



# Proyectos de investigación en parques nacionales: 2019-2023



**NATURALEZA Y PARQUES NACIONALES**  
Serie Investigación en la Red

Las acciones prioritarias o medidas de conservación propuestas por los autores, no son necesariamente medidas avaladas por los gestores y técnicos de los parques o del Organismo Autónomo. Las recomendaciones reflejan la opinión de los autores de los artículos.

Fotos de portada: José María Pérez de Ayala, Marc Ventura y Enric Ballesteros

Edita: Organismo Autónomo Parques Nacionales

Catálogo de Publicaciones de la Administración General del Estado en: <http://publicacionesoficiales.boe.es/>

NIPO: 678-25-026-5

ISBN: 978-84-8014-318-9

Depósito legal: M-18073-2025

Edita e imprime: Masquelibros, S.L.



## ÍNDICE

	<u>Págs.</u>
RAMÓN PEREA, MARTA PELÁEZ, GUILLERMO CARRANZA, MIQUEL CAPÓ, PEDRO DOMÍNGUEZ, DANIEL GAMBRA, ALBA GÓMEZ-MUÑOZ, JESÚS RODRÍGUEZ-CALCERRADA, GUILLERMO GONZÁLEZ-GORDALIZA, JOSÉ MARÍA FEDRIANI, LUIS GIL: <i>Herbivoría y regeneración natural en sistemas mediterráneos dominados por ungulados: implicaciones para una gestión sostenible ante el cambio global</i> .....	9
VÍCTOR A. ARAÑA PULIDO, FRANCISCO J. CABRERA ALMEIDA, JAIME R. TICAY RIVAS, FEDERICO GRILLO DELGADO, B. PABLO DORTA NARANJO, PEDRO QUINTANA MORALES, EUGENIO JIMÉNEZ YGUÁCEL, ANTONIO D. GALVÁN HERNÁNDEZ, EDUARDO MENDIETA OTERO, ITZIAR G. ALONSO HERNÁNDEZ Y DAVID C. SÁNCHEZ RODRÍGUEZ: <i>Geolocalización automatizada de incendios forestales mediante red sostenible de sensores de bajo coste y fácil despliegue. (GUIRRE)</i> .....	33
ETHEL ELJARRAT, ANDREA PERIS, MIGUEL ÁNGEL BRAVO, ANTONIO MARTÍNEZ, RAQUEL BAOS, FABRIZIO SERGIO, FERNANDO HIRALDO, GUILLERMO BLANCO: <i>Impacto de las actividades agrícolas en la fauna de los Parques Nacionales de Doñana y Tablas de Daimiel</i> .....	53
JAIME BOSCH, BARBORA THUMSOVÁ: <i>Incidencia de enfermedades emergentes de anfibios en los Parques Nacionales de montaña de la España peninsular</i> .....	71
CARMEN PÉREZ-MARTÍNEZ, JOANA LLODRÀ-LLABRÉS, TERESA BUCHACA, TERESA VEGAS-VILARRÚBIA, JAVIER SIGRÓ, JAVIER MARTÍNEZ-LÓPEZ, JOSÉ CARLOS PÉREZ-GIRÓN, THEDMER POSTMA, JOSÉ M. CONDE-PORCUNA, ELOÍSA RAMOS-RODRÍGUEZ, EULOGIO CORRAL-ARREDONDO, GONZALO JIMÉNEZ-MORENO & DOMINGO ALCARAZ-SEGURA: <i>Estado ecológico de las lagunas de alta montaña de Sierra Nevada: análisis a diferentes escalas espaciotemporales</i> .....	91
TERESA VEGAS-VILARRÚBIA, ARNAU BLASCO, MIGUEL ÁNGEL CALERO MAARTEN BLAAUW, SANDRA GARCÉS, TERESA BUCHACA ESTANY, NÚRIA CAÑELLAS, VALENTÍ RULL: <i>Lagos centinela de cambio global en el Parque Nacional de Aiguestortes i Estany de Sant Maurici: análisis multidisciplinar del tardiglaciario y del holoceno</i> .....	121
JAVIER SIGRO , MERCÈ CISNEROS: <i>Tendencias y variabilidad espacial de la temperatura y la precipitación en zonas de alta montaña de la península ibérica (1930-2020). Parque Nacional de Sierra Nevada y Parque Nacional de Aiguestortes i Estany de Sant Maurici</i> .....	141
VENTURA M., T. BUCHACA, A. PÉREZ-HAASE, M. ALONSO, J. CANER, G. DE MENDOZA, S. GARCÉS-PASTOR, O. GRAU, B. JIMÉNEZ-ALFARO, V. LECEGUI, V. OSORIO, A. PELACHS, R. PÉREZ-OBÍOL, E. PLADEVALL-IZARD, M.A. PUIG, I. SABÁS, M. SÁNCHEZ-MORALES, O. S. WANGENSTEEN & J. M. NINOT: <i>Ecosistemas acuáticos de alta montaña: refugio de biodiversidad oculta y centinelas del cambio global</i> .....	163

## **GEOLOCALIZACIÓN AUTOMATIZADA DE INCENDIOS FORESTALES MEDIANTE RED SOSTENIBLE DE SENSORES DE BAJO COSTE Y FÁCIL DESPLIEGUE. (GUIRRE)**

**VÍCTOR A. ARAÑA PULIDO<sup>1</sup>, FRANCISCO J. CABRERA ALMEIDA<sup>1</sup>, JAIME R. TICAY RIVAS<sup>1</sup>, FEDERICO GRILLO DELGADO<sup>2</sup>, B. PABLO DORTA NARANJO<sup>1</sup>, PEDRO QUINTANA MORALES<sup>1</sup>, EUGENIO JIMÉNEZ YGUÁCEL<sup>1</sup>, ANTONIO D. GALVÁN HERNÁNDEZ<sup>1</sup>, EDUARDO MENDIETA OTERO<sup>1</sup>, ITZÍAR G. ALONSO HERNÁNDEZ<sup>1</sup> Y DAVID C. SÁNCHEZ RODRÍGUEZ<sup>1</sup>**

### **RESUMEN**

El cambio climático aumenta el riesgo de incendios forestales y la vulnerabilidad de los parques nacionales. El personal encargado de la gestión y mantenimiento requiere de medios que sean de fácil manejo e instalación, que permita aprovechar el conocimiento detallado que se tiene del terreno y de la actividad que en él se desarrolla. Además, deben ser soluciones sostenibles desde un punto de vista técnico, operativo y económico.

El Proyecto GUIRRE ha tenido como objetivo principal el desarrollo de un sensor sostenible que puede desplegarse fácilmente y que puede automatizar las tareas necesarias para geolocalizar un incendio forestal y disponer de esa información en el centro de gestión del parque.

Para poder garantizar la sostenibilidad, se han evaluado dispositivos de bajo coste y software libre, formando parte de una arquitectura modular que permite mejorar prestaciones de forma específica sin modificar el resto del diseño. Los errores de temperatura que se cometen cuando la profundidad de campo de la imagen termográfica es elevada (1-10 km en terreno abrupto), son reducidos mediante modelos de corrección de la transmisividad. Se han usado técnicas de ajuste del perfil del terreno, a través de una interfaz gráfica que puede funcionar en modo local, para compensar los errores de geolocalización producidos por desviaciones del norte magnético en áreas de interferencia. Por último, se ha desarrollado una aplicación web para evaluar de forma remota las prestaciones de los sensores instalados en puntos fijos, pero activos en todo momento. El acceso de la web acepta tres tipos de usuarios jerárquicos: mantenimiento, control de gestión y control técnico.

La solución ha sido evaluada con éxito en quemas controladas realizadas en Gran Canaria y probada en los Parques Nacionales de Garajonay (La Gomera), Caldera de Taburiente (La Palma) y Teide (Tenerife).

**Palabras clave:** detección, seguimiento, geolocalización, incendio forestal, imagen sintética y sensor sostenible.

<sup>1</sup> Instituto para el Desarrollo Tecnológico y la Innovación en Comunicaciones (IDeTIC), Departamento de Señales y Comunicaciones, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria (ULPGC), Campus Universitario de Tafira, 35017, Las Palmas, España.

<sup>2</sup> Consejería de Medio Ambiente, Cabildo de Gran Canaria, 35003, Las Palmas, España

## ABSTRACT

Climate change increases the risk of wildfires and the vulnerability of National Parks. The technical staff involved in management and maintenance demand resources that are easy to handle and deploy, allowing them to take advantage of their extensive knowledge of the terrain and the activities that take place there. Moreover, they must be technically, operationally, and economically sustainable solutions.

The main objective of the GUIRRE Project has been the development of a sustainable sensor that can be easily deployed and that can automate the tasks necessary to geolocate a wildfire and make this information available at the park management center.

In order to ensure sustainability, low-cost devices and open source software have been evaluated as part of a modular architecture that allows for specific performance improvements without modifying the rest of the design. Temperature errors that occur when the depth of field of the thermographic image is high (1–10 km in abrupt terrain) are reduced by means of transmissivity correction models. Terrain profile adjustment techniques have been used through a graphical interface that can operate in local mode to compensate for geolocation errors caused by deviations from magnetic north in areas of interference. Finally, a web application has been developed to remotely evaluate the performance of sensors installed at fixed points but active at any time. The web access accepts three hierarchical user types: maintenance, management control, and technical control.

The solution has been successfully evaluated in controlled fires in Gran Canaria and tested in the National Parks of Garajonay (La Gomera), Caldera de Taburiente (La Palma), and Teide (Tenerife).

