículo se presenta un método que trata únicamente los aspectos (1) y (2) referidos anteriormente y presenta los resultados obtenidos a un nivel de modelo de planta con varias habitaciones o zonas. Sobre el aspecto (1) cabe decir que la generación de un modelo 3D térmico completo de un espacio interior depende de factores geométricos y espaciales, como la geometría de la sala o salas a estudiar, las posibles oclusiones existentes en paredes o techos, pero también de la propia tecnología aplicada. En el segundo aspecto, es de resaltar que las publicaciones que tratan con nubes térmicas no tratan problemas de calibración de cámaras, ni el problema siempre presente de variabilidad o repetitividad de las cámaras térmicas utilizadas. Todas estas variables están presentes tanto a la hora de realizar la toma de datos, como a la hora de emplear uno u otro flujo de trabajo en la fase de procesamiento para obtener un modelo omnidireccional 3D completo que sea funcional para visualización y diagnóstico en la industria AEC.

## 2. Objetivos

El objetivo de esta publicación es doble. En primer lugar, se presenta el método seguido para obtener un modelo de puntos térmico 3D omnidireccional de un espacio interior de un edificio utilizando una tecnología basada en escáner laser y cámara de infrarrojos. El segundo lugar, el artículo se centra en resolver el problema de la variabilidad (o repetitividad) de las cámaras térmicas, proponiendo un procedimiento de corrección mediante una nube 360-T promedio filtrada de las llamadas imágenes térmica *outliers*.

El artículo es organizado de la siguiente manera. En la sección 3.1 se muestra el sistema sensorial, mientras que las secciones 3.2 y 3.3 están dedicadas a presentar el procedimiento propuesto para realizar la asociación de puntos y temperaturas en el espacio, así como a explicar la obtención una nube térmica panorámica (llamada nube 360-T). El problema de variabilidad de la cámara térmica y la obtención de la 360-T promedio es tratado en la sección 3.4. Por último, la Sección 3.5 y 3.6 aborda la obtención de una nube omnidireccional a nivel de habitación y se indica, brevemente, el procedimiento para llegar a un nivel de planta. La Sección 4 se dedica a presentar resultados experimentales obtenidos en un caso de estudio y las conclusiones son expuestas en la Sección 5.

## 3. Metodología

### 3.1. Descripción del sistema sensorial

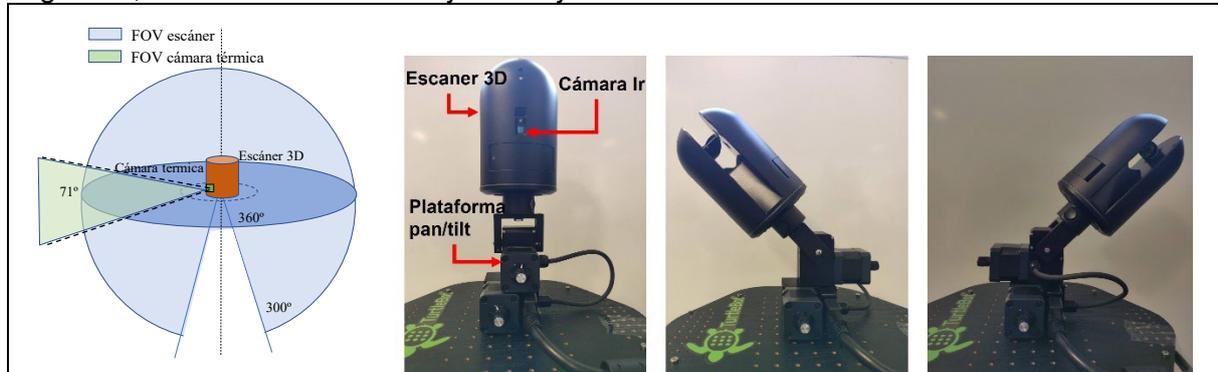
Una nube de puntos térmica consiste básicamente en coordenadas de puntos de la escena referidos a un sistema de referencia propio y una temperatura asignada. Esta información puede extenderse también al color del punto (usualmente valores RGB). Aunque, la nube de puntos podría obtenerse a través de técnicas fotogramétricas con imágenes RGB e infrarrojas, sin embargo, la mejor técnica y la más referenciada se basa en el uso de tecnologías láser combinadas con cámara técnica.

En nuestro sistema sensorial, las coordenadas tridimensionales de un punto son obtenidas a través de un sensor laser escáner 3D de medio rango (Leica BLK 360), con alcance mínimo de 0.6 m y máximo de 60 metros de distancia. El escáner barre un espacio de 360° x 300° (h x v), lo que asegura la obtención de puntos en prácticamente todo el espacio visible. Tiene una precisión de 4 mm a 10 m, proporcionando 18 millones de puntos en resolución media.

La cámara térmica es solidaria al cuerpo del escáner con una resolución de 160 x 120 píxeles, y campo de visión de 71° x 56° (v x h). Puede trabajar en el rango de temperaturas de -10 °C

a 65 °C, teniendo una sensibilidad menor de 0.05 °C. A medida que rota el escáner, la cámara toma un fotograma cada 36°, por lo que se cuenta con 10 imágenes infrarrojas solapadas unos 10° para generar una imagen panorámica de 71° de campo de visión vertical.

Debido a la falta de rango vertical cubierto por la cámara térmica, se cuenta con un cabezal *pan/tilt* que porta el conjunto escáner-cámara. El uso principal del cabezal se refiere a su ángulo *tilt*, inclinando arriba o abajo el conjunto sensorial.



