

# LA TERMOGRAFÍA INFRARROJA PARA LA DOCUMENTACIÓN DE INMUEBLES

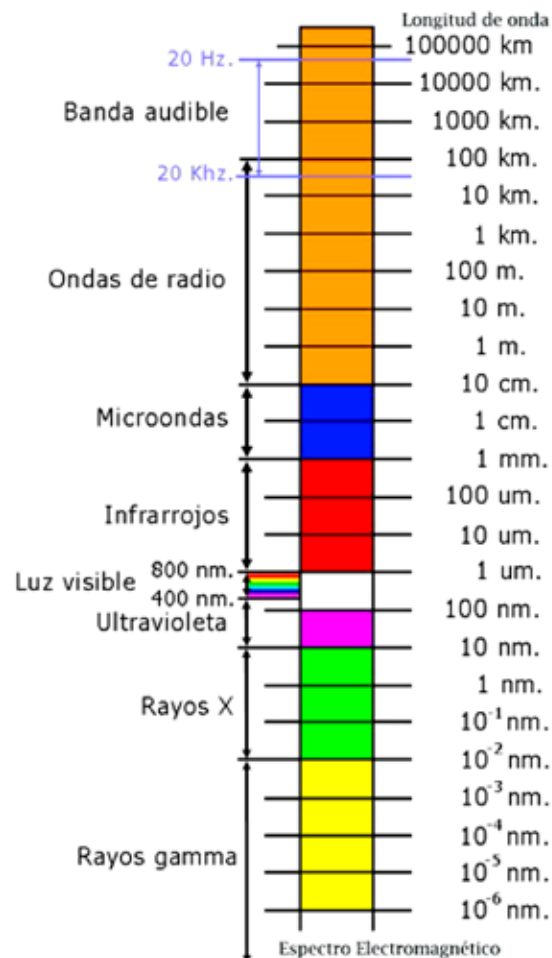
JOSÉ R. ORTEGA RAMÍREZ

ISBN: 978-607-484-648-5

## INTRODUCCIÓN

La termografía infrarroja (IRT por sus siglas en inglés: *Infrared Thermography*) fue inventada para aplicaciones militares, pero ha ampliado rápidamente su uso en el ámbito civil desde los años 70. Debido a sus múltiples ventajas ha llegado a ser una herramienta ampliamente utilizada como método de análisis no destructivo remoto y con capacidad para inspeccionar o analizar sin contacto físico un objeto, o incluso un inmueble, para detectar fallas o fracturas.

La termografía infrarroja es, entre las técnicas no destructivas, una herramienta importante para la investigación del patrimonio cultural en los estudios de estructuras arquitectónicas históricas (e.g. Avdelidis y Moropoulou 2004; Imposa 2010; Bisegna et al, 2013; Paoletti et al, 2013), donde para los tratamientos de restauración o conservación se busca identificar y registrar daños en las estructuras, como por ejemplo en mosaicos y frescos (Moropoulou et al, 2013).



**Figura 1.** Espectro electromagnético. Obsérvese que el infrarrojo se encuentra entre 1 y 100 μm.

La termografía infrarroja ha tenido una amplia aplicación en los diagnósticos rápidos de edificios, así como en la identificación de las texturas y discontinuidades en muros, en estructuras escondidas (e.g., Imposa 2010), en los sistemas de fracturas, en la detección de daños estructurales y en la resolución de problemas de humedad en edificios (e.g. Grinzato et al, 1998) y obras de arte (e.g. Abrosini et al, 2010). En ingeniería civil se incluye su uso para puentes y carreteras, pavimentos asfaltados, sistemas de alcantarillado, drenaje, canales y acueductos, dentro y fuera de edificios (cf. Buyukosturk 1998); incluso se ha propuesto como un método importante para identificar daños causados por terremotos en las estructuras de edificios históricos (Bisegna et al 2013).