**Keywords:** detection, tracking, geolocation, wildfire, synthetic image, and sustainable sensing.

## INTRODUCCIÓN

A finales de 2017, cuando se estaba redactando el estado del arte que contextualiza los objetivos del proyecto GUIRRE, correspondiente a la convocatoria de 2017 del Organismo Autónomo Parques Nacionales, España era uno de los tres países de Europa más afectados por incendios forestales (SAN-MIGUEL-AYANZ et al. 2017). Durante el decenio de 2006 a 2015, se registró un promedio anual de más de 13.200 incendios y 100.385 ha quemadas (7,6 ha/incendio). Durante el último decenio documentado (2012-2021), España ya es el segundo país de Europa (KOK & STOOFF 2023), con más de 10.616 incendios y 94.294 ha quemadas al año (8,9 ha/incendio), solo por debajo de Portugal que acreditó 15.553 incendios y 125.831 ha quemadas al año (8,1 ha/incendio). Es decir, ha bajado el número de incendios, pero tienen un mayor impacto. El panorama para los años venideros no es más alentador puesto que el riesgo climático de incendios forestales está aumentando en todo el mundo debido al calen-

tamiento global (JONES et al. 2022). Puesto que la detección y actuación temprana es una de las medidas más eficaces para mitigar sus efectos, se plantea la necesidad de mejorar la eficiencia de los sistemas de detección y geolocalización precisa, mediante el empleo de nuevas tecnologías, el desarrollo de sistemas innovadores y la optimización del despliegue de medios. Ser capaz de detectar y rastrear el comportamiento de incendios forestales es vital para organizar de forma rápida y eficaz los recursos disponibles y así poder controlarlos y extinguirlos cuanto antes. Esta tarea puede verse gravemente afectada en zonas de terreno abrupto, que no sólo dificultan la detección y vigilancia visual de los focos de incendios o de posibles puntos calientes, sino que también presentan corrientes térmicas muy localizadas y condiciones meteorológicas que afectan la predicción de la evolución de los incendios forestales (SANJUAN et al. 2014).

Actualmente existen diversos sistemas de detección y seguimiento de incendios forestales

(MOHAPATRA & TIMOTHY 2022), entre los que destacan las redes de nodos sensores, la teledetección por satélite, los vehículos aéreos tripulados y no tripulados, las redes de cámaras estáticas, y los programas predictores. Es algo desalentador ver que el panorama no ha cambiado sustancialmente desde las revisiones documentadas en 2017 (ALKHALIB 2014; DUFF et al. 2015; SCHNEBELE et al. 2015; HUA et al. 2017).

La visión desde puntos del terreno, habitualmente elevados, es la solución más recurrida para garantizar una vigilancia continuada. Un clásico en la detección de incendios forestales son las redes de cámaras estáticas situadas sobre torres en puntos elevados. Es la más extendida porque facilita la vigilancia continuada, pero en la práctica sigue sin usarse con capacidad de georreferenciación para poder seguir la evolución de un incendio. Además, el uso de cámaras térmicas está limitado a distancias cortas porque no se usan técnicas de corrección de la transmisividad para corregir el valor de la temperatura. En el ámbito de observación terrestre, las redes basadas en nodos sensores son las más sencillas y económicas de diseñar e implantar. En los últimos años, esta categoría ha recibido la mayor atención, con numerosos proyectos a gran escala financiados y desarrollados en colaboración por varios gobiernos (DHS 2021), con la intención de encontrar nuevas soluciones sostenibles, tanto técnica como económicamente. Sin embargo, estas soluciones siguen mostrando problemas de despliegue, recuperación y mantenimiento de los nodos, además de que no son capaces de hacer ningún tipo de georreferenciación automatizada.

La principal fuente de datos viene de imágenes tomadas desde el aire. Las soluciones basadas en la toma de imágenes desde satélites, sigue estando principalmente limitada por la falta de resolución espacial y temporal. Sin embargo, permite tener una perspectiva amplia de la evolución del incendio y sistemas como el CubeSat (AZAMI et al. 2022), van reduciendo los costes. Los vehículos aéreos proporcionan un gran campo de visión instantáneo combinado con una gran flexibilidad a la hora de supervisar zonas de riesgo. Los no tripulados o UAV (UAV del inglés *Unmanned Aerial Vehicles*) van ganando terreno por su movi-

lidad, aunque muestran problemas en la vigilancia ininterrumpida. Su implantación es menos costosa que la de los satélites y también pueden ser más capaces de identificar incendios forestales más pequeños que esta última tecnología. Sin embargo, siguen usando la técnica de ortofotografía para geolocalizar los incendios, lo que supone sobrevolar la zona afectada, aumentando el riesgo de las tareas de extinción del operativo aéreo, además de numerosos ajustes manuales que son necesarios para llevar la información procesada al plano (JAIN et al. 2020). Aún con todo, es una de las tecnologías consideradas con mayor potencial y va contando con mayor aceptación como herramienta para realizar tareas de observación y gestión en la extinción.

Por último, una herramienta muy útil en la gestión de los incendios, son los programas predictores. Permiten obtener una visión global del comportamiento del incendio, aunque no de forma precisa en cuanto a localizaciones concretas y puntos calientes. La inteligencia artificial ha entrado como elemento innovador en estos programas que se usan para predecir la evolución de un incendio a partir de un foco (PEREIRA et al. 2022). Sin embargo, siguen necesitando de una realimentación de datos fiables y continuados, tanto de las condiciones del terreno y microclimáticas en la fase de predicción, como de la posición en la que se encuentra el incendio en un instante dado en la fase de corrección.

Sin embargo, poder disponer de un sistema de detección temprana y seguimiento de incendios forestales supone una inversión inicial y coste anual, que está fuera del alcance de los presupuestos que manejan nuestros parques nacionales (PPNN), incluso de muchas administraciones locales y regionales. Además, la orografía abrupta y boscosa que suele caracterizar a estas áreas, dificulta la efectividad y cobertura de los sistemas de prevención convencionales.

### Hipótesis de partida y objetivos

Según todo lo expuesto anteriormente, se puede concluir que el problema de la detección y el seguimiento de las líneas de fuego sigue estando abierto, al menos desde un punto de vista de sostenibilidad realista. La búsqueda de esa via-

bilidad debe traducirse en soluciones I+D+i que combinen aspectos prácticos, técnicos y económicos. La detección, localización y seguimiento de un incendio forestal requiere de herramientas fiables que permitan conocer en tiempo real el estado del incendio y su propagación, asistiendo al personal responsable en la toma de decisiones.

Los trabajos encaminados a conseguir este objetivo formaron parte de los resultados obtenidos en el proyecto SeLiF (<https://idetec.ulpgc.es/idetic/index.php/es/proyecto-selif>), convocatoria de proyectos de investigación en la Red de Parques Nacionales de 2012 y que son la base de esta propuesta. La justificación se fundamentó en la información recopilada de los técnicos de incendios forestales de La Comunidad Canaria que operan en los PPNN, concretamente, con los responsables en las islas de Gran Canaria, Tenerife, La Palma y La Gomera, por lo que la propuesta cuenta con la experiencia de campo que nos aportan. Las principales hipótesis de partida que fueron formuladas en el proyecto SeLiF y que siguen estando vigentes en GUIRRE son:

- En caso de incendio, disponer de información de la evolución de las líneas de fuego permite optimizar el operativo de extinción disponible.
- En los casos reales no es necesario conocer en su totalidad la línea cerrada de evolución. Basta con centrarse en aquellas zonas que son o pueden ser un peligro potencial.
- El sistema debería funcionar correctamente las 24 horas del día.
- El conocimiento que los técnicos tienen del terreno les permite saber cuáles son los puntos apropiados de observación.
- Es suficiente detectar el fuego a una distancia de dos/tres kilómetros porque en zonas abruptas el rango visible no suele superar estas distancias. Sin embargo, la solución debería adaptarse fácilmente a distancias mayores.

- La movilidad del sistema permite mantenerlo resguardado cuando cesa la alarma y ello redundaría en una sustancial reducción de los costes de mantenimiento y vandalismo.
- El personal que participa en la extinción de un incendio está sometido a un alto estrés. Por ello, la puesta en marcha del sensor no debería requerir operaciones complejas, llegando incluso a tener que colocarlo y pulsar un botón.
- En casos puntuales de alerta roja de peligro de incendio, sería posible seleccionar puntos estratégicos que cubriesen las áreas más críticas y usar la capacidad de detección de forma preventiva.

La solución adoptada en el proyecto SeLiF consistió en integrar este tipo de cámaras térmicas en un formato altamente transportable, autocalibrable, autónomo e inalámbrico, de forma que puedan ser rápidamente desplegadas ante un incendio para cubrir el área de interés. Las imágenes térmicas georreferenciadas serían procesadas por un ordenador y contrastadas con una base de datos SIG (Sistema de Información Geográfica), de forma que el sistema de representación pudiera mostrar en tiempo real la evolución de las líneas de fuego (SELIF 2012).

Sin embargo, a pesar de los buenos resultados obtenidos (PÉREZ et al. 2016), el sensor presenta ciertas limitaciones cuyos antecedentes se relacionan a continuación:

Sensor móvil de despliegue rápido.- La cámara térmica utilizada es de coste elevado (FLIR A615: <http://www.flir.com/automation/display/?id=41330>) pero posee utilidades que pueden utilizarse para calibrar otras de peores prestaciones y que pueden ser apropiadas para incendios forestales. El lenguaje de programación utilizado (Matlab: <https://es.mathworks.com/>) no es libre, pero muy versátil y apropiado para un desarrollo experimental que se ejecuta sobre un ordenador con gran potencia de cálculo y memoria.

Temperatura umbral de detección.- Es imposible conocer la temperatura asociada a cada pixel de

una cámara térmica si no se sabe la distancia a la que se encuentra, es decir, sus coordenadas espaciales. Esto es así por la fuerte dependencia que existe entre la transmisividad, que puede variar de 1 a 0.2 en cinco kilómetros (MINKINA & KLECHA 2016), y la energía recibida que se utiliza para el cálculo de la temperatura (GAUSSORGUES 1994). Las cámaras trabajan con transmisividades constantes para toda la imagen y eso es suficiente para muchas aplicaciones (instalaciones, edificaciones, equipos, etc.). Sin embargo, la imagen posee una profundidad de campo elevada (1-10Km) cuando se trata de un paisaje, razón fundamental por la que el factor humano y la experiencia intervienen para interpretar los resultados en caso de incendio forestal, aunque esto no debería ser un problema en un sistema instalado en torres fijas donde puede realizarse una calibración previa.

Alteración de campo magnético.- El sistema desarrollado necesita el dato de posición geográfica y orientación (*yaw* referido a norte geográfico, *pitch* y *roll*). De todos ellos, el más sensible es el *yaw* porque utiliza el norte magnético y la declinación para su cálculo. Los parámetros de orientación se obtienen del Sistema de Medida Inercial (conocido como IMU, del inglés: *Inertial Measurement Unit*). Sin embargo, en ciertas ubicaciones existían irregularidades en el campo magnético de la zona que modificaban sustancialmente el norte magnético (interferencia local) y, por ende, el valor del norte geográfico calculado, que se traduce en errores de geolocalización de los píxeles. Estas alteraciones son debidas a la presencia de materiales que alteran el campo magnético (GARCÍA 2014).