**Figura 1: Sistema sensorial. Cabezal pan/tilt, escáner y cámara térmica en posiciones vertical e inclinadas.**

### 3.2. Obtención de la nube térmica correspondiente a una imagen térmica

Antes de obtener los datos 3D térmicos, se deben realizar varias tareas básicas de calibración. Por una parte, la calibración intrínseca de una cámara permite corregir los defectos derivados de la óptica (en este caso de la cámara térmica). Se ha seguido para ello, el método presentado en (Heikkila & Silven, 1997). El segundo lugar, es necesario corregir el efecto de *vignetting* en la imagen térmica que se manifiesta por una bajada de intensidad (temperatura) a medida que nos acercamos a los bordes de la imagen. En nuestro caso, el efecto de *vignetting* ha sido corregido empíricamente calculando una función que proporciona el decaimiento radial de temperatura.

Por otra parte, la calibración extrínseca del sistema consiste en calcular la matriz de transformación  $M$  entre el sistema de referencia del escáner  $\{S^p\}$  y el de la cámara térmica  $\{S^f\}$ . Supongamos un punto de la escena con coordenadas de escáner  $(X_p, Y_p, Z_p)$  se proyecta en un pixel de la imagen térmica con coordenadas de imagen  $(X_f, Y_f)$ . Esta correspondencia entre coordenadas queda expresada en la ecuación (1), donde  $M$  es una matriz 3 x 4 (ecuación (2)) que representa la correspondencia entre ambos sistemas de coordenadas.

$$\begin{pmatrix} \lambda X_f \\ \lambda Y_f \\ \lambda \end{pmatrix} = M \begin{pmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \\ 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

siendo

$$M = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_{24} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & r_{34} \end{pmatrix} \quad (2)$$

El problema a resolver en esta calibración es el de hallar las 12 componentes de la matriz  $M$ . Así, conocidas las coordenadas de un punto en el sistema de escáner, se obtendrán sus

correspondientes coordenadas en la imagen térmica y, por lo tanto, sus temperaturas asociadas.

Supongamos conocida una correspondencia para un punto  $P_1$  con coordenadas de cámara  $(X_{f1}, Y_{f1})$  y de escáner  $(X_{p1}, Y_{p1}, Z_{p1})$ . La ecuación (1) al tomar  $r_{34} = 1$ , queda explícitamente expresada por:

$$\begin{pmatrix} X_{f1} \\ Y_{f1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{p1} & Y_{p1} & Z_{p1} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -X_{f1}X_{p1} & -X_{f1}Y_{p1} & -X_{f1}Z_{p1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_{p1} & Y_{p1} & Z_{p1} & 1 & -Y_{f1}X_{p1} & -Y_{f1}Y_{p1} & -Y_{f1}Z_{p1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_{11} \\ r_{12} \\ r_{13} \\ r_{14} \\ r_{21} \\ r_{22} \\ r_{23} \\ r_{24} \\ r_{31} \\ r_{32} \\ r_{33} \end{pmatrix} \quad (3)$$

que, generalizada para  $n$  puntos correspondientes, da lugar a la ecuación (4).

$$\begin{pmatrix} X_{f1} \\ Y_{f1} \\ \vdots \\ X_{fn} \\ Y_{fn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{p1} & Y_{p1} & Z_{p1} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -X_{f1}X_{p1} & -X_{f1}Y_{p1} & -X_{f1}Z_{p1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_{p1} & Y_{p1} & Z_{p1} & 1 & -Y_{f1}X_{p1} & -Y_{f1}Y_{p1} & -Y_{f1}Z_{p1} \\ & & & & & & & \vdots & & & \\ & & & & & & & \vdots & & & \\ X_{pn} & Y_{pn} & Z_{pn} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -X_{fn}X_{pn} & -X_{fn}Y_{pn} & -X_{fn}Z_{pn} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_{pn} & Y_{pn} & Z_{pn} & 1 & -Y_{fn}X_{pn} & -Y_{fn}Y_{pn} & -Y_{fn}Z_{pn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_{11} \\ r_{12} \\ r_{13} \\ r_{14} \\ r_{21} \\ r_{22} \\ r_{23} \\ r_{24} \\ r_{31} \\ r_{32} \\ r_{33} \end{pmatrix} \quad (4)$$

Expresando en modo compactado la ecuación anterior, se tiene:

$$F = WR \quad (5)$$

y tomando los coeficientes de  $R$  como las incógnitas de la ecuación (5), se llega finalmente a

$$R = (W^T W)^{-1} W^T F \quad (6)$$

Reordenando finalmente el vector  $R$ , la matriz de calibración  $M$  sería conocida.

Asumiendo que los sistemas de referencia  $\{S^p\}$  y  $\{S^f\}$  no han cambiado, el procedimiento para obtener una nube térmica correspondiente a un fotograma térmico consiste en aplicar la ecuación (1) para las coordenadas de puntos 3D que estén dentro del campo de visión de la cámara, obtener las correspondientes coordenadas de imagen y leer el valor de temperatura en esas coordenadas. La Figura 2 muestra una imagen térmica y su correspondiente nube térmica asociada.

