

DESARROLLO DE NUEVAS TÉCNICAS PARA DETECCIÓN Y SEGUIMIENTO DE LÍNEAS DE FUEGO EN INCENDIOS FORESTALES BASADO EN SENSORES TÉRMICOS MÓVILES DE DESPLIEGUE RÁPIDO (SeLiF)

VÍCTOR A. ARAÑA PULIDO¹, FRANCISCO CABRERA ALMEIDA²,
JAVIER PÉREZ MATO³, FEDERICO GRILLO DELGADO⁴, B. PABLO DORTA NARANJO⁵,
PEDRO QUINTANA MORALES⁶, EUGENIO JIMÉNEZ YGUÁCEL⁷,
IVÁN PÉREZ ÁLVAREZ⁸, EDUARDO MENDIETA OTERO⁹

RESUMEN

El proyecto SeLiF ha supuesto el desarrollo de un sistema de detección y seguimiento de líneas de fuego en incendios forestales. Una solución que funciona en tiempo real, 24 horas al día, que permite facilitar y optimizar el operativo en tareas de prevención y extinción de incendios forestales, tanto de forma independiente como combinado con sistemas de predicción.

¹ Instituto para el Desarrollo Tecnológico y la Innovación en Comunicaciones (IDeTIC), Departamento de Señales y Comunicaciones, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, Campus Universitario de Tafira, 35017, Las Palmas, España. Tel. 928 452 974. E-mail: varana@idetic.eu

² Instituto para el Desarrollo Tecnológico y la Innovación en Comunicaciones (IDeTIC), Departamento de Señales y Comunicaciones, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, Campus Universitario de Tafira, 35017, Las Palmas, España. Tel. 928 452 974. E-mail: fcabrera@idetic.eu

³ Instituto para el Desarrollo Tecnológico y la Innovación en Comunicaciones (IDeTIC), Departamento de Señales y Comunicaciones, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, Campus Universitario de Tafira, 35017, Las Palmas, España. Tel. 928 452 974. E-mail: javier.perezmatto@gmail.com

⁴ Consejería de Medio Ambiente, Cabildo de Gran Canaria, 35003, Las Palmas, España. Tel. 928 350 286. E-mail: fgrillo_delgado@gmail.com.

⁵ Instituto para el Desarrollo Tecnológico y la Innovación en Comunicaciones (IDeTIC), Departamento de Señales y Comunicaciones, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, Campus Universitario de Tafira, 35017, Las Palmas, España. Tel. 928 452 974. E-mail: pdorta@idetic.eu

⁶ Instituto para el Desarrollo Tecnológico y la Innovación en Comunicaciones (IDeTIC), Departamento de Señales y Comunicaciones, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, Campus Universitario de Tafira, 35017, Las Palmas, España. Tel. 928 452 974. E-mail: pquintana@idetic.eu

⁷ Instituto para el Desarrollo Tecnológico y la Innovación en Comunicaciones (IDeTIC), Departamento de Señales y Comunicaciones, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, Campus Universitario de Tafira, 35017, Las Palmas, España. Tel. 928 452 974. E-mail: ejimenez@idetic.eu

⁸ Instituto para el Desarrollo Tecnológico y la Innovación en Comunicaciones (IDeTIC), Departamento de Señales y Comunicaciones, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, Campus Universitario de Tafira, 35017, Las Palmas, España. Tel. 928 452 974. E-mail: iperez@idetic.eu

⁹ Instituto para el Desarrollo Tecnológico y la Innovación en Comunicaciones (IDeTIC), Departamento de Señales y Comunicaciones, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, Campus Universitario de Tafira, 35017, Las Palmas, España. Tel. 928 452 974. E-mail: emendieta@idetic.eu

El sistema se fundamenta en la información extraída a partir de un conjunto de imágenes tomadas por cámaras térmicas. Sin embargo, a diferencia de las técnicas habitualmente utilizadas, permite distribuir dinámicamente los puntos de visión de forma rápida. Para ello, se han utilizado técnicas de integración de sistemas, procesado de imagen, estabilización automática y óptica aplicada sobre planos digitalizados.