Ajuste de perfiles.- Los métodos visuales de geolocalización utilizan esta técnica para ser capaces de proporcionar la posición y orientación. Se clasifican basados en imágenes y basados en datos de múltiples modalidades (BEJCHA & MARTIN 2017). Los primeros utilizan bases de datos de imágenes etiquetadas y se emplean en escenas populares y urbanas. Los segundos hacen uso de datos de mapas digitales de elevación (MDE), de lidar (acrónimo del inglés *LiDAR*, *Light Detection and Ranging* o *Laser Imaging Detection and Ranging*), etc., siendo adecuados para entornos naturales. Los métodos más comunes utilizan MDE

como referencia para igualar alguna característica de la imagen, como picos de montaña relevantes en el horizonte (NAVAL 1998) o la línea del horizonte (BEHRINGER 1999). Estos sistemas encuentran problemas cuando la línea del horizonte o los accidentes geográficos aprovechados están parcialmente ocultos o borrosos por condiciones atmosféricas u obstáculos físicos.

Sistema de evacuación de datos.- El prototipo desarrollado contiene el sistema de evacuación de datos de banda ancha sobre red *wifi* y 3G/4G que permiten la transmisión de imágenes. En el primer caso posee bajo alcance, pero es muy útil en la fase de mantenimiento, mientras que el segundo suele fallar en caso de incendio. Por ello, se debe disponer de un sistema auxiliar que permita al menos enviar la información mínima requerida para poder geolocalizar el incendio y realizar un seguimiento de las líneas de fuego en tiempo real. Se desarrollaron varios sistemas alternativos de comunicaciones (SÁNCHEZ 2015) basados en *TETRA* (acrónimo de *Terrestrial Trunked Radio* que opera típicamente en la banda de frecuencias de UHF o *Ultra High Frequency*) e *Iridium* (sistema de comunicación satelital), pero ambos mostraban mala cobertura en zonas donde la orografía y la vegetación eran adversas, además de ser soluciones relativamente costosas y de gran tamaño en el caso del *TETRA*. Actualmente, existen nuevos dispositivos que pueden ser utilizados para desarrollar sistemas compactos en la banda de frecuencias de VHF (*Very High Frequency*) que llegan hasta 2 vatios de potencia ([www.radiometrix.com](http://www.radiometrix.com)) y que son mucho más adecuados para evacuar la información en áreas abruptas y de vegetación espesa.

En respuesta a dichas premisas, el objetivo del proyecto GUIRRE es la búsqueda de soluciones a los problemas detectados en el prototipo desarrollado en el proyecto SeLiF, logrando un sistema sostenible en términos técnicos, operativos y económicos. Los estudios de viabilidad han ido encaminados hacia:

- La integración de cámaras de coste medio y bajo.
- El desarrollo del demostrador en entorno de programación libre.

- La solución a los problemas de alteración de campo magnético en puntos con interferencia.
- El desarrollo de un sistema eficiente de evacuación de información cuando 3G/4G/5G no están operativos (habitual en caso de incendio).
- La evaluación del sistema y elaboración de un plan de cobertura y test para las áreas de interés: PPNN de Caldera de Taburiente, Garajonay y Teide.

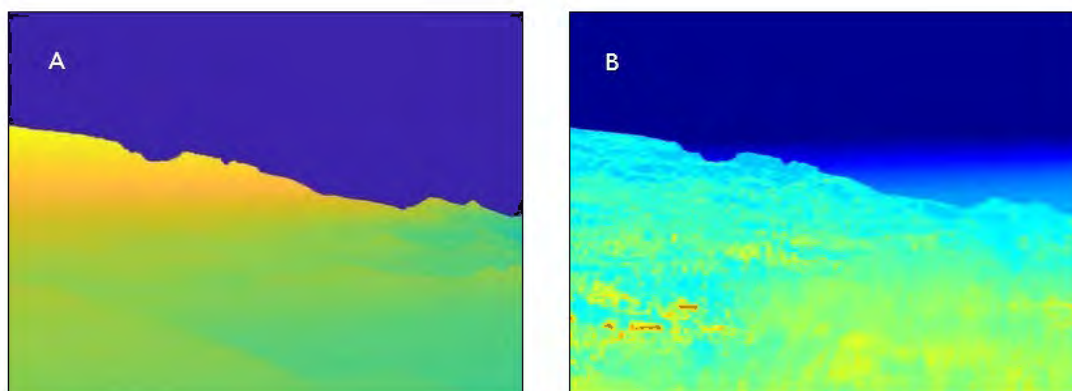
### Sistema de visión sintética

La detección de incendios mediante el uso de cámaras térmicas está basada en la superación de un umbral de temperatura suficientemente alto para considerar que está provocado por fuego. Un sencillo procesado de la temperatura asociada a cada pixel de la imagen es suficiente para saber si se ha producido un incendio. El problema radica en calcular la temperatura del pixel y situar dichos puntos calientes en un plano digitalizado, es decir, geolocalizar el incendio. Para conseguir esta geolocalización se ha usado un procedimiento basado en imagen sintética (ARANA-PULIDO 2018).

## MATERIAL Y MÉTODOS

En este apartado se expone las herramientas y procedimientos utilizados para el diseño del prototipo. Se comienza con una breve descripción del sistema de visión sintética desarrollado en el proyecto SeLiF (SELIF 2012), que es la parte clave sobre la que giran las prestaciones novedosas del sistema propuesto y de la que se deriva el resto de beneficios. A continuación, se detalla la evolución de las partes que configuran la unidad de despliegue rápido hasta llegar a la versión conseguida al finalizar el proyecto.

Una imagen sintética es la que obtendría una cámara virtual, con una ubicación y orientación dada, sobre un plano 3D digitalizado del terreno (los mapas con resolución  $5 \times 5 \text{m}^2$  pueden adquirirse gratuitamente para todo el territorio español). La imagen sintética es una matriz de dimensión  $\{m, n, 3\}$  que contiene para cada pixel de la imagen  $(i, j)$ ; siendo  $1 \leq i \leq m$  y  $1 \leq j \leq n$ , la longitud, latitud y altura de un determinado punto del plano digitalizado 3D. La Figura 1A muestra la imagen que se obtendría si representamos la matriz de alturas, asignando una coloración en función de la altura del pixel y en la Figura 1B, se muestra una fotografía obtenida desde una



**Figura 1.** Ejemplo de aplicación para imagen térmica e imagen sintética elaborada para el proyecto GUIRRE. Ubicación del sensor en latitud  $27.9129^\circ$ , longitud  $-15.5571^\circ$  y altura sobre el nivel del mar de 723m, orientado hacia el pueblo de Santa Lucía. (A) Representación de alturas asociadas a cada punto de la imagen sintética (640x480 puntos). (B) Imagen obtenida con cámara térmica (640x480 puntos).

**Figure 1.** Application example of thermographic image and synthetic image created for GUIRRE project. Location of the sensor at latitude  $27.9129^\circ$ , longitude  $-15.5571^\circ$  and height above sea level of 723m, oriented towards the village of Santa Lucía. (A) Representation of heights associated to each synthetic image pixel (640x480 pixels). (B) Image obtained from thermographic camera (640x480 pixels).

cámara térmica ubicada en el mismo punto del terreno. Es posible realizar la georreferenciación de la imagen térmica mediante la correspondencia entre los puntos de la imagen térmica y los puntos de la imagen sintética. Así, se puede determinar las coordenadas del terreno y altura de cada punto de la imagen térmica. Si además se conocen los puntos que superan el umbral de temperatura que determina la existencia potencial de fuego, es posible representar esa información en un plano 3D digital. Si este procedimiento se realiza de forma continuada en el tiempo, es posible geolocalizar la evolución de un incendio.

### Desarrollo de herramientas para mejora del visor móvil

1. Ajuste de perfiles para reducción de error en geolocalización.- Este apartado lo componen las funciones que se encargan de obtener el *perfil sintético* del terreno a partir de la imagen sintética que se obtiene de la matriz 3D del terreno digitalizado con resolución de 5m. La función de gradiente de imagen termográfica obtiene el *perfil de cielo*, es decir, el perfil del terreno en el horizonte que linda con el cielo. A través de algoritmos *Newton-Raphson* para minimización de errores, se alinean ambos perfiles, para mejorar la correspondencia con las coordenadas del terreno entre el pixel de imagen termográfica e imagen sintética. La Figura 2 muestra cómo queda el ajuste de *perfil sintético* (trazo rojo) sobre el *perfil de cielo*, una vez realizado el ajuste.
2. Sistema de comunicación de reserva en VHF.- Se realizan pruebas de cobertura radioeléctrica con frecuencias puestas a disposición por el Cabildo de Gran Canaria en 173.75 MHz y 169.15 MHz con equipos de 1watio de potencia. Además, se desarrolla cabezal de RF para usar el sistema *LoRa* (del inglés, *Long-Range Radio*) en 167 MHz (MONZÓN et al. 2022), mejorando la cobertura en entornos montañosos y boscosos.
3. Cálculo de temperatura de pixel corregida por transmisividad.- Se realiza el estudio teórico sobre las pérdidas debido a la atmósfera. El fenómeno de atenuación introduce un error sistemático que depende de la longitud

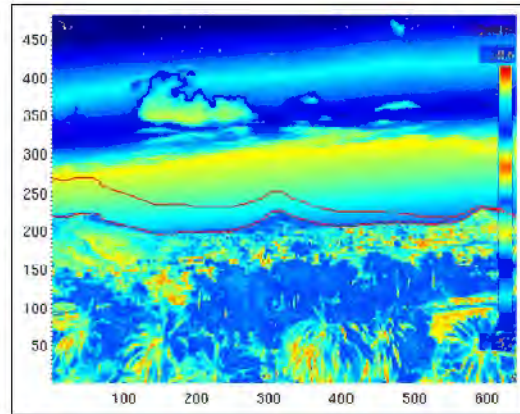


Figura 2. Ejemplo que muestra el ajuste del perfil sintético (trazo rojo) al perfil de la foto termográfica después de una modificación del *yaw*, *pith* y *roll*.