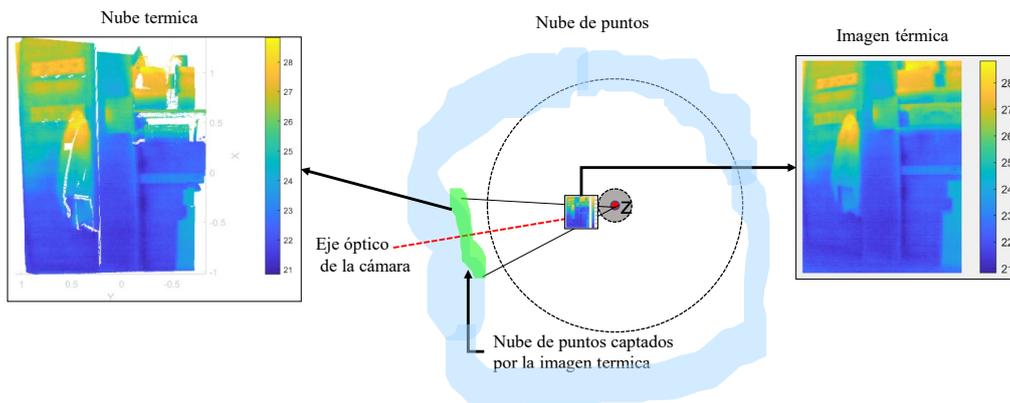


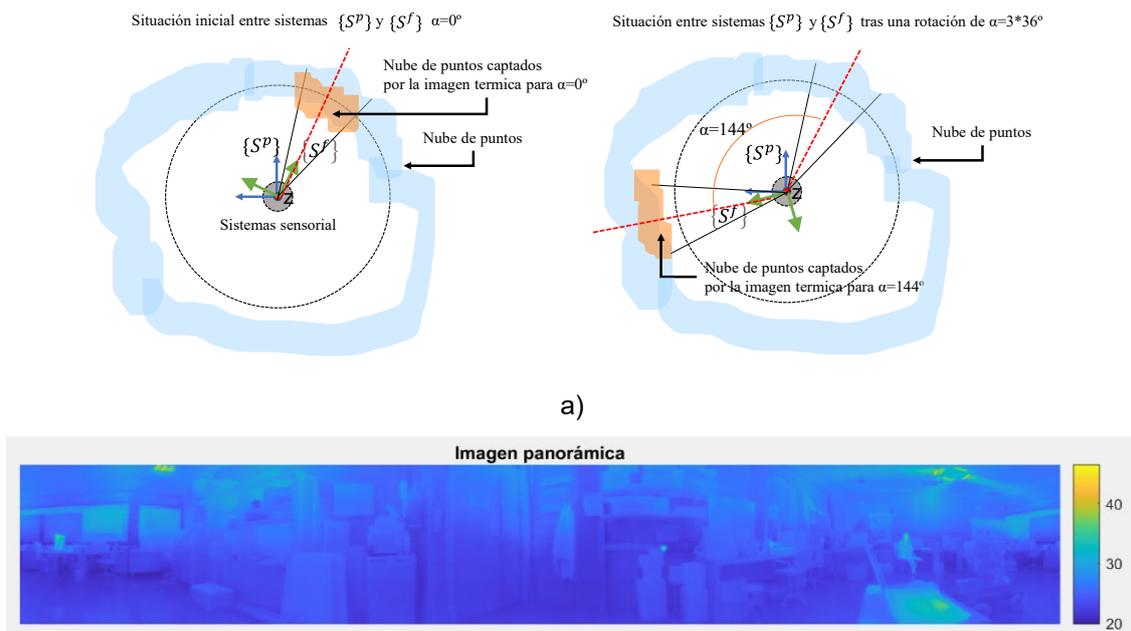
Figura 2: a) Asignación de temperatura a los puntos cubiertos por una única imagen térmica.

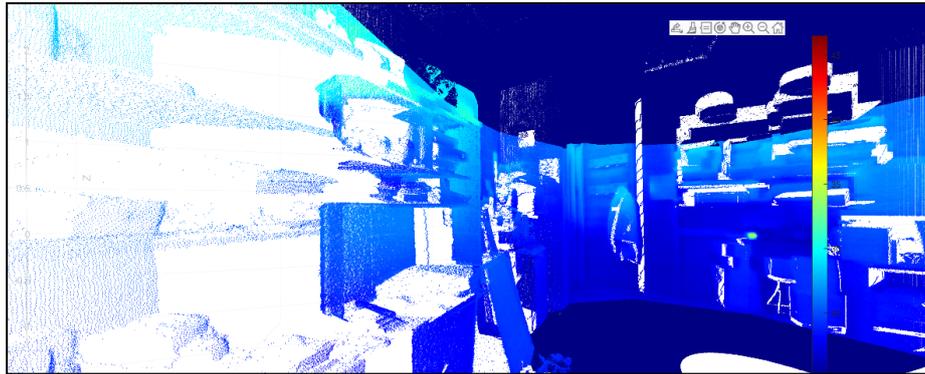
### 3.3. Obtención de una nube 360-T

Para obtener una nube térmica panorámica se siguen 3 pasos:

1. La cámara térmica rota en el eje Z del sistema escáner a tramos de 36° y toma una imagen por tramo hasta completar una vuelta completa de 360°.
2. Para cada  $k$ -ésima imagen ( $k=1..10$ ), se calculan las coordenadas  $(X_f, Y_f)_k$  de los correspondientes puntos de la escena  $(X_p, Y_p, Z_p)_k$ , teniendo en cuenta la rotación  $\alpha$  respecto de la posición inicial (que corresponde a la posición en la que se realizó la calibración externa) y se les asigna las correspondientes temperaturas (ver Figura 3 a)).
3. Se conforma la nube térmica 360-T de amplitud 71° x 360°.

La Figura 3 b) muestra una imagen panorámica solapando las 10 imágenes térmicas y una vista interior de la nube de puntos térmica. Se aprecia la franja de la nube 360-T superpuesta a la nube de puntos que no tienen temperatura asignada (en azul oscuro).





b)

**Figura 3:** a) Ilustración de la rotación en Z de la cámara térmica a tramos de 36° desde la posición de calibración. b) Imagen panorámica térmica formada por las 10 imágenes de cámara superpuestas (arriba) y nube 360-T superpuesta a la nube de puntos (abajo). Los puntos en azul oscuro no tienen asignada temperatura.