La propuesta es especialmente indicada para operar en zonas con relieve abrupto donde las condiciones de visibilidad desde tierra son limitadas. Al ser una técnica que opera desde tierra, evita los problemas derivados de operar desde el aire como las turbulencias de aire, condiciones de viento racheado o limitación en el número de pases, en el caso de teledetección por satélite. Además, permite eliminar los problemas de impacto visual de las torres necesarias en sistemas de vigilancia estática, reducir drásticamente los gastos de mantenimiento y evitar problemas derivados del vandalismo, común a toda red de sensores, puesto que el despliegue sería sólo en época de alto riesgo de incendio o en caso de haberse producido. Por ello, posee un carácter preventivo y de asistencia en caso de incendio.

La solución ha sido evaluada con éxito en quemas controladas realizadas en Gran Canaria y probada igualmente en el Parque Nacional de Garajonay (La Gomera).

Palabras clave: Detección, seguimiento, incendio, móvil, georreferenciación de imagen y geolocalización.

DEVELOPMENT OF NEW TECHNIQUES FOR THE DETECTION AND TRACKING OF WILDFIRES BASED UPON RAPIDLY-DEPLOYABLE MOBILE THERMAL SENSORS (SeLiF)

ABSTRACT

The SeLiF project has supposed the development of detection and tracking system of wildfire contour lines. This has resulted in a 24/7 real-time monitoring sensor network, which contributes to the optimization of several key tasks within the prevention and extinction of wildfires, either independently or combined with other prediction systems.

The system relies upon information extracted from images taken by a series of thermal cameras. Nevertheless, the main difference with respect to currently-used techniques is the rapidly-deployable characteristic, which allows a rapid and dynamic distribution of the sensors throughout the different observation points. For this purpose a wide variety of disciplines has been involved, such as systems integration, image processing, automatic stabilization and calibration and optical identification based upon Geographical Information Systems (GIS).

This proposal is particularly suited for its application in abrupt terrains, where visibility conditions are usually limited. As a ground-based approach, several problems related with airborne conditions can

be overcome, such as turbulences, strong winds and overhead pass limitations in satellite observation procedures. On the other hand, it eliminates the visual impact of fixed observation towers usually needed for static surveillance. Maintenance due to environmental conditions and vandalism has also been avoided, as the system will only be deployed under imminent wildfire risk or once it has already started. For this particular reason it serves as a very suitable approach for the prevention and operational assistance in the event of a wildfire.

The solution has been successfully evaluated in controlled burns made during fire-fighting training in Gran Canaria and tested in the National Park of Garajonay (La Gomera).

Keywords: Detection, tracking, wildfire, mobile, image georeferencing and geolocation.

INTRODUCCIÓN

España es uno de los cinco países del sur de Europa más afectados por incendios forestales (EFFIS 2014). Durante el último decenio documentado (2004-2013) se registraron más de 16.000 incendios al año. Como reacción frente a estos escenarios de riesgo que no se ven favorecidos por los efectos del cambio climático, se plantea la necesidad de mejorar la eficacia de los sistemas de detección mediante el empleo de nuevas tecnologías, el desarrollo de sistemas innovadores y la optimización del despliegue de medios, para reducir la superficie media afectada y el número de grandes incendios.

La detección de incendios en España está regulada en el marco de la normativa forestal y de protección civil (Plan Forestal Español 2002-2032). Los Parques Nacionales no están exentos de este problema, hasta el punto que el Consejo de Ministros aprobó en mayo de 2012 un Acuerdo por el que se autoriza a la empresa Transformación Agraria Sociedad Anónima (TRAGSA) una encomienda de gestión para el servicio de prevención y extinción de incendios forestales en los Parques Nacionales (2012-2016), así como en centros y fincas adscritos al Organismo Autónomo de Parques Nacionales. El presupuesto para los cuatro años de vigencia de la encomienda es de 18,9 millones de euros. Sin embargo, poder disponer de un sistema de

detección temprana de incendios forestales supone una inversión inicial y coste anual que está fuera del alcance de los presupuestos que manejan nuestros PPNN. Además, la orografía abrupta y boscosa que suele caracterizar a estas áreas, dificulta la efectividad y cobertura de los sistemas de prevención convencionales.