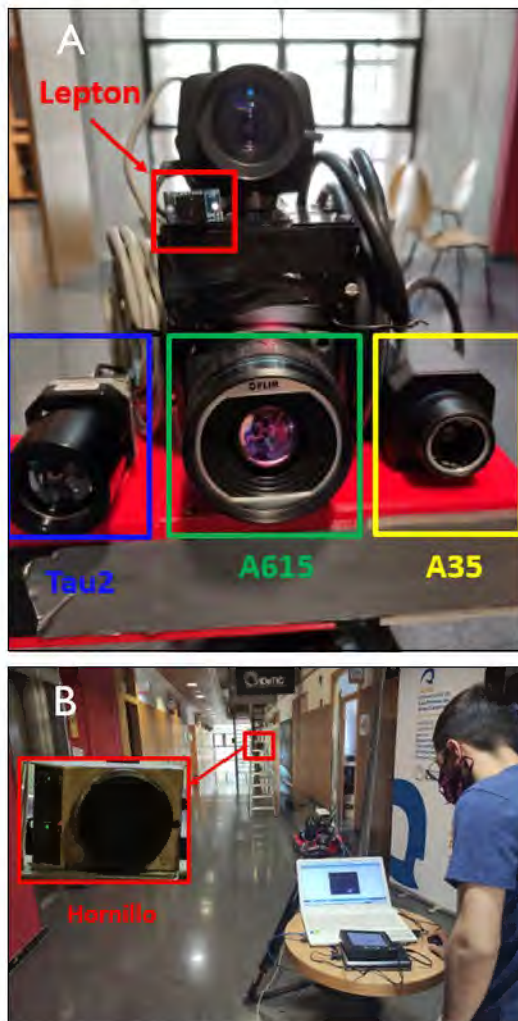
Figure 2. Example showing the adjustment of the synthetic profile (red trace) to the thermographic profile after a modification of the *pith*, *yaw* and *roll*.

de onda de trabajo, la banda espectral, la distancia y las condiciones meteorológicas. La atmósfera, entre la fuente de radiación y el detector, causa perturbaciones en la medida. Para corregir la temperatura debido a las pérdidas atmosférica se calcula el coeficiente de absorción que incluye las pérdidas debido a los gases, moléculas y dispersión. Este coeficiente se denomina transmisividad. Para calcular la transmisividad es necesario conocer la distancia al objeto de interés, que es obtenida a partir de los algoritmos de georreferenciación desarrollados para la generación de la imagen sintética. Se usa el sensor de bajo coste DHT11 de OSEPP ELECTRONICS (<https://osepp.com/electronic-modules/sensor-modules/63-humidity-temperature-sensor>) para obtener la humedad relativa y la temperatura ambiente. Los coeficientes de absorción por vapor de agua y dióxido de carbono se han obtenido a partir de los coeficientes experimentales de las tablas de *Passman-Larmore* (MINKINA & KLECHA 2016). En ARAÑA et al. (2016), se describe el procedimiento de corrección de temperatura por transmisividad con mayor detalle.

4. Integración de interfaces para cámaras de coste medio/bajo.- La comparación de di-

ferentes modelos de cámaras termográficas ha requerido de la integración HW/SW (*hardware y software*) y mecanizado en una estructura común (Figura 3A). Esto conlleva un modelado de la ecuación *RBFO* (R, B, F y O son los parámetros de la ecuación capaz

de transformar los valores radiométricos de la imagen en temperatura), un ajuste de la emisividad siguiendo el modelo físico de la cámara y una comprobación del rango dinámico máximo de la cámara. Para ello, se han realizado pruebas en interior con fuente de calor calibrada (Figura 3B) y exterior con quema sostenida en parcela de 5x5 m<sup>2</sup> en la zona de Artenara, Gran Canaria (Figura 4) y tomando medidas a diferentes distancias de la quema (Figura 5). En la Figura 6 se muestra la capacidad de detección de la cámara más económica, la FLIR Lepton 3.5 (160x120), que sigue detectando el fuego a 1600 m de distancia. Estas pruebas también han servido para validar el procedimiento de corrección de temperatura de pixel por transmisividad y establecer el umbral de detección de incendio forestal.



**Figura 3.** Sistema para evaluación de cámaras térmicas. (A) Conjunto de cámaras térmicas donde se ha destacado el modelo Lepton. (B) Montaje para evaluación de cámaras térmicas en laboratorio mediante fuente de calor controlada (Hornillo).

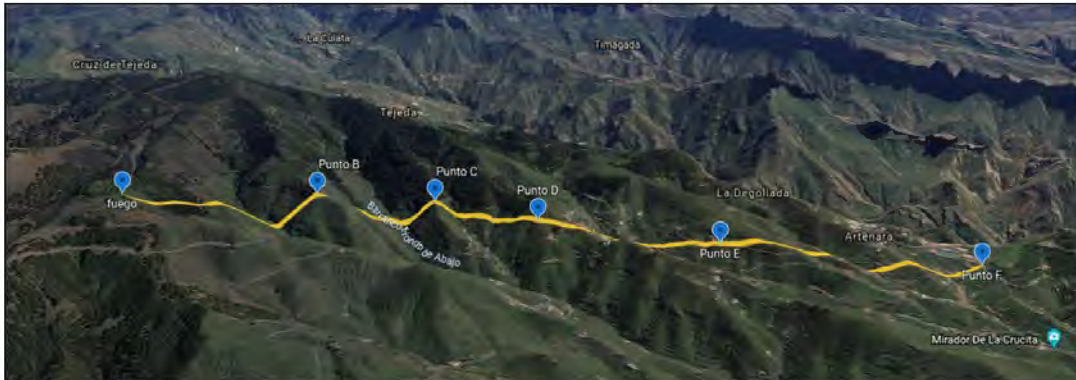
*Figure 3. Measurement system for evaluation of thermographic cameras. (A) Set of thermographic cameras where the Lepton model has been highlighted. (B) Assembly for evaluation of thermographic cameras in the laboratory by means of a controlled heat source (Hornillo: portable stove).*

- Integración de IMU, GPS y rotores.- Se ha desarrollado la biblioteca software para controlar cada uno de los dispositivos. Se integran los modelos de IMU Razor de Sparkfun y Orientus. Se decide no usar ninguna biblioteca *LGPL open source* para recepción de la trama NMEA del GPS con el objeto de limitar el código y facilitar su mantenimiento. Se usan servomotores y bibliotecas para interpretación de los ángulos de Euler cuando el visor se mueve y fija la dirección de apuntamiento.

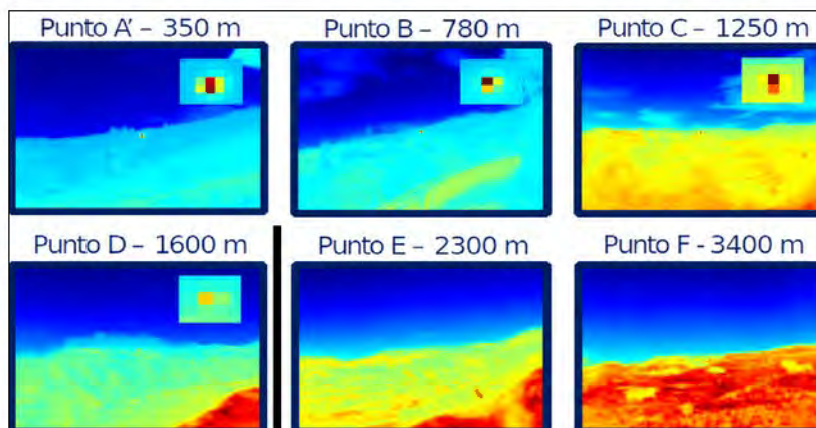


**Figura 4.** Quema controlada en la zona de Artenara (Gran Canaria). Cuadrícula de 5x5 m<sup>2</sup> para calibración de cámaras y pruebas de detección.

*Figure 4. Controlled fire in the area of Artenara (Gran Canaria). 5x5 m<sup>2</sup> grid for camera calibration and detection tests.*



**Figura 5.** Puntos de medida para pruebas de campo. El punto de quema sostenida se encuentra en la parte izquierda (fuego).  
**Figure 5.** Measurement points for field tests. The sustained fire point is on the left side (fuego).



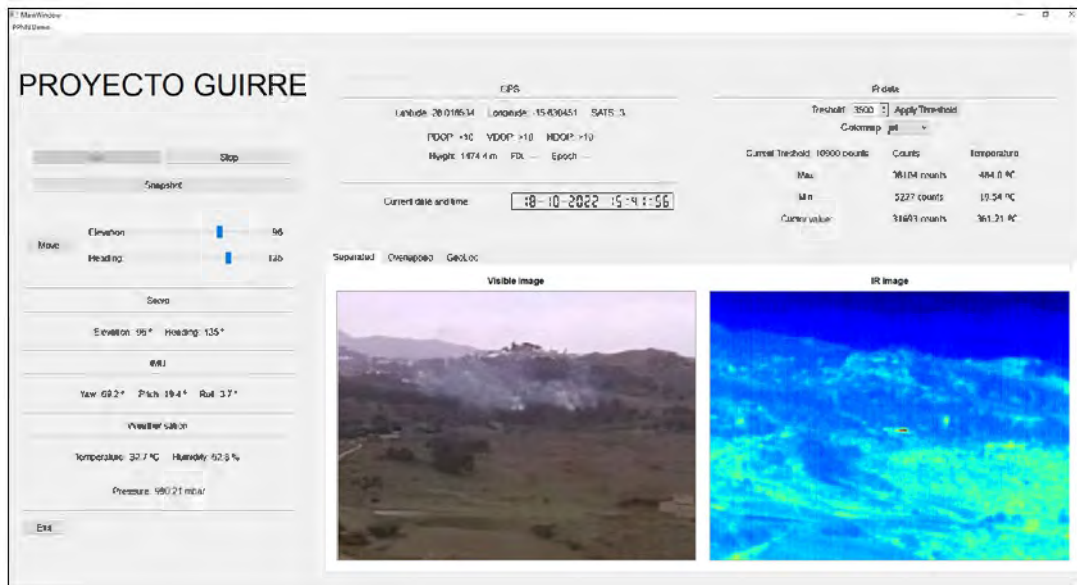
**Figura 6.** Capacidad de detección de la cámara Lepton en la quema sostenida de una parcela de 5x5 m<sup>2</sup> (puntos calientes en el centro de cada imagen).