### 3.4 Creación de nubes 360-T promedio

En el proceso de la creación de nubes 360-T existe un problema de variabilidad de la cámara térmica que ha sido obviado en los escasos trabajos publicados relacionados con nubes térmicas. Tan sólo se pueden encontrar algunos trabajos que traten el tema de variabilidad de cámaras, pero desligados del tópico de nubes térmicas. En (Malmivirta et al., 2019), además de realizar una calibración de cuerpo negro, se desarrolla una técnica de calibración basada en *deep learning* que permite adaptarse a los cambios térmicos internos de la cámara. En (Wan et al., 2021), se realizan diversos experimentos con una cámara de mano y un UAV, donde se muestra cómo la temperatura medida con el sensor varía y tarda hasta 60 minutos en estabilizarse. Aunque la referencia más reciente es de 2021, por lo que se puede considerar un tema de actualidad, apenas existe más bibliografía sobre datos térmicos y su exactitud aplicados a la creación de nubes térmicas 3D en interiores en edificios.

En nuestro caso, el efecto de la variabilidad o repetitividad de las cámaras infrarrojas hace que el valor de temperatura de un mismo píxel para tomas separadas un corto intervalo de tiempos (segundos) pueda variar apreciablemente o bien, imágenes térmicas contiguas tengan un gradiente global de temperatura no coherente con la escena digitalizada. El efecto final de esta variación aleatoria es que la nube térmica adolece de la precisión requerida en temperatura y muestra incongruencias térmicas en el espacio. Estas variaciones se mostrarán en la Figura 6 a) y b) en la Sección 4.

Para corregir este problema, en la formación de la nube 360-T se toma una sola medida de escáner (coordenadas 3D) y  $n$  tomas seguidas de imágenes térmicas. Esto implica que el sistema realiza  $n$  vueltas completas (usualmente de 5 a 10) de 360° tomando 10 fotogramas térmicos en cada vuelta. Con estos datos, se lleva a cabo un procedimiento estadístico para los  $n$  fotogramas correspondientes a cada posición de la cámara, en donde se identifican imágenes atípicas que llamaremos *outliers*. El algoritmo de limpieza de imágenes *outliers* es mostrado en la Figura 4.

Inputs:

$a \times n$  Imágenes térmicas:  $I_{a,r}$ ,  $a = 1, \dots, 10, r = 1, \dots, n$

$[dimx, dimy] = size(I_{a,r})$

Umbral de outliers a nivel pixel:  $U_{p1}$

Umbral de porcentaje máximo de outliers en la imagen:  $U_{p2}$

% Para cada giro de la cámara

```
FOR i=1 TO 10
  % Para cada coordenada (x,y) de imagen
  FOR 0<x<dimx & 0<y<dimy
    Vector temperatura para pixel (x,y) →  $V_{i,xy} = \{I_{i,1}(x,y), I_{i,2}(x,y), \dots, I_{i,n}(x,y)\}$ 
    % Para cada repetición de imagen térmica en el giro i-ésimo
    FOR j=1 TO n
      Etiquetar pixel (x,y) de  $I_{i,j}$ : →
      IF  $|\overline{V_{i,xy}} - I_{i,j}(x,y)| < U_{p1}$ ,  $(E_{i,j}(x,y) = 1)$  ELSE  $(E_{i,j}(x,y) = 0)$  END
    END
  END
  % Etiquetar las imágenes en el mismo giro i-ésimo
  FOR j=1 TO n
    Etiquetar imagen  $I_{i,j}$  como valida o no_valida (outlier): →
    IF Porcentaje  $(E_{i,j} = 0) < U_{p2}$ ,  $I_{i,j}$  es valida ELSE  $I_{i,j}$  es no_valida
  END
  % Calcula la imagen promedio en el giro i-ésimo para las imágenes validas
   $I_i = \overline{I_{i,j}}$ , ( $j = 1, \dots, n$ ,  $I_{i,j}$  valida)
END
```

**Figura 4. Algoritmo de creación de imágenes promedio mediante la detección de imágenes térmicas outliers.**

### 3.5. Obtención de una nube térmica omnidireccional a nivel de zona

En un contexto de espacio interior de un edificio, definiremos la palabra “zona” como un espacio cerrado interior delimitado por una o varias puertas. Habitualmente una zona será una habitación o sala de un edificio.

Asumiendo que una nube térmica omnidireccional debería cubrir todo el espacio visible desde una posición del escáner, una única nube 360-T dista de ser nube omnidireccional. Como se ha referido anteriormente, debido al limitado campo de visión de la cámara térmica, una única nube 360-T sólo cubre una franja espacial de  $71^\circ \times 360^\circ$ . El resto del espacio puede ser cubierto mediante nuevas nubes 360-T tomadas en diferentes posiciones u orientaciones del sistema sensorial.

Todas las nubes 360-T deben ser puestas en el mismo sistema de referencia (usualmente definido en la primera toma). Este registro se realiza de manera automática sabiendo los ángulos de giro de la plataforma pan/tilt y/o el vector de traslación entre distintas posiciones del escáner. En nuestro caso, estos datos son obtenidos al situar el sistema sensorial sobre un robot móvil.

En una fase posterior, se realiza un procedimiento de reducción y homogeneización de la nube acumulada quedando una nube térmica completa (omnidireccional) con densidad uniforme de la escena.