### PRINCIPIOS BÁSICOS

El método se basa en la propiedad física que tiene todo cuerpo o material de emitir energía continuamente a partir de una temperatura superior al cero absoluto en grados Kelvin ( $\sim -273^{\circ}\text{C}$ ), a la que se le denomina como radiación térmica, misma que es transmitida al espacio en forma de

Material	Valor del coeficiente de emisividad
Aluminio comercial en lámina	0.09
Aluminio bruto	0.07
Asfalto	0.93
Basalto	0.72
Pintura epóxica negra	0.89
Ladrillo rojo	0.9
Ladrillo de cerámica	0.75
Concreto	0.85
Cobre electropulido	0.03
Cobre cubierto con una capa de óxidos	0.78
Granito	0.45
Yeso	0.85
Hielo	0.97
Hierro pulido	0.14-0.38
Pintura	0.96
Papel	0.93
Arena	0.76
Plata pulida	0.02-0.03
Acero pulido	0.072
Agua	0.95-0.963
Madera de encino	0.91

**Figura 2.** Ejemplo de la variación de los valores de emisividad de algunos materiales a temperatura de 300°K.

ondas electromagnéticas infrarrojas. Las ondas infrarrojas constituyen parte del espectro electromagnético en el rango entre 1 y 100  $\mu\text{m}$  (Figura 1).

Midiendo la radiación emitida en la porción infrarroja del espectro electromagnético es posible convertir sus valores en temperatura, a través de la ley de Stefan-Boltzmann.<sup>1</sup> De acuerdo a ésta el coeficiente de emisividad ( $\epsilon$ ) se define como la capacidad de un material para emitir energía radiante en forma de ondas electromagnéticas e indica la radiación de calor de un “cuerpo gris” comparado con la radiación de calor ideal de un “cuerpo negro” con un coeficiente de emisividad de 1 ( $\epsilon=1$ ). Como los coeficientes de emisividad varían con la temperatura, idealmente consideramos los valores de comparación estandarizando a 300°K (cf. en la Figura 2), dado que a esta temperatura se ha demostrado que teóricamente se obtiene el pico de la radiación o el valor más elevado con una longitud de onda de 100  $\mu\text{m}$ .

La energía emitida por un “cuerpo negro” o “radiación de cuerpo oscuro” toma la forma de un campo electromagnéti-

<sup>1</sup> La ley de Stefan-Boltzmann:  $\phi = \epsilon \sigma T^4$ , establece que el flujo radiactivo por unidad de superficie de un material se relaciona con la cuarta potencia de la temperatura absoluta T, donde  $\sigma$  es la constante de Stefan-Boltzmann ( $\sigma = 5.670373(21) \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ ),  $\epsilon$  el cociente de emisividad de un material y T la temperatura en °K.

co, presentando una relación de intensidad contra amplitud de onda, cuya gráfica se asemeja a una curva en forma de campana (curva normal o gaussiana) y en donde el punto máximo muestra la amplitud de onda en la cual la intensidad de la radiación es mayor. La amplitud de onda depende de la temperatura en grados Kelvin del objeto: entre más alta sea la temperatura, más cortas serán las amplitudes de onda y la radiación será más intensa. La amplitud de onda y la temperatura se relacionan por una función que incluye la constante de Wien<sup>2</sup> que es resultado del producto de la temperatura termodinámica de un “cuerpo negro” en grados Kelvin y la amplitud de onda de su pico energético en metros.

Sub-regiones	Longitudes de onda $\lambda$ ( $\mu\text{m}$ )
Cercano infrarrojo	0.75 -3
Medio infrarrojo	3-6
Lejano infrarrojo	6-15
Extremo Infrarrojo	15-100

**Figura 3.** Subregiones del infrarrojo y sus equivalentes en micras de longitudes de onda.

El calor es una forma de energía asociada al movimiento de los átomos y moléculas; al calentarse se mueven y chocan con sus vecinos transmitiendo la energía térmica. La radiación de calor puede ser vista como la propagación de ondas electromagnéticas dentro de un rango de longitud que varía de 0.75 a 100  $\mu\text{m}$ , correspondiente a la radiación infrarroja, situada en el espectro electromagnético entre el espectro visible y las microondas (cf. Figura 1). El intervalo es subdividido en regiones que van desde el cercano infrarrojo de 0.75 a 3  $\mu\text{m}$ , el infrarrojo medio de ondas cortas de 3 a 6  $\mu\text{m}$ , el lejano infrarrojo de ondas largas de 6 a 15  $\mu\text{m}$  y el extremo infrarrojo de 15 a 100  $\mu\text{m}$  ( cf.Figura 2).