**Figure 6.** Detection capability of the Lepton camera in the sustained fire of a 5x5 m<sup>2</sup> grid (hot pixels at the center of each image).

6. Desarrollo del programa principal del visor.- Se hace una implementación en lenguaje de programación C de las rutinas de generación de imagen sintética (Matriz de Imagen Sintética: MIS) a través de la técnica de *ray-tracing*. Los tiempos de ejecución comparados con las versiones programadas en Matlab se reducen en más de una relación 1:50 en el peor caso, lo que proporciona capacidad para ser integrado en el sistema embebido *Raspberry Pi 4*. Bajo determinadas condiciones, se han conseguido mejoras que superan la relación 1:160. La eficiencia del algoritmo aumenta al hacerlo la distancia de cobertura y resolución de cámara. Se ha integrado el sistema de corrección de temperatura, atendiendo a la trans-

misividad, calculada a partir de las distancias a pixel y medidas de temperatura ambiente y humedad. Se ha integrado el procedimiento de corrección de perfiles que permite corregir errores de apuntamiento. No obstante, hay algunos perfiles que el sistema no es capaz de ajustar, principalmente cuando existe niebla o nubes densas. Afortunadamente, si se dan esas condiciones en un incendio serían favorables para su extinción. Finalmente, se diseña una interfaz gráfica que permita funcionar de forma local y poder realizar las pruebas iniciales sobre el terreno (Figura 7).

7. Integración y evaluación del sistema de comunicaciones.- El computador embebido



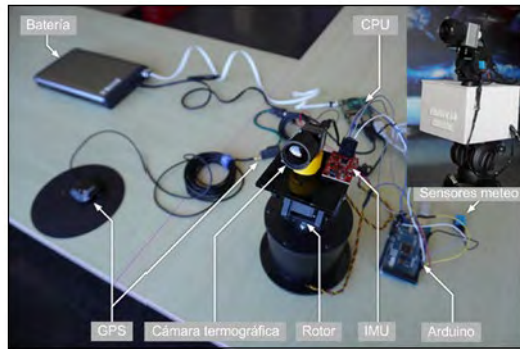
**Figure 7.** Interfaz gráfica de control local desarrollada para las pruebas de campo en los PPNN y que es la base del sistema de calibración y test. Ejemplo de una quema controlada en San José del Álamo (Gran Canaria).

*Figure 7.* Local control graphical interface developed for field testing of PPNN and which is the basis of the calibration and test system. Example of a controlled fire in San José del Álamo (Gran Canaria).

*Raspberry Pi 4*, cuenta con un módulo *wifi* integrado que trabaja en las frecuencias 2.4 GHz y 5 GHz usando el estándar IEEE 802.11ac. Debido a que en operaciones reales es necesario acceder al sistema, se configuró el módulo como punto de acceso para crear una red inalámbrica local. Esto permite operar el sistema hasta una distancia de 10 m. Se debe recordar que a pesar de que este alcance es limitado, no es necesario integrar elementos adicionales como antenas externas, lo que reduce costes y aumenta el grado de portabilidad. Se validó el correcto funcionamiento de la configuración y acceso remoto al computador embebido, permitiendo controlar el sensor observador. Se ha desarrollado el sistema de conversión a 167 MHz para poder usar las prestaciones del sistema *LoRa* en el visor. Esto proporciona toda la potencialidad de ese estándar en una banda de frecuencias que es más aconsejable para ambientes con perfil abrupto y boscoso, puesto que esa banda de frecuencias se propaga mucho mejor que las altas frecuencias propias de telefonía celular 3G/4G. Se ha desarrollado el progra-

ma de extracción de contornos para poder reducir el volumen de información necesaria para seguir la evolución de un incendio en ausencia de sistema de banda ancha (telefonía celular). Esto garantiza que, en el peor caso, siempre se podrá enviar la información mínima necesaria para mantener la geolocalización del incendio en tiempo real. No obstante, también se ha integrado el sistema de telefonía celular 3G/4G para evacuación general de información del visor, fundamentalmente destinado al envío de imágenes.

8. Integración y montaje del prototipo.- Como plataforma de integración y cálculo se utilizó el computador embebido *Raspberry Pi 4*. Se utiliza una batería de larga duración de 8000 mAh. La figura 8 muestran el detalle del despiece y sistema integrado del primer prototipo. El prototipo incluye un programa específico de control para realizar las tareas de detección y seguimientos de objetos de interés. Finalmente, se realizan una serie de pruebas iniciales y se comprueba el correcto funcionamiento, tanto desde el punto de vis-



**Figura 8.** Detalle de los dispositivos que componen el primer prototipo del visor móvil. El sistema integrado se muestra en la parte superior derecha de la imagen.

*Figure 8.* Detail of the devices that make up the first prototype of the mobile visor. The integrated system is shown in the upper right part of the image.

ta software como hardware. Se integra y evalúa cada uno de los elementos integrados para pasar a la fase de compactación y realización de un prototipo que pueda ser probado en campo. Se diseña en CAD (del inglés *Computer Aided Design*) e imprime en impresora 3D, la carcasa que integra todos los componentes del sensor. Se encapsula la cámara termográfica para dotarla de nivel de protección IP66 (superior al IP65 que es el mínimo recomen-

dado para exterior). Con todo, se dispone de una primera versión del visor automatizado y controlado de forma local a través de una interfaz gráfica.

### Evolución de la Unidad móvil de detección y seguimiento automatizado

Una vez desarrollado el primer prototipo, se va sometiendo a diferentes pruebas de campo que han servido para ir mejorando la robustez y prestaciones de detección y seguimiento. El objetivo principal ha sido evaluar el mayor número de componentes, hasta conseguir una versión suficientemente operativa y portable, pero sin renunciar a la reducción de costes.

Se realizan pruebas de campo en la azotea del edificio del IDeTIC, alrededores de Artenara, Tafira y PPNN de Garajonay, Caldera de Taburiente y Teide, para determinar los errores y modificaciones de la estructura general del primer prototipo. Esto ha dado lugar a varios prototipos, donde varios de ellos se muestran en la Figura 9.

Además, se considera la posibilidad de aplicar técnicas de superresolución para, al menos, duplicar la resolución de la cámara térmica. Con esta técnica se reduciría el coste que supone ad-



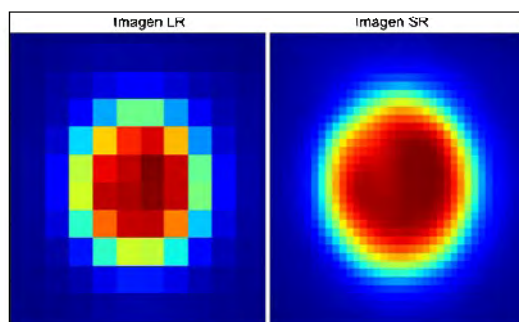
**Figura 9.** Prototipos desarrollados a partir de las pruebas en quemas controladas realizadas en puntos de Gran Canaria. De izquierda a derecha y de arriba abajo: diseño 3D; rotor azimuth/elevación de 180°/30° a partir de dos servomotores; visor vertical con cámaras visible y termográfica, modem 3G, alimentación, control y GPS; prototipo completo con IMU y antenas; tercera iteración del prototipo que reduce la altura e integra toda la electrónica con estación meteorológica para medida de temperatura, presión y humedad; prototipo completo con nuevo rotor 270°/60°; y última iteración instalada en torres fijas y usada en demos móviles que incluye sistema de apuntamiento y mejoras de aislamiento térmico para exterior.

*Figure 9.* Prototypes developed from tests in controlled fires carried out at locations in Gran Canaria. From left to right and from top to bottom: 3D design; 180°/30° azimuth/elevation rotor from two servomotors; vertical visor with visible and thermographic cameras, 3G modem, power supply, control and GPS; complete prototype with IMU and antennas; third iteration of the prototype that reduces the height and integrates all the electronics with weather station for temperature, pressure and humidity measurements; complete prototype with new 270°/60° rotor; and last iteration installed on fixed towers and used in mobile demos that includes pointing system and thermal insulation improvements for outdoors.

quirir cámaras de mayor resolución y, por ende, mejorar la sostenibilidad del sistema, puesto que la cámara térmica es el elemento más caro del visor. Nunca se ha aplicado una técnica de superresolución a imágenes termográficas debido a su complejidad, puesto que además de procesar la imagen como tal, habría que considerar la intensidad de energía recibida y las funciones que obtienen la temperatura de cada pixel. Las primeras pruebas donde se han aplicado técnicas típicamente usadas en el espectro visible, combinadas con la inclusión de intensidad de energía, han sido satisfactorias (Figura 10). No obstante, se decide no incluir esta opción en los equipos finales porque todavía está en fase experimental (GALVÁN-HERNÁNDEZ 2022).

#### Desarrollo del control central y base de datos

Se ha desarrollado el programa de control encargado de gestionar la red de visores y se ha integrado en el *backend* de la aplicación principal. Se ha utilizado el *framework Django* como herramienta de desarrollo. Para garantizar la portabilidad y el rápido despliegue, la aplicación se ha empaquetado utilizando la tecnología *Docker*. Se ha desarrollado una interfaz de programación de aplicaciones *REST (APIRest)* para la comunicación entre los servicios que comprende la aplicación y la comunicación/sincronización entre puntos de control móviles y el servidor central. La *API* se ha configurado para que los datos puedan ser proporcionados tanto en formato *JSON* como datos en crudo.



**Figura 10.** Primeros resultados aplicando técnicas de superresolución a imágenes termográficas obtenidas con la cámara Lepton.

*Figure 10.* First results applying super-resolution techniques to thermographic images obtained with the Lepton camera.

Se ha realizado la definición e implementación de interfaces disponibles por usuarios a través de *web*, que son las que permiten controlar la red de visores a través de un sistema de acceso con estructura piramidal de tres niveles: primer nivel (mantenimiento de la red), segundo nivel (directores de los PPNN de Garajonay, Teide y Caldera de Taburiente) y tercer nivel (resto de usuarios autorizados por los de primer nivel y confirmados por gestores de la red en la ULPGC).