### 3.5. Obtención de una nube térmica omnidireccional a nivel de planta

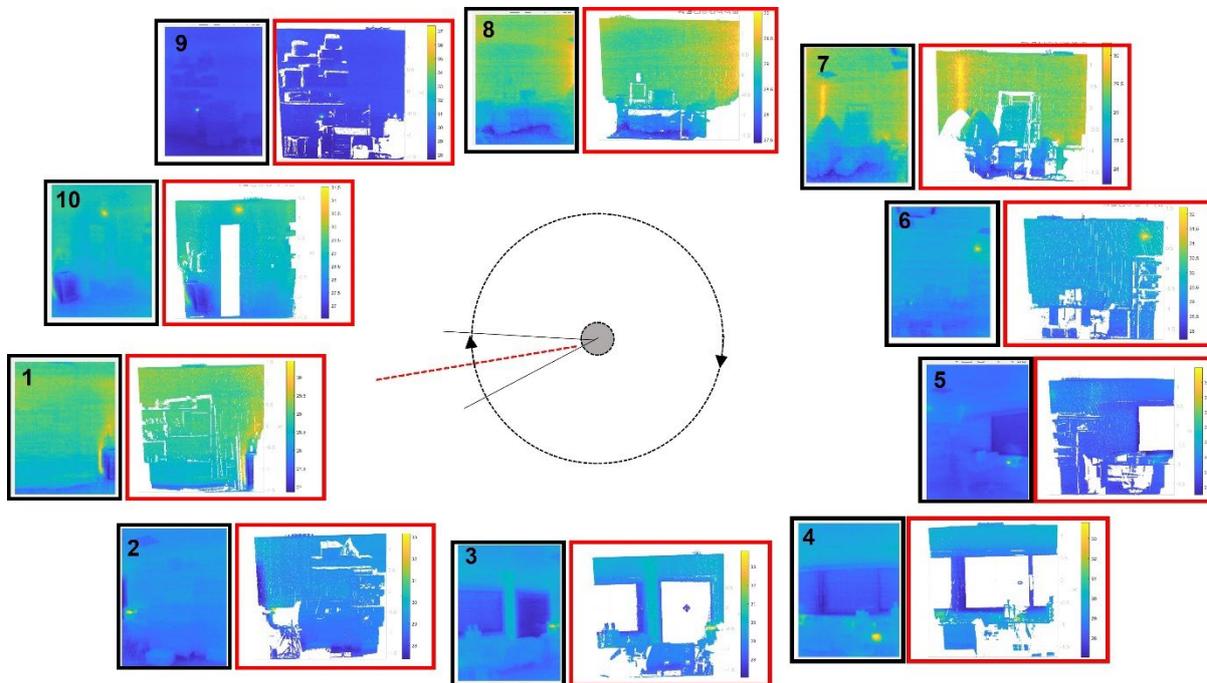
La nube omnidireccional de una planta compuesta por varias zonas conectada a través de puertas se obtiene después de realizar el alineamiento de todas las nubes térmicas omnidireccionales de cada zona respecto a un sistema de referencia común, que suele ser el sistema definido en el primer escaneado de la primera zona. Esta tarea de alineamiento, habitualmente denominada como registro, se realiza de forma manual o mediante la ayuda de un sistema de odometría, logrando un registro aproximado que, posteriormente, es refinado mediante algoritmos de ajuste de nubes de puntos (Besl & McKay, 1992). Las salidas de este proceso son nubes térmicas alineadas asociadas a cada una de las zonas de la planta.

Esta información, aún desestructurada, deberá ser procesada para obtener un modelo geométrico y térmico semántico. Toda la etapa de procesamiento de nubes térmicas para obtener un modelo térmico BIM no es tratada en este artículo.

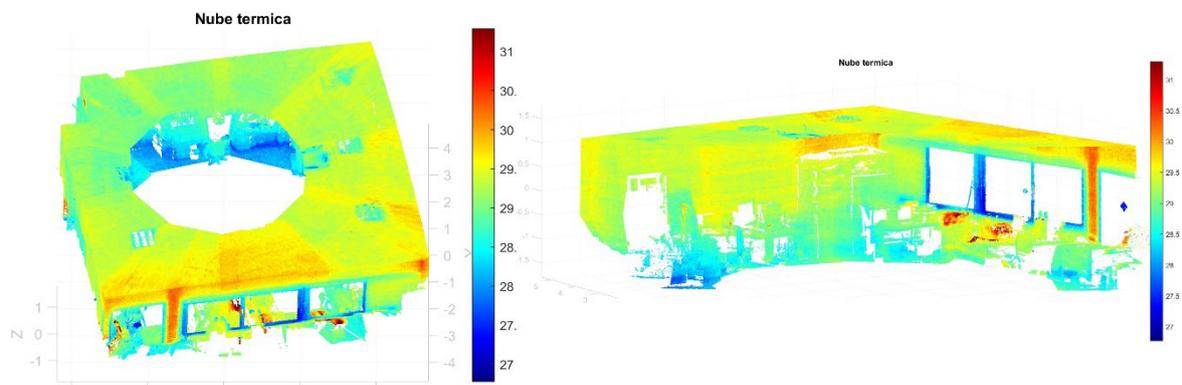
#### 4. Resultados

El método de creación de nubes térmicas omnidireccionales ha sido desarrollado y experimentado teniendo en cuenta el sistema sensorial presentado en la Sección 3.1. En los párrafos e imágenes siguientes se muestran resultados relativos a la formación de nubes térmicas a nivel de zona y planta, así como al proceso de creación de nubes promedio para salvar el problema de variabilidad de la cámara térmica.