Gracias a su capacidad para introducirse entre las capas superficiales de los materiales y de acuerdo con la teoría de la “radiación de los cuerpos oscuros”, a través de la utilización de procesos polinomiales para convertir los valores de los matices de grises (g) obtenidos de la cámara infrarroja a temperatura (cf. Figura 2) (T)<sup>3</sup>, es posible identificar, de manera no destructiva, aspectos relacionados con la altera-

<sup>2</sup> Constante de Wien: la relación entre la temperatura termodinámica de un objeto que radía energía electromagnética (“cuerpo negro”) y la amplitud de onda a la cual la intensidad de la radiación es mayor. La constante se define por:  $\sigma_w = 2.898 \times 10^{-3}$  metros-kelvin (0.2898 centímetros-kelvin).

ción de obras pictóricas con la radiación infrarroja de onda corta (de 3 a 6  $\mu\text{m}$ ) y también es posible identificar pigmentos que presentan una respuesta espectral en la región del cercano infrarrojo (de 0.75 a 3  $\mu\text{m}$ ), mientras que las ondas del lejano infrarrojo (de 6 a 15  $\mu\text{m}$ ) corresponden a la radiación térmica emitida por la superficie examinada del objeto.

La transferencia de calor tiene lugar en tres principales modos llamados: de conducción, convección y radiación. El que más nos interesa es el de radiación, ya que es éste el que detectan las cámaras de infrarrojo; sin embargo, los otros modos tienen que ser conocidos y entendidos para valorar las limitaciones de la técnica de análisis por termografía infrarroja.

- **Conducción:** Este mecanismo de transferencia de calor se observa cuando se introduce una cantidad de energía calorífica en un punto de un material, y esta se propaga a todo el resto.

- **Convección:** La convección implica la transferencia de calor de un punto a otro de un material mediante un fluido. Generalmente tiene que ver con el aire modificando la temperatura de un material. El efecto de convección en las estructuras de concreto suele ser importante porque las medidas suelen hacerse en campo y a veces la velocidad del viento puede alterar las medidas.

Cuando se requiere de análisis cuantitativos, es necesario llevar a cabo estudios experimentales para “predecir” el comportamiento térmico de la superficie examinada, ya sea analíticamente o a través del modelado de la transferencia de calor, por medio de procesos matemáticos de diferencias finitas o de elementos finitos.

## **LA TERMOGRAFÍA**

Aunque con algunas limitaciones, la termografía infrarroja es un método de diagnóstico, remoto, no destructivo, rápi-

<sup>3</sup> Por medio de la ecuación  $T(^{\circ}\text{C}) = 13.4 + 0.05g + 1.6 \times 10^{-5}g^2 - 2.2 \times 10^{-9}g^3$ , válida para un rango dado de temperatura producida por una superficie con una alta emisividad y observada a una corta distancia en una atmósfera considerada transparente, en la banda espectral de interés y donde la absorción se limite de 3 a 5  $\mu\text{m}$  (ondas cortas) o de 8 a 12  $\mu\text{m}$  (ondas largas) (cf. Maldague, 1994).

do y que provee información cualitativa y cuantitativa. Se basa en el principio de que las anomalías que se encuentran bajo la superficie de un material causan diferencias de temperatura detectables, es decir; la termografía registra la radiación emitida por la superficie de un material y a partir de ella produce una imagen térmica visual.

En la mayoría de los sistemas de termografía infrarroja se usa una cámara térmica, o cámara infrarroja, que cuenta con un detector sensible al infrarrojo. Estos dispositivos forman imágenes luminosas visibles al ojo humano, que muestran los contrastes de la radiación calorífica a partir de las longitudes de onda de la zona del infrarrojo del espectro electromagnético producidas por los cuerpos observados.

### **TIPOS DE TERMOGRAFÍA**

Según el problema de inspección a resolver, el análisis termográfico infrarrojo será pasivo o activo. Cuando los defectos (anomalías) provocan una diferencia térmica localizada, la técnica pasiva –que consiste en dirigir directamente una cámara infrarroja sobre los lugares sospechosos–, permite rápidamente identificar los problemas por simple visualiza-

ción de las zonas anormalmente calientes en las imágenes. En cambio, para evaluar defectos que no provocan diferencias anormales de temperaturas por ellos mismos (como es el caso de las fisuras, delaminaciones, desprendimientos, inclusiones de materiales extraños y de la porosidad), se aplica el método activo.