Se ha realizado el diseño de los modelos que comprenden la base de datos SIG, así como la lógica relacional de los mismos. Se ha configurado un servidor que incluye la instalación de bibliotecas y compiladores para dar soporte a una base de datos *PostgreSQL*. Se instala *PostGIS* para ampliar las capacidades de *PostgreSQL*, agregando funciones y tipos geo-espaciales que facilitan la gestión de datos dentro de una base de datos relacional. Se habilita *GeoDjango* dentro del *backend*, también soportado e instalado con *Django* y se generan las primeras tablas de datos, utilizando los modelos de datos definidos previamente. Se integra la gestión de esta base de datos en el *backend* de la aplicación de procesamiento de la información y gestión de la red de visores. Se integran los datos de control del visor, estado del visor, imágenes y recintos de temperatura que superan umbral de detección de incendio forestal, así como la evolución temporal para representación en la GUI (del inglés, *Graphical User Interface*).

Se desarrolla un programa para interpretar la información enviada referida a las coordenadas de los puntos de fuego o regiones de interés enviada por los sensores utilizando el enfoque de microservicios. Se desarrolla un microservicio de consumo y validación de los datos enviados por los sensores. Otro microservicio de transformación de los puntos en polígonos cuando estos puntos comprendan una región de interés (foco de fuego). Se desarrolla un microservicio de desambiguación entre regiones o puntos que se solapan entre sensores. Se desarrolla un microservicio productor de la información a representar, cuyas entradas vienen dadas por los microservicios anteriores. Se evalúa y realizan los ajustes necesarios para comprobar la correcta integración de la información generada con los servicios de repre-

sentación en la GUI en desarrollo, así como los formatos para integración en base de datos.

### Desarrollo de la interfaz gráfica de usuario (GUI) para visor y control central

Se ha optado por utilizar el *framework Django* para el desarrollo de la interfaz de usuario. *Django* integra la extensión *GeoDjango* que nos permite manejar datos tipos SIG sin la necesidad de utilizar las bibliotecas específicas. Esta interfaz se desarrolla en tecnología *web* para permitir mayor portabilidad de la misma. Se opta por una interfaz gráfica de usuario utilizando *Leaflet* para la representación de los mapas en el *frontend*. En esta primera versión es posible enviar desde el *backend* la localización de los visores, puntos y regiones de interés. Se ha definido las opciones finales a las que tendrán acceso los usuarios autorizados para control de red y los formatos de representación de información, además de gran parte de los comandos de control de red y herramientas de representación de información.

En la Figura 11 se muestra la versión final de la GUI con opciones para control y evaluación por parte de todos los usuarios que tengan acceso autorizado. Destaca: la visualización de imagen térmica y visible con tiempo de actualización configurable, la barra deslizante para ver evolución temporal, la disponibilidad de información de ubicación y datos meteorológicos (temperatura, humedad relativa y velocidad y dirección del viento), la posibilidad de fijar el modo de

funcionamiento (manual o barrido/*scan*), la opción de poder modificar el umbral de detección, controlar la dirección de apuntamiento del rotor en modo manual (*yaw* y *pitch*) y la activación de envío de alerta a través de correo electrónico.

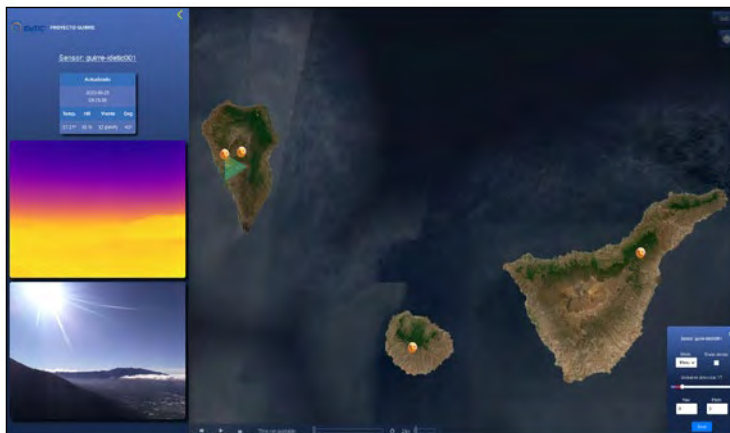
## RESULTADOS

Los resultados del proyecto GUIRRE pasan necesariamente por una evaluación del prototipo desarrollado y saber si cumple con las especificaciones inicialmente descritas. Las numerosas pruebas de campo han servido para ir modificando aquellas partes del diseño que limitaban la capacidad de geolocalizar y el coste de los dispositivos usados, principalmente.

### Test del sistema de detección/seguimiento en PPNN

Se realizaron numerosas campañas en Gran Canaria y en menor medida en los PPNN de Gajarajonay, Teide y Caldera de Taburiente. En las medidas se utilizan diferentes inclinaciones del visor (*pitch* y *roll*) para evaluar la robustez frente a la falta de nivelación de la base.

Las pruebas de campo han servido para ir mejorando el sistema: evaluación de nuevas cámaras, rotores y sistemas inerciales, así como la ubicación de cada una de ellas para evitar interferencias por acoplo, sobre todo en la unidad de medida inercial (Figura 12). El diseño modular



**Figura 11.** Interfaz gráfica de usuario (GUI) para acceso al control y gestión del visor. Visualiza la imagen termográfica (resolución) y visible (resolución), parámetros medioambientales, control de movimiento del rotor, umbral de detección, opción de transmisión de alerta y línea de tiempos para visualizar la evolución de las áreas del terreno que ha superado dicho umbral.

*Figure 11.* Graphical user interface (GUI) for access to the control and management of the visor. It displays the thermographic (resolution) and visible (resolution) image, environmental parameters, rotor movement control, detection threshold, alert transmission option and timeline to visualize the evolution of the terrain areas that have exceeded the threshold.



**Figura 12.** Pruebas con prototipo 2 en quemas controladas de Cumbre de Gran Canaria.

*Figure 12.* Tests with prototype 2 in controlled fires in Cumbre de Gran Canaria.

y arquitectura del prototipo ha permitido localizar la fuente de error y modificar/cambiar el dispositivo o programa concreto, sin alterar el comportamiento del resto del sistema.

Las pruebas realizadas en Gran Canaria han permitido mejorar el prototipo inicial hasta llegar a una versión suficientemente madura (Figura 9), que es la que se ha llevado a las pruebas realizadas en los PPNN. En las pruebas realizadas en Gran Canaria, se contó con la colaboración de personal con competencias en materia de incendios forestales del CECOPIN (Centro de Coordinación Operativa Insular) para poder operar en numerosas quemas prescritas (Figura 12). Sin embargo, la mayor parte de las pruebas se realizaban a través de la geolocalización de objetos de referencia que aparecían en las imágenes termográficas y de los que se conocía su posición: construcciones emblemáticas, tejados de casas, puntos clave en la carretera, etc. Este tipo de pruebas son las que se realizaron en los diferentes PPNN, ante la imposibilidad de asistir a alguna de las quemas prescritas que se realizan fuera del área protegida. Para que los responsables de PPNN y personal técnico pudieran entender e interactuar con el sistema desarrollado, se bajaban los umbrales de temperatura considerados como incendio, de forma que un tejado o un risco de

montaña calentados por el sol, fueran suficientes para que el sistema se activara.

Junto a los técnicos y responsables de los PPNN y forestales en Gran Canaria, se deciden los puntos del terreno en los que habría que realizar las pruebas con el visor móvil y determinar si el apuntamiento del visor es correcto. Esos puntos son los que permiten tener una buena cobertura visual de diferentes áreas de interés. La mayor parte de los puntos seleccionados presentaron interferencias en el campo magnético local, lo que producía errores importantes en la determinación del norte geográfico a partir del magnetómetro contenido en la IMU, desde unos pocos grados en Cumbres de Gran Canaria a casi 30 grados en la zona de Mesa Mota (Tenerife). Puesto que errores tan grandes quedan fuera del ángulo de apertura de la cámara (25°), el algoritmo de corrección automatizado de perfiles no dispone de rango de visión suficiente para poder ajustarlos y compensar el error por desviación del campo magnético. El algoritmo se ha mostrado eficaz para errores inferiores a  $\pm 5^\circ$ , valor que era superado en numerosos puntos. Además, la ausencia de perfiles del terreno despejados o la presencia de nubes en ellos, produjo errores en el sistema de ajuste de perfiles.

#### Desarrollo del plan de cobertura en PPNN

Inicialmente, se había previsto elaborar una lista de puntos potenciales de observación para cada parque nacional de forma que se cubriera un porcentaje superior al 90% del área de interés, atendiendo a la movilidad del visor y su capacidad para proceder con sus funciones de forma totalmente automatizada. Para los casos en los que el algoritmo de ajuste de perfiles no funcionara correctamente, se debía indicar que era necesaria la construcción de una base calibrada.

En las pruebas de campo realizadas, todos los puntos de observación tenían interferencia magnética local en mayor o menor medida, lo que hace poco práctico, tanto para los objetivos del proyecto como para los PPNN, estar realizando un mapeo de puntos en los que iban a dominar los de base calibrada. Por ello, se opta por el desarrollo de una nueva herramienta semiautomática de calibración in-situ, es decir, inde-

pendientemente del punto de observación, que servirá para corregir los errores de apuntamiento de forma sencilla y rápida. De esta forma, no habría que tener una lista previamente calibrada y evaluada, proporcionando mayor versatilidad al visor y su aplicación sobre áreas de mayor complejidad orográfica. Para dar soporte a la herramienta, se desarrolla una nueva GUI de fácil manejo para la corrección de apuntamiento del sensor (Figura 13). La interfaz cuenta con la posibilidad de modificar el *yaw*, *pitch* y *roll*, hasta conseguir un buen solapamiento entre la imagen sintética y la visible o termográfica. Una vez ajustada, se cargan los coeficientes de corrección y el visor puede actuar de forma automatizada. Se realizaron pruebas con personal de PPNN y en algunos casos, personal responsable en extinción de incendios de la isla (Figura 14). En todos los casos, el error de apuntamiento se mantuvo por debajo de  $0.8^\circ$ , lo que supone un error inferior a 14 mrad, es decir, inferior a 14m por kilómetro.