Sistemas de detección y seguimiento de incendios forestales

Actualmente existen diversos sistemas de detección y seguimiento de incendios forestales (Montiel & Solana 2009), algunos de los cuales se encuentran categorizados a continuación.

1. Red de vigilancia terrestre fija. Los puestos de vigilancia terrestre fija pueden ser torres, casetas o refugios, que aparecen distribuidos por todo el territorio, especialmente en áreas donde los recursos forestales poseen un alto valor o en zonas de alto riesgo de incendios. Para una ubicación rápida y fiable del foco detectado desde un puesto de vigilancia se han desarrollado sistemas informáticos basados en la utilización de fotografías panorámicas, tales como VIGIS (Comunidad de Madrid) y UBIFOC (Comunidad Valenciana). En la detección automática de incendios se emplean también cámaras de vigilancia de infrarrojos en los sistemas BOSQUE

(INFOCA 2011) (Andalucía) y GESMACOM (Castilla y León). Los sistemas de vigilancia fija presentan en general un alto coste de instalación y mantenimiento, a la vez que permiten un campo de visión relativamente amplio. Las prestaciones de estos puestos de vigilancia se ven mejoradas cuando se incorporan cámaras de vigilancia de infrarrojos, ya que permiten detectar focos de incendio en condiciones de visibilidad reducida (incluso durante la noche). Sin embargo, los costes de instalación y mantenimiento son elevados y, en caso de áreas con orografía abrupta, el número de puntos necesarios se incrementa notablemente. Además, hay que añadir el fuerte impacto visual que supone la instalación de torres donde van instalados los sensores (INFOCA 2011).

2. Red de vigilancia terrestre móvil.- Las patrullas de vigilancia móvil en vehículo todoterreno facilitan la detección de focos registrados en zonas no cubiertas por la red de vigilancia fija. Además, estos vehículos de vigilancia y primer ataque (denominados VVPA) suelen estar dotados de un pequeño depósito de agua, de forma que permiten un primer ataque al fuego. Una función habitual de estas patrullas terrestres consiste en intentar localizar posibles incendios por rayos, a partir de coordenadas de impactos facilitadas por la Agencia Estatal de Meteorología durante el transcurso de tormentas eléctricas. Estas técnicas de detección se basan en la experiencia de los profesionales que forman parte de las patrullas terrestres, pero existe una alta subjetividad en la localización del incendio debido a un campo de visión reducido, así como a una elevada dificultad de detección en condiciones atmosféricas adversas.
3. Vigilancia aérea. La vigilancia aérea suele desarrollarse mediante helicópteros, aviones de coordinación y observación (ACO) de medios en emergencias y aviones de peque-

ña carga, que permiten un primer ataque tras la detección (aeronave de vigilancia y primer ataque). Además, estas aeronaves cuentan habitualmente con sistemas electrónicos avanzados que sirven de apoyo en las tareas de detección, como puede ser el GPS, las cámaras de vídeo (tanto en canal visible como en infrarrojo) y comunicación de datos móviles vía GPRS. En los últimos años se están desarrollando sistemas de vigilancia basados en vehículos aéreos no tripulados (UAV), que consisten en pequeños aviones, helicópteros y plataformas aerostáticas controladas de forma remota (OLLERO *et al.*, 2007; GONZALO *et al.*, 2007). Los sistemas de vigilancia aérea proporcionan un gran campo de visión instantáneo combinado con una gran flexibilidad a la hora de supervisar zonas de riesgo. Muchas de las aeronaves tripuladas utilizadas pueden actuar no sólo como sistemas de vigilancia, sino también como de primer ataque. Sin embargo, una de las principales preocupaciones a la hora de usar vigilancia aérea es la seguridad del propio piloto, que puede verse seriamente amenazada bajo condiciones meteorológicas adversas o por proximidad al foco del incendio, máxime en zonas con orografía abrupta donde se producen multitud de turbulencias locales. En estos casos, la aeronave no tripulada evita poner en peligro la vida de la tripulación pero su pequeño tamaño lo hace más inestable. En España no existe actualmente una definición formal sobre la habilitación de espacio aéreo segregado, lo que significa que habitualmente no puede compartirse un mismo espacio aéreo entre naves tripuladas y no tripuladas. Se entiende que en caso de pérdida de control, estas últimas pueden suponer un peligro activo para la tripulación del resto de aeronaves. Esta limitación junto con la baja autonomía que presentan las plataformas UAV hace que no sean una solución ampliamente adoptada aunque los continuos resultados en el área les auguran un futuro prometedor.