**Termografía pasiva.** Se basa en la primera y segunda ley de la termodinámica, en donde la temperatura es un parámetro esencial a medir. Proporciona un perfil de temperaturas en donde la variación o anomalía puede indicar una anomalía en el objeto. Si el objetivo es localizar o ubicar anomalías térmicas, la termografía pasiva resulta cualitativa.

Las aplicaciones más comunes de la termografía pasiva son en la medicina y diagnóstico, en el análisis de edificios, de componentes y procesos de mantenimiento. La identificación de las anomalías suele basarse en reglas empíricas aplicadas por personal especializado; sin embargo, existen investigaciones más complejas que emplean medidas cuantitativas, en cuyo caso es necesario realizar un modelado térmico. Pero, por ejemplo, si la “mancha de calor” es de 1º

a 2°C, es sospechoso, mientras que una diferencia de 4°C es ya una evidencia fuerte de un comportamiento anormal.

**Termografía activa.** Las medidas se realizan calentando el objeto y registrando la radiación infrarroja emitida durante su enfriamiento para conocer el comportamiento diferencial de la inercia térmica de los materiales dentro del primer centímetro.

Esta técnica puede ser usada para investigar la estructura y la composición de muros por medio de la temperatura de superficie, influida por la propagación del calor interno y por las condiciones ambientales. La variación de alguna de estas dos últimas, ya sean natural o artificialmente inducidas, causa un desequilibrio térmico que puede ser fácilmente visualizado a través de la termografía infrarroja. Del mismo modo, la variación de la temperatura en espacio y tiempo puede revelar discontinuidades bajo la superficie, producidas ya sea por el aumento de la humedad, fracturas u otro tipo de defectos.

La termografía activa tiene una gran variedad de aplicaciones como método de análisis no destructivo; además, como se conoce el tiempo cero, inicial del estímulo térmico externo, es posible entonces una caracterización cuantitativa.

Para la caracterización cuantitativa es necesario llevar a cabo estudios experimentales para “predecir” el comportamiento térmico de la superficie examinada, ya sea analíticamente o a través del modelado de la transferencia de calor por medio de procesos matemáticos de diferencias finitas o de elementos finitos, para lo cual existen varios paquetes de cómputo *ad hoc*, como el software *COSMOS/M<sup>MR</sup>* y *ThermoHeat 3D* ( cf. Krapez et al, 1991).

Existen varios modos de estimulaciones térmicas para la termografía activa, como termografía pulsada, calentamiento de paso, termografía fija y vibrotermografía.

- Termografía pulsada. Básicamente, la termografía de pulso (PT: *pulsed thermography*) consiste en un breve calentamiento aplicado al espécimen en estudio, ya sea por medio de un rayo láser o de luz, o con una línea de lámparas de aire de chorro frío o caliente, y en un registro del enfriamiento o disminución de la curva de temperatura contra tiempo.

Cualitativamente, la temperatura del material cambia rápidamente después del pulso térmico inicial debido

a la propagación por difusión del frente térmico bajo la superficie, y también debido a la radiación y pérdidas por convección. La presencia de alteraciones modifica la proporción de la difusión, por ello cuando observamos las imágenes térmicas de la superficie, los defectos aparecen en áreas de diferente temperatura con respecto a las áreas en buen estado, una vez que el frente térmico los alcanza; consecuentemente los defectos profundos se observarán más tarde y con contraste reducido.<sup>4</sup>

Existen dos limitaciones de la termografía infrarroja pulsada: la primera, relacionada con la profundidad de sondeo que será generalmente somero; la segunda, vinculada con un contraste térmico débil. Una regla empírica dice que “el radio del defecto más pequeño detectable deberá ser al menos uno o dos veces más grande que su profundidad bajo la superficie”. La regla es válida para materiales homogéneos e isotrópicos y es más complicada para los isotrópicos. No obstante, lo

anterior, la termografía pulsada o de pulsos ha demostrado ser útil para inspección de superficies, fracturas, delaminaciones, daños por impactos, desprendimientos y humedad, así como para evaluaciones de propiedades termofísicas en toda clase de industrias, como la aeroespacial, metal, construcción, etcétera.

- Termografía de calentamiento de paso de pulsos largos (SH: *Step heating long pulse*). Contrariamente a la termografía de pulso, el calentamiento escalonado de pulsos largos nos permite monitorear el aumento de la temperatura de la superficie durante la aplicación de la misma y las variaciones de ésta con el tiempo se relacionan con las características del espécimen. Esta técnica es referida algunas veces como radiometría infrarroja temporal o TRIR (siglas en inglés de *Time-Resolved Infrared Radiometry*) y tiene varias aplicaciones, como la evaluación de espesores de revestimientos en multicapas (e.g. Spicer et al. 1991), entre otras.