La Figura 5 a) muestra la asignación de imágenes térmica a puntos 3D para cada una de las 10 imágenes de una vuelta completa del escáner. Se visualiza por parejas la imagen térmica y la porción de nube de puntos con la temperatura asignada. La nube 360-T es visualizada exterior e interiormente en Figura 5 b)



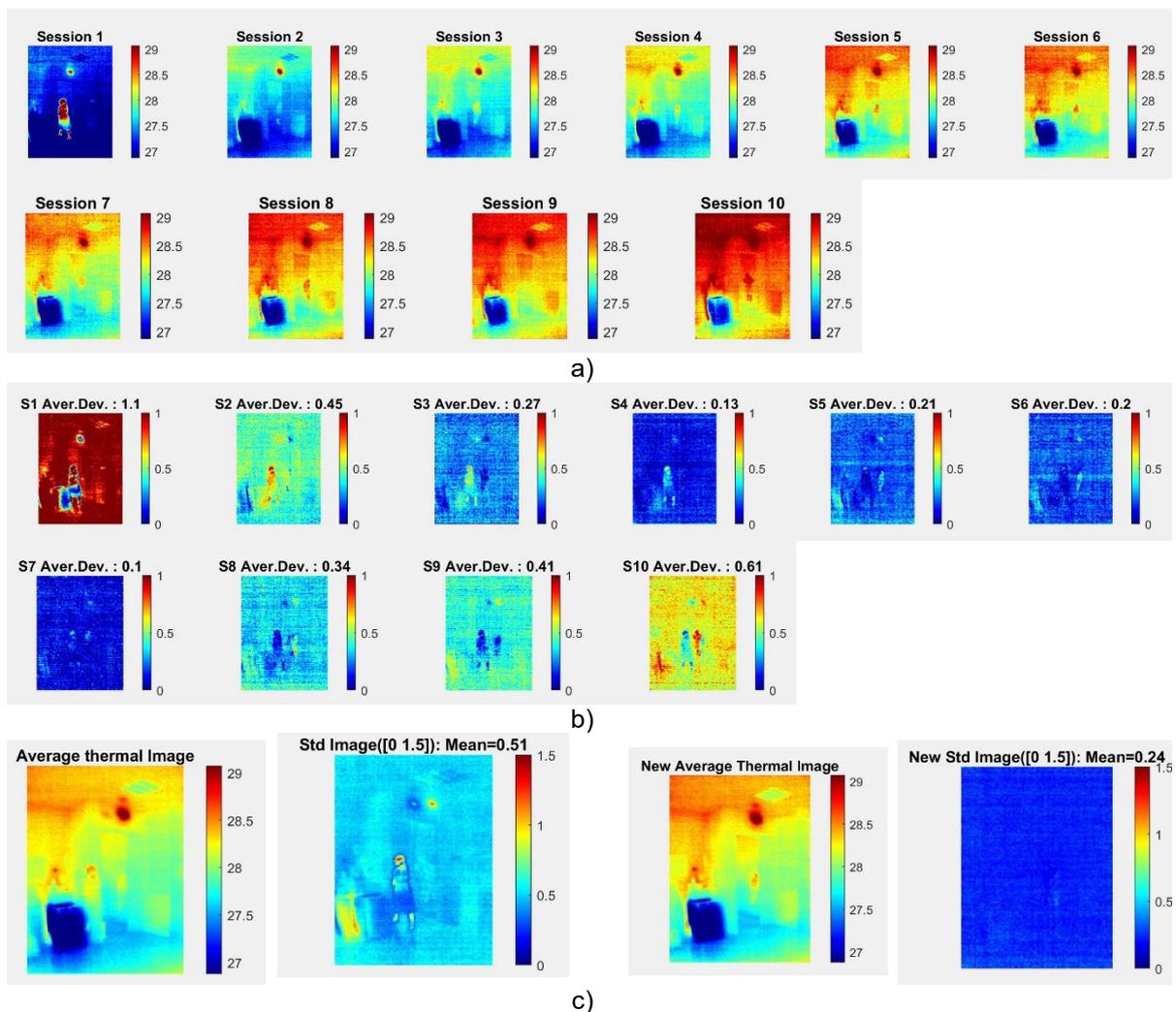
a)

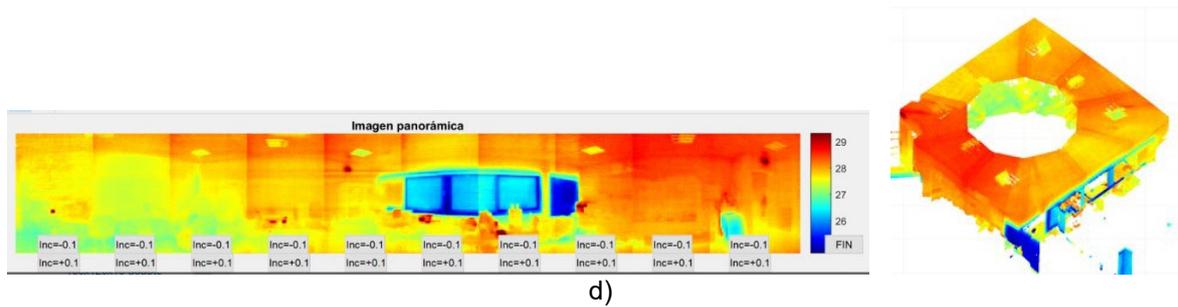


b)

**Figura 5. a) Asignación de temperatura a nubes de puntos para cada giro de la imagen térmica. Los giros son numerados de 1 a 10. b) Vistas exterior e interior de la Nube 360-T calculada.**