4. Teledetección espacial. El potencial de la teledetección en la lucha contra incendios se ha desarrollado en España a través de varios proyectos europeos de investigación (INSA 2007; GONZALO *et al.*, 2004). Uno de los primeros fue REMFIRESAT en 2002, del que destaca su producto de puntos calientes a partir de imágenes de baja resolución, que fue probado durante la campaña de incendios de 2003 en Castilla y León, y que desde ese año se viene utilizando en la detección de incendios (GONZALO *et al.*, 2005). En el año 2003, la Agencia Espacial Europea (ESA) decidió lanzar dentro del programa GMES (Global Monitoring for Environment and Security) el proyecto RISK-EOS. Actualmente el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente utiliza un producto de puntos calientes similar procedente de datos MODIS (Moderate- Resolution Imaging Spectroradiometer) generados por los satélites TERRA y AQUA. La teledetección espacial permite obtener imágenes multiespectrales que abarcan un campo de visión muy amplio, lo cual permite detectar incendios en zonas remotas. Sin embargo, los largos tiempos de proceso y los costes de vuelo reducidos hacen que este tipo de sistemas no puedan ser utilizados como apoyo operativo en tiempo real durante la extinción de incendios.
5. Sistemas Predictores-Correctores. Recientemente se han desarrollado sistemas (SHUAI *et al.*, 2011) que permiten visualizar en un entorno virtual interactivo la expansión de líneas de fuego. Sin embargo, la mayoría de estos sistemas toman como datos de entrada observaciones realizadas por las brigadas de incendio y posteriormente simulan mediante algoritmos predefinidos las condiciones del incendio, usando posteriormente herramientas GIS para representar los datos sobre un mapa virtual. Estos sistemas podrían incrementar su fiabilidad utilizando una realimentación basada en datos reales, que serían obtenidos mediante una red de sensores de manera que aumen-

te la objetividad de las medidas. Un ejemplo de esta mejora puede verse en (XUEFENG *et al.*, 2009), donde el algoritmo de simulación mejora la predicción de forma iterativa a medida que recibe datos por parte de sensores distribuidos en la zona afectada. La mayoría de estos sensores son pirómetros o dispositivos capaces de detectar aumentos significativos en temperatura, así como monitorizar otras variables directamente relacionadas con un incendio, como por ejemplo el aumento de niveles de CO² o la concentración de partículas procedentes de la combustión de recursos fósiles. Sin embargo, de forma individual estos sensores no son capaces de discriminar la naturaleza del fuego o incluso su aspecto geométrico. Es en este caso donde el uso de cámaras de vídeo puede ser decisivo a la hora de tener acceso a información más detallada sobre el incendio a combatir.

En (JAKOVCEVIC *et al.*, 2011) se describe como, mediante el análisis de las columnas de humo detectadas por cámaras en rango visible. La principal problemática asociada a discriminar el aspecto del incendio mediante columnas de humo, es que las características del humo dependen notablemente de la naturaleza del combustible fósil, con lo que sería necesaria una caracterización previa de la zona afectada. Asimismo, resulta imposible observar el fuego «soterrado» que se propaga a ras de suelo, con lo que no se puede predecir la dirección de propagación del fuego hasta que aparecen columnas de humo visibles. Una mejora que se desprende inherentemente del escenario anterior consistiría en utilizar cámaras térmicas para detectar el calor generado por las llamas, en lugar de las columnas de humo. En concreto se han realizado pruebas con un sistema que utiliza esta tecnología (PASTOR *et al.*, 2006). Sin embargo, se apoya en el uso de cámaras térmicas ubicadas en torretas estáticas, con lo que la flexibilidad se ve drásticamente reducida en caso de que el incendio se produzca fuera del campo de visión de estas cámaras, al margen de los problemas ya comentados anteriormente.