<sup>4</sup> De hecho, la observación en tiempo  $t$  es función (en una primera aproximación) del cuadrado de la profundidad  $z$ , y la pérdida del contraste térmico  $c$  es proporcional al cubo de la profundidad.  $t \sim z^2/\alpha$   $c \sim 1/z^3$ , donde  $\alpha$  es la difusividad termal del material.



- Termografía fija (LT: *Lockin thermography*). Se basa en las ondas termales generadas dentro del espécimen al ser sometido a un calentamiento permanente (e.g. Busse et al 1992). El espécimen se somete a un calentamiento modulado sinusoidal con una frecuencia de ondas térmicas dispersivas altamente atenuadas dentro del material, cercanas a la superficie. Las oscilaciones de temperatura resultantes en un régimen estacionario son registradas y las imágenes de fase y de magnitud de las ondas se relacionan con el tiempo de propagación térmica. Uno de los puntos fuertes de la técnica LT son las imágenes de fase, las cuales son relativamente independientes de los aspectos ópticos (reflexiones) de la superficie de los objetos analizados. El rango de profundidad de la magnitud de la imagen aproximada es dada por la amplitud de la difusión térmica<sup>5</sup>. Entre más alta la modulación de frecuencia menor será la profundidad de sondeo, mientras que, entre más baja sea la frecuencia mayor será la profundidad sondeada.

La aplicación de LT es atractiva para la investigación de bienes culturales, pues es posible aumentar la temperatura sin ningún daño para identificar diferencias muy finas entre capas de pinturas, yesos y/o concreto, así como para identificar detalles útiles en la comprensión de la composición de baldosas o mosaicos. Sin duda, son necesarios exámenes específicos para asociar las variaciones del ángulo de fase con las variaciones de las propiedades de los materiales (densidad, porosidad, dureza, etcétera).

La principal limitación de esta técnica es la disponibilidad de frecuencias para la modulación del flujo de calor, el cual no es suficiente para detectar defectos profundos.

- Vibrotermografía (VY: *Vibrothermography*). Es una técnica en la que las vibraciones mecánicas producidas fuera de la estructura se convierten en energía térmica, liberando calor por fricción exactamente en los lugares donde se encuentran los defectos, tales como fracturas

<sup>5</sup> Amplitud de la difusión térmica  $m$  expresada por:  $m = \sqrt{2k / \rho c \omega}$ , donde  $k$  es la conductividad,  $\rho$  la densidad,  $c$  el calor específico y  $\omega$  la modulación de frecuencia.

y delaminaciones. Si aumenta o disminuye la frecuencia de excitación mecánica los gradientes térmicos locales aparecen y desaparecen con una frecuencia de resonancia específica.

Las aplicaciones más típicas de esta técnica son la detección de corrosión, fracturas verticales y delaminaciones. Aunque los avances en la tecnología han facilitado la obtención de las imágenes térmicas, los contrastes y la resolución necesitan todavía ser mejoradas, particularmente las técnicas de posprocesamiento tales como el filtrado digital, incluyendo la convolución y la descomposición en ondículas.

### **APLICACIONES Y ADQUISICIÓN DE DATOS**

La aplicación práctica de la termografía en los diagnósticos o evaluaciones de inmuebles incluye la evaluación de los patrones térmicos de las superficies y la variación de la temperatura en espacio y tiempo. Estos estudios pueden revelarnos discontinuidades debajo de la superficie, humedad, fracturas u otras clases de defectos. Por ejemplo, en los acabados arquitectónicos de yeso su desprendimiento