La Figura 6 se refiere a resultados del algoritmo de filtración de imágenes *outliers* en el proceso de creación de una nube 360-T. En la Figura 6 a) se muestra un detalle de las imágenes térmicas para la posición de giro  $i=1$  de la cámara para diez sesiones seguidas. Se aprecia claramente la discrepancia entre los valores de temperatura, que pueden llegar hasta  $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  en las sesiones 1 y 10. Abajo se presentan las imágenes de desviación estándar respecto a la imagen térmica media. El algoritmo de detección de imágenes *outliers* detecta las sesiones 1, 2, 9 y 10 como *outliers*, de manera que se toma una imagen promedio con el resto de las imágenes. La Figura 6 c) presenta las imágenes originales e imágenes desviación típica promedios antes y después de realizar el filtro de imágenes *outliers*. Como se aprecia la imagen de desviaciones estándar promedio tiene un valor medio de  $0.24^{\circ}\text{C}$ , con lo que se mejora sustancialmente la precisión de la imagen térmica que será aplicada posteriormente para calcular la parte de nube térmica correspondientes al giro  $i=1$ . Aun así, el sistema puede finalmente realizar un ajuste fino manual si se estima conveniente sobre el conjunto de la imagen panorámica, como se ilustra en la Figura 6 d).

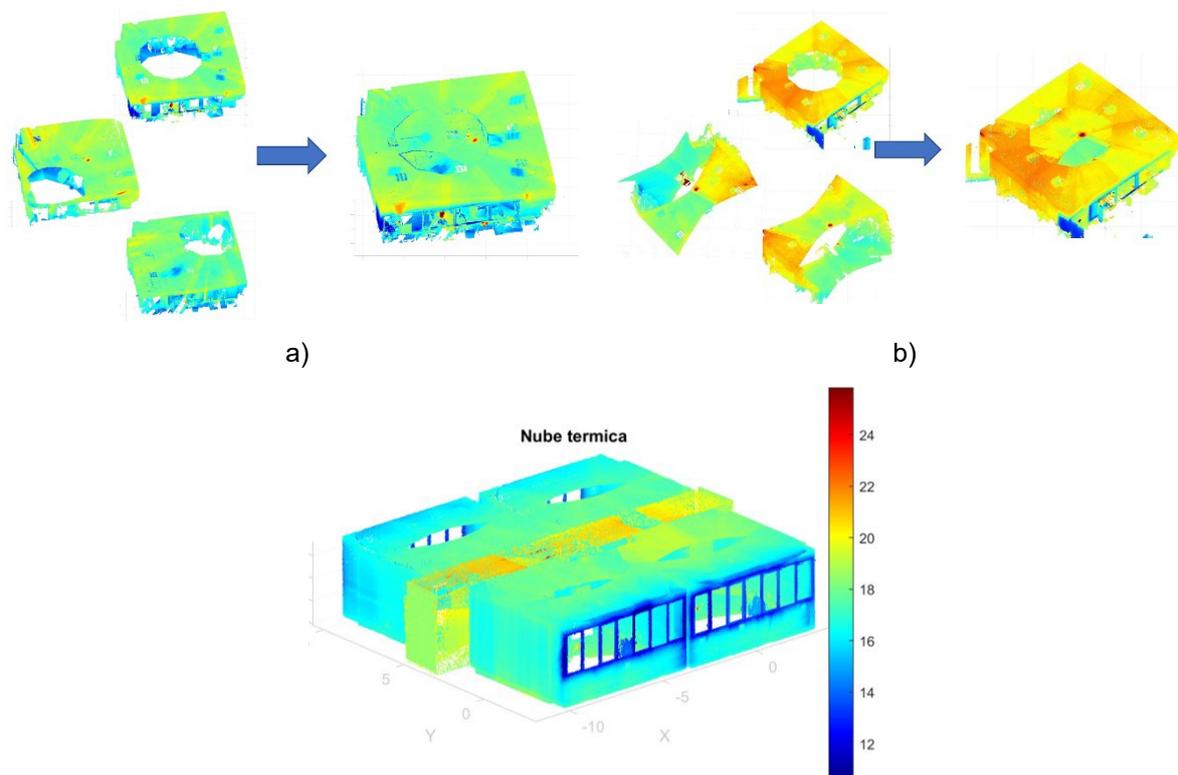




**Figura 6. Resultados de la aplicación del algoritmo de detección de imágenes térmicas *outliers* para un giro de la cámara térmica. a) y b) Imágenes térmicas para la primera posición de cámara (giro  $i=1$ ) e imágenes de desviación estándar respecto a la imagen térmica media. c) Imagen térmica media e imagen promedio de desviación estándar antes y después de aplicar el algoritmo de corrección. Se aprecia que la desviación estándar media se reduce de  $0.51^{\circ}\text{C}$  a  $0.24^{\circ}\text{C}$  cuando se eliminan las imágenes *outliers* 1, 2, 9 y 10. d) Imagen panorámica formada por las 10 imágenes promedio filtradas de *outliers* y representación de la nube 360-T final.**

La Figura 7 a) y b) muestra respectivamente la creación de una nube omnidireccional mediante nubes 360-T en tres posiciones de una habitación y mediante tres orientaciones del escáner en una única posición. En este último caso el sistema sensorial los giros en elevación fueron  $+45^{\circ}$  y  $-45^{\circ}$ . Las tomas fueron tomadas en distintos días por lo que la representación de la temperatura en escala de color es diferente.