Por último, se considera la posibilidad de que otros usuarios ajenos a los PPNN involucrados en el proyecto, puedan hacer uso del sistema desarrollado, pero sin necesidad de que los técnicos o responsables tuvieran que alterar su actividad diaria. Por ello, se acuerda la instalación fija de los visores, que puedan estar activos de forma permanente, modificando el protocolo de acceso a la aplicación web, lo que permite que otros usuarios autorizados previamente, puedan probar el sistema y evaluar las prestaciones. Se instalan los sensores en Montaña de Igualero en La Gomera, Torre del Time en La Palma y Torre del Gaitero en Tenerife (Figura 15). Una vez instalados, se realizaron pruebas con el personal de los PPNN (Figura 16) como evaluación final.

## DISCUSIÓN

La elaboración de planes estratégicos y de actuación en caso de catástrofe, como pueden ser las riadas y los incendios, forma parte de las tareas llevadas a cabo en la gestión de los PPNN. Además, la incorporación de nuevas soluciones tecnológicas que puedan facilitar, abaratar y mejorar las soluciones ya existentes, hacen mucho más viable y realista la elaboración de dichos

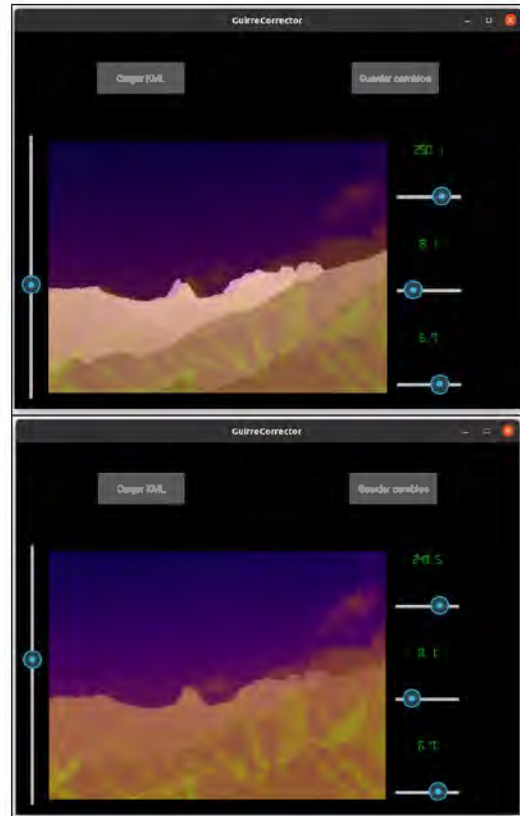


Figura 13. GUI para corrección de errores de apuntamiento. Se muestran los valores iniciales y finales, una vez realizado el ajuste.

Figure 13. GUI for pointing error correction. The initial and final values are shown, once the adjustment has been made.



Figura 14. Pruebas con visor móvil y sistema de corrección de errores de apuntamiento con GUI en el Centro de Visitantes del Parque Nacional de la Caldera de Taburiente.

Figure 14. Tests with mobile visor and GUI pointing error correction system at the Centro de Visitantes of the National Park of the Caldera de Taburiente National Park.



**Figura 15.** Montaje del visor en la torre de vigilancia de El Gaitero (Tenerife).

*Figure 15.* Installation of the visor on the El Gaitero watchtower (Tenerife).



**Figura 16.** Prueba con la aplicación de control ejecutada desde las Oficinas del Parque Nacional de Garajonay (La Gomera) y visor ubicado en la Montaña de Igualero.

*Figure 16.* Test with the control application executed from the Garajonay National Park Offices (La Gomera) and visor located at Montaña de Igualero.

planes. El desarrollo de este tipo de herramientas y dispositivos tiene una influencia directa sobre el conjunto de espacios Natura 2000, que duplican la superficie de los PPNN en Canarias.

El cambio climático está aumentando el número de incendios forestales y la virulencia en su manifestación. Esto es motivo de preocupación entre las autoridades con competencias en materia de prevención, detección y extinción, así como

de los responsables de la gestión de los PPNN, que tienen como objetivo básico el asegurar la conservación de sus valores naturales. En lo que se refiere al capítulo de detección y extinción, el uso de herramientas que permitan geolocalizar el incendio con precisión y rapidez, además de realizar un seguimiento de su evolución, se antoja imprescindible. Además, estas soluciones deberían ser sostenibles desde un punto de vista técnico, operativo y económico, conscientes de los conocimientos que posee el personal que debe manejarlos y del estrés al que les somete su actividad en las tareas de extinción.

Los resultados del proyecto GUIRRE muestran la alta portabilidad y facilidad de manejo e instalación que tiene el visor desarrollado. A pesar de que los antecedentes del estado del arte que se incluyeron en la solicitud del proyecto datan de 2016, la problemática asociada a los incendios forestales no solo se mantiene, sino que ha empeorado (KOK & STOOFF 2023). Así mismo, el sistema desarrollado sigue teniendo un carácter novel, atendiendo a las publicaciones de revisión bibliográfica de la temática, ya comentadas en la introducción de este documento (JONES et al. 2022; MOHAPATRA & TIMOTHY 2022).

El visor de GUIRRE contiene sistemas de comunicación alternativos (VHF) a los usados en telefonía celular (3G/4G o 5G), que, si bien tienen la posibilidad de evacuar un gran volumen de información, usan frecuencias radioeléctricas que no son adecuadas para entornos boscosos y de orografía abrupta y montañosa, habituales en los PPNN. A pesar de que el volumen de información que puede transmitir los sistemas en VHF es bastante limitado, eso no supone un problema para el visor GUIRRE, puesto que realiza todo el procesado de la información en el propio control del visor móvil, lo que permite mantener en tiempo real la evolución del incendio de forma precisa, con solo transmitir unos pocos datos asociados a los contornos que han superado el umbral de temperatura considerado como incendio. Además, se han integrado dispositivos de coste medio/bajo en cámaras, rotores y sensores necesarios para realizar las funciones de georreferenciación, haciendo uso de una arquitectura modular que permite mejorar características de

cualquiera de ellos, sin alterar significativamente el resto del diseño.

Los sistemas que usan el espectro visible para detectar un incendio a través de la columna de humo, no tienen capacidad para posicionar con precisión y menos aún, realizar un seguimiento de cómo evoluciona en el tiempo. El prototipo desarrollado en el proyecto GUIRRE está basado en cámaras térmicas o espectro de infrarrojos, lo que permite centrarse en la detección de puntos calientes, evitando la falta de visibilidad por presencia de humo. Además, el procedimiento de georreferenciación de cada píxel, no disponible en los sistemas que operan en la actualidad, proporciona una precisión en el posicionamiento que puede llegar a ser equiparable a la resolución del plano de la zona. Los transductores que forman parte de cada uno de los píxeles de la cámara térmica, responden con voltajes proporcionales a la intensidad de energía que incide sobre ellos. Es decir, no proporcionan directamente la temperatura a la que está el emisor (área del terreno cubierta por un píxel). En este trabajo se ha integrado un modelo del canal de propagación por el que discurre la energía (ARANA et al. 2017) y se realiza una corrección sobre la energía que incide para compensar las variaciones producidas por la distancia a la que se encuentra el foco emisor y las condiciones de temperatura y humedad ambiental, entre otras. Estos parámetros tienen relevancia en condiciones de detección del incendio, cuando el foco emisor emite con menor energía y las condiciones ambientales no son alteradas por el mismo. Sin embargo, cuando el incendio ya cubre una amplia zona, la energía emitida es muy elevada y resulta menos crítica la corrección de esos parámetros para saber por dónde evoluciona el incendio, aunque sigue siendo importante la corrección por distancia, como así realiza el visor de GUIRRE.

Las técnicas de superresolución en imágenes, son otra vía que puede ser interesante para abaratar los costes de la cámara térmica, que es uno de los dispositivos que más encarece este tipo de soluciones. Aunque no era un objetivo inicial del proyecto, se ha comenzado una tesis doctoral que tiene como punto más novedoso, la aplicación de técnicas de superresolución a imágenes

térmicas, es decir, tanto a las medidas radiométricas como a la definición de imagen. Esto permitirá el uso de cámaras de menor resolución y, por ende, de menor coste.

El plan de cobertura inicial partía de la hipótesis de que pocos puntos tendrían interferencia magnética que produjera un error en el apuntamiento y, por ende, georreferenciación del píxel. Sin embargo, el procedimiento inicialmente propuesto, que pasaba por la definición de puntos en los que habría que tener una base bien orientada en la que se anclase el visor, es poco realista, práctico y sostenible. Por ello, se decide incluir una nueva herramienta semiautomática de calibración in-situ mediante ajuste de perfiles, que servirá para calibrar de forma sencilla y rápida cualquier punto de observación elegido en el que posicionar el visor (Figura 13). Se ha mantenido cierto ajuste manual para evitar algunos errores que se han producido en el procedimiento automatizado, asociados a la existencia de nubes densas en perfiles montañosos. Esta herramienta ha sido evaluada en todas las pruebas realizadas en los diferentes PPNN, así como en zonas verdes de Gran Canaria.

El software de control y la base de datos están diseñadas para que varios usuarios puedan acceder de forma secuencial, es decir, solo puede haber un usuario controlando el sistema. La estructura piramidal de acceso tiene tres niveles, de mayor a menor: mantenimiento, control de gestión y control técnico. La configuración está definida de forma que el nivel más alto siempre puede expulsar a otro de nivel inferior con aviso previo. El aplicativo permite controlar los movimientos del sensor, activar la posibilidad de alarma en caso de superarse el umbral de incendio prefijado, visualizar la evolución temporal de los puntos calientes, además de poder ver la imagen visible y la térmica (Figura 11).

La solución final, producto de una evolución realizada a partir de numerosas pruebas de laboratorio y campo, ha sido evaluada con éxito en las pruebas que se han realizado en los PPNN de Garajonay, Teide y Caldera de Taburiente. No obstante, se decidió modificar el diseño y adaptarlo para que pudiera funcionar en modalidad

fija sobre torres de vigilancia, con el objeto de que otros PPNN u organismos con competencias en incendios forestales pudieran acceder en cualquier instante de forma remota y evaluar las prestaciones del sistema desarrollado (Figura 15). Desafortunadamente, la solución, que si fue válida para la modalidad móvil donde el visor ha estado a buen recaudo mientras no había pruebas de campo, se ha mostrado frágil para estar expuesta a condiciones extremas de exterior de forma continuada. De hecho, el visor montado en Tenerife quedó muy dañado por las llamas del último incendio de 2023.