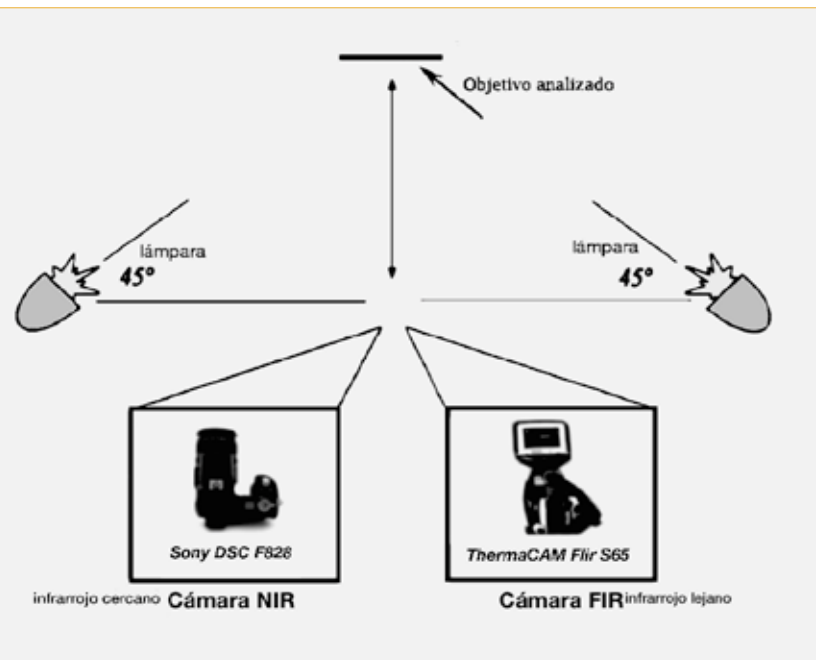
genera huecos que contienen aire, y éste, al tener una característica aislante, modifica el flujo de calor. Igualmente, la detección de fracturas en concreto de manera visual puede ser un trabajo lento y poco eficiente, mientras que con la termografía infrarroja, al calentar al concreto con microondas, estas son más fáciles de identificar, y se vuelve más útil cuando se aplica a estructuras de concreto con fracturas húmedas. Asimismo, como la mayoría de los materiales de construcción tienen valores de emisividad dentro del rango de 0.90 a 0.95, esto hace posible obtener la medida precisa de su temperatura, aunque existen materiales con valores de emisividad inferiores, como los metales y los materiales con superficies muy reflectoras.

Para la toma de datos es necesario tener en cuenta los parámetros ambientales, tales como la temperatura, la velocidad del viento y la distancia del objetivo u objeto estudiado. Por ejemplo, una mayor insolación durante el día aumentará la temperatura del objeto, mientras que el viento puede causar el efecto contrario. Del mismo modo, la lluvia provoca una disminución de la temperatura de superficie a través de la conductividad y de la evaporación. En todos los

casos, cualquier cambio ayudará a identificar anomalías y rasgos texturales y/o estructurales del objeto analizado.

### EQUIPO NECESARIO

Dependiendo si el análisis termográfico infrarrojo será pasivo o activo se requerirá una instrumentación específica. En



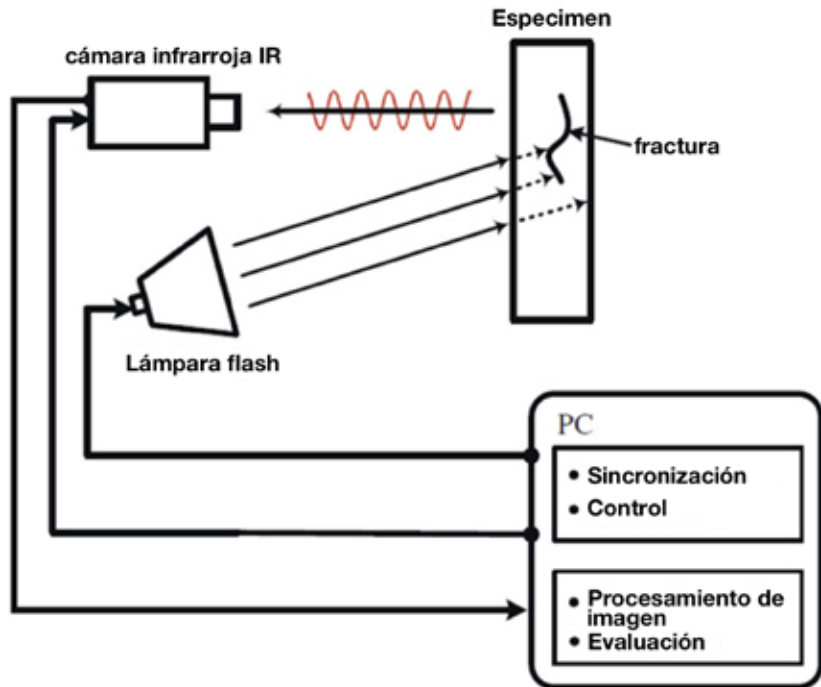
**Figura 4.** Sistema de Termografía activa con cámaras de infrarrojo para ondas cortas y largas.

todos los casos, sin embargo, será necesaria de una cámara de infrarrojo, un magnetoscopio video, una unidad de tratamiento (micro-computadora) y programas de cómputo para el procesamiento de los datos.