Como ejemplo de nube térmica de planta, se presenta en la Figura 7 c) una nube térmica de una planta formada por cinco zonas. El alineamiento de las nubes ha sido realizado con la ayuda de un sistema de odometría proporcionado por un robot móvil sobre el que se asienta el sistema sensorial. Se realizaron un total de 21 nubes 360-T, procesando un total de unos 250 millones de puntos y 210 imágenes térmicas.



c)

**Figura 7: Creación de nubes omnidireccionales a) Solapamiento de nubes 360-T desde distintas posiciones del escáner. b) Solapamiento de nubes 360-T desde una posición y tres orientaciones del escáner. c) Nube omnidireccional térmica de una planta de un edificio.**

## 5. Conclusiones

La creación de nubes térmicas de interiores de edificios es una materia escasamente tratada en la actualidad, quizás debido a la complejidad de todo el proceso. La metodología seguida depende en gran medida de los dispositivos sensoriales con los que se cuenta y de la precisión de estos. Sin embargo, aparte de la dependencia sensorial, existen claras lagunas en este campo de investigación que aún no han sido abordadas con profundidad.

En este artículo se tratan dos aspectos muy importantes enmarcados en las primeras fases de la creación de un modelo térmico semántico como son: la creación de modelos de puntos térmicos omnidireccionales de nivel de planta y el filtrado de imágenes térmicas de *outliers* en el proceso de asignación de temperatura a los puntos. Otros aspectos, relacionados con la creación de modelos geométricos estructurados con información de temperatura y su migración a modelos BIM o BEM son materia de próximos artículos.

La metodología propuesta ha resultado ser satisfactoria, proporcionando buenos resultados en entornos de interiores a nivel de planta de edificio, consiguiendo un modelo de puntos térmico completo. Este modelo servirá como entrada a los procesos posteriores, tales como: algoritmos de segmentación y clasificación de nubes de puntos, determinación de facetas de paramentos, determinación de puertas y ventanas, así como la asignación de temperaturas a todos los elementos estructurales de la escena, para finalmente conformar una estructura de datos de un modelo propietario geométrico/térmico. Este trabajo se enmarca en el Objetivo de Desarrollo Sostenible 9: Construcción de infraestructuras resilientes, industrialización sostenible y fomento de la innovación.

## 6. Referencias

- Adán, A., Prieto, S. A., Quintana, B., Prado, T., & García, J. (2019). An Autonomous Thermal Scanning System with Which to Obtain 3D Thermal Models of Buildings. In *Advances in Informatics and Computing in Civil and Construction Engineering* (pp. 489–496). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-00220-6\\_58](https://doi.org/10.1007/978-3-030-00220-6_58)
- Adán, A., Quintana, B., & Prieto, S. A. (2019). Autonomous mobile scanning systems for the digitization of buildings: A review. In *Remote Sensing* (Vol. 11, Issue 3, p. 306). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/rs11030306>
- Besl, P. J., & McKay, N. D. (1992). A Method for Registration of 3-D Shapes. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 14(2), 239–256. <https://doi.org/10.1109/34.121791>
- Cho, Y. K., Ham, Y., & Golpavar-Fard, M. (2015). 3D as-is building energy modeling and diagnostics: A review of the state-of-the-art. *Advanced Engineering Informatics*, 29(2), 184–195. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2015.03.004>
- Fox, M., Coley, D., Goodhew, S., & De Wilde, P. (2015). Time-lapse thermography for building defect detection. *Energy and Buildings*, 92, 95–106. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.01.021>

- Gisbert, F., Bono, V., Luis, J., Soriano, C., Fiel, V., & Abad, V. (2021). State of the art of thermal modelling of buildings from point clouds and infrared thermography. *25th International Congress on Project Management and Engineering*, 6–9.
- Ham, Y., & Golparvar-Fard, M. (2013). An automated vision-based method for rapid 3D energy performance modeling of existing buildings using thermal and digital imagery. *Advanced Engineering Informatics*, 27(3), 395–409. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2013.03.005>
- Ham, Y., & Golparvar-Fard, M. (2015). Mapping actual thermal properties to building elements in gbXML-based BIM for reliable building energy performance modeling. *Automation in Construction*, 49, 214–224. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2014.07.009>
- Heikkila, J., & Silven, O. (1997). Four-step camera calibration procedure with implicit image correction. *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 1106–1112. <https://doi.org/10.1109/cvpr.1997.609468>
- Iwaszczuk, D., & Stilla, U. (2017). Camera pose refinement by matching uncertain 3D building models with thermal infrared image sequences for high quality texture extraction. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 132, 33–47. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.08.006>
- Larsen, S. F. (2012). Termografía infrarroja en la edificación: aplicaciones cualitativas. *Avances En Energías Renovables y Medio Ambiente*, 16, 25–32.
- Malmivirta, T., Hamberg, J., Lagerspetz, E., Li, X., Peltonen, E., Flores, H., & Nurmi, P. (2019, March 1). Hot or not? robust and accurate continuous thermal imaging on FLIR cameras. *2019 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications, PerCom 2019*. <https://doi.org/10.1109/PERCOM.2019.8767423>
- Peasley, B. K. (2013). *Large Scale 3D Mapping of Indoor Environments Using a Handheld RGBD Camera* (Issue December). <https://www.semanticscholar.org/paper/Large-Scale-3D-Mapping-of-Indoor-Environments-Using-Peasley/4a4121b22f5cc83f9045e2917884a465e199078c>
- Vidas, S., Moghadam, P., & Bosse, M. (2013). 3D thermal mapping of building interiors using an RGB-D and thermal camera. *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2311–2318. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2013.6630890>
- Wan, Q., Brede, B., Smigaj, M., & Kooistra, L. (2021). Factors influencing temperature measurements from miniaturized thermal infrared (Tir) cameras: A laboratory-based approach. *Sensors*, 21(24). <https://doi.org/10.3390/s21248466>
- Webb, T., & Langar, S. (2019). Utilizing BIM as a Tool for Managing Construction Site Safety: A Review of Literature. *Conference: 55th Annual Associated Schools of Construction International Conference, April*. <http://www.ascpro.ascweb.org>