Con el objetivo de aprovechar y dar continuidad a los resultados del proyecto GUIRRE y de los numerosos proyectos del Plan Nacional de I+D+i donde se han venido resolviendo los retos que plantea una georreferenciación automatizada, se ha establecido una colaboración con AIR (Artificial Intelligence & Robotics S.L.), spin-off formada por jóvenes investigadores que estuvieron en la ULPGC y que llevan trabajando más de diez años en temas de incendios forestales, que permita mantener el servicio de prueba.

Finalmente, hay que destacar que parte de los resultados han sido desarrollados en el marco de los Trabajos Fin de Título disponibles en el repositorio <https://accedacris.ulpgc.es/> y titulados “Estudio de la cámara FLIR LEPTON y su viabilidad para el seguimiento de líneas de fuego”, “Inteligencia artificial aplicada a super-resolución en termografía”, “Cabezal de VHF para integración de un módulo LoRa” y “Puesta a punto y medida de un cabezal de VHF para la integración de un módulo LoRa”, que ha sido objeto de las publicaciones de MONZON-MONEDERO et al. (2022) y GALVÁN-HERNÁNDEZ et al. (2022). El trabajo sobre inteligencia ar-

tificial aplicada a superresolución en termografía ha sido galardonado con el Premio Caja de Ingenieros al Mejor Trabajo Fin de Máster en Inteligencia Artificial, concedido por el Colegio Oficial de Ingenieros de Telecomunicación (COIT) en la XLIII edición de los Premios a las Mejores Tesis Doctorales, Trabajos de Fin de Máster y Trayectorias Académicas en Ingeniería de Telecomunicación, entregado el 29 de junio de 2023 en el salón de actos del Ministerio de Asuntos Económicos y Transformación Digital. Este proyecto ha supuesto el comienzo de la tesis doctoral “Aportación a la sostenibilidad de los sistemas de detección y seguimiento de incendios forestales” de Antonio Galván Hernández, al amparo de un contrato predoctoral financiado por el Gobierno de Canarias. Por último, hay que apuntar que los resultados del proyecto se encuentran disponibles a través de la web específica de GUIRRE: <https://idetec.ulpgc.es/idetic/index.php/es/proyecto-guirre>.

## AGRADECIMIENTOS

A Juan Domingo Santana Urbín por su inestimable participación en la construcción de los prototipos. A Víctor Alonso y Jorge Monzón por haber colaborado en las pruebas, demostraciones y difusión del proyecto. Al personal del CECOPIN del Cabildo de Gran Canaria por su participación y colaboración en todas las quemas controladas realizadas en la isla. A los responsables de los PPNN de la Caldera de Taburiente, Garajonay y Teide por su atención y colaboración en las tareas que se realizaron durante las diferentes estancias, así como su posterior participación en proyectos afines. Finalmente, a Rodrigo Granadino, Técnico Forestal del Cabildo de Tenerife, por facilitar y asistir a las pruebas realizadas en áreas del Parque Nacional del Teide.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALKHALIB, AAA. 2014. A Review on Forest Fire Detection Techniques, *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 10, pp. 1-12, doi:10.1155/2014/597368.
- ARANA-PULIDO, V., CABRERA-ALMEIDA, F., PEREZ-MATO, J., DORTA-NARANJO, P., HERNANDEZ-RODRIGUEZ, S. & JIMENEZ-YGUACEL, E. 2018. Challenges of an Autonomous Wildfire Geolocation System Based on Synthetic Vision Technology. *Sensors* 18, no. 11: 3631, doi: 10.3390/s18113631.

- ARAÑA, V., CABRERA, F., DORTA, P., QUINTANA, P., JIMÉNEZ, E., TICAY, J., ROGRÍGUEZ, S. & PÉREZ, J. 2017. Sistema optrónico ligero de despliegue rápido para geolocalización automatizada. V Congreso Nacional de i+d en Defensa y Seguridad. Actas del Congreso ISBN: 978-84-9091-357-4, pp.: 438-445. Toledo, España.
- AZAMI, M., ORGER, N., SCHULZ, V., OSHIRO, T. & CHO, M. 2022. Earth Observation Mission of a 6U CubeSat with a 5-meter Resolution for Wildfire Image Classification Using Convolutional Neural Network Approach. *Remote Sensing* 14, no. 8: 1874, doi: 10.3390/rs14081874.
- BEHRINGER, R. 1999. Registration for outdoor augmented reality applications using computer vision techniques and hybrid sensors. *Virtual Reality. Proceedings IEEE Virtual Reality (Cat. No. 99CB36316)*, Houston, TX, USA, pp. 244-251, doi: 10.1109/VR.1999.756958.
- BREJCHA, J. & CADIK, M. 2017. State-of-the-art in visual geo-localization. *Pattern Analysis and Applications* 20, 613-637, doi: 10.1007/s10044-017-0611-1.
- DHS. 2021. News Release: DHS S&T Successfully Evaluates Wildfire Sensors with California Emergency Responders, 2021. Available online: <https://www.dhs.gov/science-and-technology/news/2021/06/10/news-release-st-successfully-evaluates-wildfire-sensors> (accessed on 26 April 2024).
- DUFF, T. & TOLHURST, K. 2015. Operational Wildfire Suppression Modelling: A Review Evaluating Development, State of The Art and Future Directions. *International Journal of Wildland Fire*, vol. 24, pp. 735-748, doi: 10.1071/WF15018.
- GALVÁN-HERNÁNDEZ, A., TICAY-RIVAS, J., ALONSO-EUGENIO, V., ARAÑA, V. & CABRERA, F. 2022. Thermographic image super-resolution based on neural networks. 3rd URSI Atlantic and Asia Pacific Radio Science Meeting (AT-AP-RASC), pp. 1-4, doi: 10.23919/AT-AP-RASC54737.2022.9814417.
- GARCÍA, D. 2014. Topografía y sus aplicaciones. Grupo Editorial Patria.
- GAUSSORGUES, G. 1994. *Infrared Thermography*. Springer Science+Business Media, B. V., Dordrecht, 552, 1994, ISBN: 978-94-010-4306-9.
- HUA, L. & SHAO, G. 2017. The progress of operational forest fire monitoring with infrared remote sensing. *Journal of Forestry Research* 28, 215-229, doi: 10.1007/s11676-016-0361-8.
- JAIN, P., COOGAN, S., SUBRAMANIAN, S., CROWLEY, M., TAYLOR, S. & FLANNIGAN, M. 2020. A review of machine learning applications in wildfire science and management. *Environmental Reviews*, doi:10.1139/er-2020-0019.
- JONES, M., ABATZOGLU, J., VERAVERBEKE, ANDELA, N., LASSLOP, G., FORKEL, M., SMITH, A., BURTON, C., BETTS, R., WERF, G., SITCH, S., CANADELL, J., SANTÍN, C., KOLDEN, C., DOERR, S., & QUÉRÉ, C. 2022. Global and Regional Trends and Drivers of Fire Under Climate Change. *Reviews of Geophysics*, doi: 10.1029/2020RG000726.
- KOK, E. & STOOFF, C. 2023. *Forest Fires in Europe, Middle East and North Africa 2022*, Publications Office of the European Union, Luxembourg, doi: 10.2760/348120, JRC135226.
- MINKINA, W. & KLÉCHA, D. 2016. Atmospheric Transmission Coefficient Modeling in the Infrared for Thermovision Measurements. *Journal of Sensors and Sensor Systems*, vol. 5, pp. 17-23, doi: 10.5194/jsss-5-17-2016.
- MOHAPATRA, A. & TIMOTHY, T. 2022. Early Wildfire Detection Technologies in Practice-A Review. *Sustainability* 14, no. 19: 12270, doi: 10.3390/su141912270.
- MONZÓN-MONEDERO, J., ARAÑA, V., CABRERA, F. & DORTA, P. 2022. Design and Implementation of a Communications Circuit based on LoRa chip. 3rd URSI Atlantic and Asia Pacific Radio Science Meeting (AT-AP-RASC), pp. 1-4, doi: 10.23919/AT-AP-RASC54737.2022.9814172.
- NAVAL, P. 1998. Camera pose estimation by alignment from a single mountain image. *International Symposium on Intelligent Robotic Systems*.
- PEREIRA, J., JÉRÔME, M., JÚNIOR, J., VIEGAS, C. & PAULO, J. 2022. A Review of Genetic Algorithm Approaches for Wildfire Spread Prediction Calibration. *Mathematics* 10, no. 3: 300, doi: 10.3390/math10030300.

- PÉREZ J., ARAÑA V. & CABRERA F. 2016. Real-Time Autonomous Wildfire Monitoring and Georeferencing using Rapidly Deployable Mobile Units. *IEEE Aerospace & Electronics Systems Magazine*, vol. 31, no. 1, pp. 6-15, doi: 10.1109/TAES.2016.150057.
- SÁNCHEZ, M. 2015. Sistema de gestión de radiocomunicaciones multimodo. Tutores: F. Cabrera, J. Pérez y V. Araña. PFC. ULPGC. <https://acedacris.ulpgc.es/handle/10553/69202>.
- SANJUAN, G., BRUN, C., MARGALEF, T. & CORTES, A. 2014. Wind Field Uncertainty in Forest Fire Propagation Prediction. *Procedia Computer Science*, vol. 29, pp. 1535-1545, doi: 10.1016/j.procs.2014.05.139.
- SAN-MIGUEL-AYANZ, J., DURRANT, T., BOCA, R., LIBERTÀ, G., BRANCO, A., DE RIGO, D., MAIANTI, P., ARTÉS, T., SCHULTE, E. & LOFFLER, P. 2017. Forest Fires in Europe, Middle East and North Africa 2016. EUR 28707 EN, Publications Office, Luxembourg, ISBN 978-92-79-71292-0, doi: 10.2760/17690.
- SCHNEBELE, E., TANYU, B., CERVONE, G. & WATERS, N. 2015. Review of remote sensing methodologies for pavement management and assessment. *Eur. Transp. Res. Rev.*, doi: 10.1007/s12544-015-0156-6.
- SELIF. 2012. Desarrollo de nuevas técnicas para detección y seguimiento de líneas de fuego en incendios forestales basado en sensores térmicos móviles de despliegue rápido (SeLiF). Proyecto con referencia: 686/2012, financiado por el Organismo de Parques Nacionales del Ministerio de Medio Ambiente. <https://idetec.ulpgc.es/idetic/index.php/es/proyecto-selif>.