Para la técnica de termografía activa se requiere un equipo formado al menos por dos cámaras digitales con diferentes sensores para inspecciones o sondeos NIR (*Near Infrared*: ondas cortas) y FIR (*Far Infrared*: ondas largas) con filtros de color sensibles en el rango de 350 a 1100 nm, y puedan generar imágenes de al menos 14 bites, además de unidades de calentamiento como lámparas o elementos radiativos o de enfriamiento (líneas de chorros de aire). (cf. Figura 4).

### VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA TERMOGRAFÍA INFRARROJA

La termografía infrarroja nos ayuda a evaluar la presencia y magnitud de la dispersión del calor en las paredes, así como en identificación de fracturas, fugas de agua, infiltraciones en la mampostería, el desprendimiento de la cubierta de yeso en acabados, daños en techos, etcétera,



**Figura 5.** Configuración mínima de un sistema de termografía infrarroja. Figura modificada de X. Maldague 1990. **1)** Las cámaras capturan la información térmica y la transmiten a una computadora personal para su almacenamiento y posterior procesamiento. Estas cámaras deben ser capaces de registrar diferencias de temperatura hasta de  $0.08^{\circ}\text{C}$ . **2)** Una fuente de infrarrojos (sistema de lámparas). **3)** Un software específico y una microcomputadora para el procesamiento de los datos (Figura 3).

lo mismo en arquitectura rural que en obras monumentales, pero como todas las técnicas analíticas tiene ventajas y desventajas, las ventajas son:

1. Rápida inspección de objetos y/o muros con una alta resolución y un rango grande de temperatura.
2. No existe contacto entre la cámara infrarroja y el objeto analizado; la separación entre estos puede ser de algunos milímetros hasta kilómetros.
3. Seguridad, pues no provoca radiaciones dañinas; sin embargo la estimulación externa alta, sobre todo cuando se utiliza flashes, requiere de pantallas adecuadas y la toma de datos puede realizarse ya sea en el día o en la noche.
4. Versatilidad de posprocesamiento y resultados relativamente fáciles de interpretar.
5. Dado que la radiación térmica puede penetrar el humo y la niebla más rápidamente que la radiación visible, los objetos visualmente oscuros pueden ser identificados rápidamente.
6. Amplio rango de aplicaciones.

Por su parte, las desventajas son:

1. Dificultad para uniformizar una gran cantidad de energía en cortos periodos, sobre grandes superficies.
2. Efectos de pérdidas y perturbaciones térmicas (convectivas, radiactivas y conductivas). Como la radiación que alcanza al sistema de imagen térmica no es únicamente función de la temperatura del objeto mismo, sino también de su emisividad, y dado que ésta varía en función del tipo de material y de la brillantez de los diferentes objetos de sus alrededores, la temperatura relativa del objeto estudiado se verá alterada. Igualmente al exterior, la atenuación de la radiación en la atmósfera causada por la absorción de la energía por las partículas suspendidas y la subsecuente rerradiación en direcciones aleatorias, puede afectar la toma de datos y, consecuentemente, los resultados. Otros factores que pueden también afectar son la temperatura y la hora del día, o si el objeto es calentado o enfriado.
3. Costo del equipo (cámara infrarroja, unidades de estimulación térmica para termografía activa, *software y hardware*).

4. Limitación de capacidad para detectar cambios medibles de las propiedades térmicas profundas, lo que reduce la posibilidad de inspeccionar debajo de la superficie de materiales de espesores gruesos.

## **CONCLUSIONES**

La termografía es una técnica todavía joven que ofrece múltiples posibilidades para la evaluación no destructiva de materiales y estructuras. En el campo de los inmuebles ha sido experimentada en diferentes aplicaciones, desde la determinación de pérdidas de calor en áreas urbanas, pasando por la predicción de rupturas estructurales, hasta el análisis de problemas relacionados con la humedad en edificios.

A través de un correcto diseño metodológico que permita determinar correctamente el empleo de la técnica activa o pasiva, se ha reconocido a la termografía infrarroja como una excelente herramienta para la identificación rápida de texturas de mampostería, estructuras escondidas (antiguas puertas tapiadas, ventanas y cavidades), patrones de fracturamiento y distribución de la humedad en muros, así

como en la investigación de estructuras históricas en donde el tratamiento de la restauración o conservación pueden causar daños irreversibles a la estructura.

Finalmente, la termografía integrada con diferentes métodos no destructivos puede ser usada también en el estudio de diferentes obras de arte, tales como pinturas sobre madera, mosaicos y frescos.

## FUENTES CONSULTADAS

- Ambrosini, D., Daffara, C., Di Biase, R., Paoletti, D., Pezzati, L., Bellucci, R. y Bettini, F. (2010). “Integrated reflectography and thermography for wooden paintings diagnostics”, en *Journal of Cultural Heritage* 11:196–204.
- Avdelidis, N. P., y Moropoulou, A. (2004). “Applications of infrared thermography for the investigation of historic structures”, en *Journal of Cultural Heritage* 5:119–127.
- Bisegna, F., Ambrosini, D., Paoletti, D., Sfarrab, S., y Gugliermetti, F. (2013). “A qualitative method for combining thermal imprints to emerging weak points of ancient wall structures by passive infrared thermography – A case study”, en *Journal of Cultural Heritage*, disponible en <http://dx.doi.org/10.1016/j.culher.2013.03.006>.
- Busse G., Wu D., Karpen W. (1992), “Thermal wave imaging with phase sensitive modulated thermography”, en *Journal of Applied Physics*, 71[8]: 3962-3965.
- Grinzato, E., Vavilov, V., and Kauppinen, T. (1998) “Quantitative infrared thermography in buildings”, en *Energy and Buildings* 29:1-9.
- Buyukosturk, O. (1998), “Imaging of concrete structures” en *NDT&E International*, Vol. 31, No. 4, pp. 233-243.
- Imposa, S. (2010), “Infrared thermography and Georadar techniques applied to the “Sala delle Nicchie” (Niches Hall) of Palazzo Pitti, Florence (Italy)”, en *Journal of Cultural Heritage* 11: 259–264.
- Krapez J. C., Maldague X., Cielo P. (1991), “Thermographic NonDestructive Evaluation: Data inversion procedures, Part II: 2-D Analysis and Experimental Results”, en *Research in Nondestructive Evaluation*, 3: 101-124.
- Maldague X. ed. (1994). *Infrared Methodology and Technology*, Gordon and Breach. NY. 525 pp.
- Maldague X. (1993). *Nondestructive evaluation of materials by infrared thermography*. London. Springer-Verlag, 224 p. (new revised edition, John Wiley & Sons, 2001).
- Moropoulou, A., Bakolas, A., Karoglou, M., Ekaterini T. Delegou, T., E., Labropoulos, K., C., y Katsiotis, N., S. (2013), “Diagnostics and protection of Hagia Sophia mosaics”, en *Journal of Cultural Heritage* 14S: e133–e139.
- Paoletti, D., Ambrosini, D., Sfarrab, S., y Bisegna, F. (2013), “Preventive thermographic diagnosis of historical buildings for consolidation” en *Journal of Cultural Heritage* 14: 116–121.
- Spicer J.W.M., Kerns W.D., Aamodt L.C., y Murphy J.C. (1991) “Time-resolved infrared radiometry (TRIR) of multilayer organic coatings using surface and subsurface heating”, en *Thermosense XIII*, Proc. SPIE, G. S. Baird ed., 1467: 311-321.

## **JOSÉ R. ORTEGA RAMÍREZ**

Doctorado y Maestría por la *Université Louis Pasteur de Strasbourg I*, Francia; Estudios Superiores Especializados en Informática en el *Institut Supérieur d'Informatique et Automatique de Lorraine* de la Universidad de Nancy I, Francia y Licenciatura en Ingeniería Geológica por el IPN. Investigador Titular "C", Responsable del Laboratorio de Geofísica del INAH, y es responsable y corresponsable de proyectos de investigación financiados por el CONACYT, UNAM, INAH.

Cuenta con diversos artículos arbitrados, de divulgación, capítulos y libros como primer autor y coautor. Es revisor de *Journal of Geophysics*.