Hipótesis de partida y objetivos

La justificación del proyecto se fundamenta en la información recopilada de los técnicos de incendios forestales de La Comunidad Canaria que operan en los Parques Nacionales, concretamente, con los responsables en las islas de Gran Canaria, Tenerife, La Palma y La Gomera. A raíz de los problemas enumerados en la sección anterior y persiguiendo como meta la realización de una solución sostenible tanto técnicamente como económicamente, se estudia la posibilidad de realizar un sistema de seguimiento de líneas de fuego a partir un número limitado de puntos móviles de observación. Para ello, se plantean las siguientes hipótesis de partida:

- La orografía canaria hace mucho más rentable la utilización de personal de vigilancia en los cuatro meses críticos, que utilizar otras soluciones de detección.
- 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, sobre todo es crítica la noche donde las condiciones para la extinción son peores.
- El conocimiento que los técnicos tiene 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.
- A medida que el incendio evoluciona, los técnicos saben cómo ir reubicando dichos puntos para seguir teniendo una buena perspectiva de la evolución del incendio.
- El sensor debe ser suficientemente ligero para facilitar el despliegue y su movimiento.
- 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 deber requerir operaciones complejas, llegando sólo 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.
- En determinadas fiestas populares, sería utilizado también como sistema de prevención.
- Con las herramientas apropiadas, debería permitir integrarse con aplicaciones de predicción/corrección, reforestación y vigilancia puntual.

En respuesta a dichas premisas, la solución propuesta en el presente proyecto consiste en el desarrollo de un sistema de detección y seguimiento de las líneas de fuego en incendios forestales: integrar cámaras térmicas y visibles en un formato altamente transportable, autocalibrable, autónomo e inalámbrico, de forma que puedan ser rápidamente desplegadas para cubrir el área de interés. Las imágenes térmicas serán procesadas para ser georreferenciadas y contrastadas con una base de datos GIS, de forma que el sistema de representación pueda mostrar en tiempo real la evolución de las líneas de fuego, asistiendo así a los equipos de detección y extinción. Los estudios irán encami-

nados hacia la obtención de aquellas técnicas que permitan obtener las siguientes características:

- Visualización en tiempo real, 24 horas al día.
- Mínimo consumo y peso.
- Reducir impacto visual de sistemas convencionales terrestres.
- Reducción de costes por mantenimiento y vandalismo.
- Aplicable en áreas de perfil abrupto y bosque.
- Capacidad de despliegue rápido.
- Facilidad de despliegue por personal no especializado.

Los estudios y prototipos se han desarrollado en los laboratorios del Instituto para el Desarrollo Tecnológico y la Innovación en Comunicaciones (IDeTIC) y se ha evaluado en las Cumbres de Gran Canaria y Parque Nacional de Garajonay (La Gomera) aunque puede extenderse a cualquier área geográfica.

MATERIAL Y MÉTODOS

En este apartado se expone las herramientas y procedimientos utilizados para el diseño del prototipo. Se comienza con la descripción del sistema de visión sintética, que es la parte clave sobre la que giran las prestaciones novedosas del sistema propuesto y de la que se derivan el resto de beneficios. A continuación, se detalla la integración de las partes que configuran la unidad de despliegue rápido y el programa desarrollado como primera versión del asistente al despliegue.

Sistema de visión sintética

Muchos de los sistemas de detección de incendios están basados en cámaras térmicas que son capaces de proporcionar las temperaturas de cada uno de los puntos que componen la

imagen. Fijado un umbral de temperatura que se considera suficientemente alto para considerar que está provocado por el fuego, basta un sencillo procesado de la imagen para saber si se ha producido un incendio. El problema radica en situar dichos puntos calientes en un plano digitalizado, es decir, geolocalizar el incendio. Para conseguir esta geolocalización se ha desarrollado un procedimiento basado en lo que hemos denominado imagen sintética.

Una imagen sintética es la que obtendría una cámara virtual, con una ubicación y orientación dada, sobre un plano 3D digitalizado del terreno. 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 1 muestra la imagen que se obtendría si representamos la matriz de alturas, asignando una coloración en función de la altura del pixel (b) y a su lado, se muestra una fotografía obtenida desde una cámara térmica ubicada en el mismo punto del terreno (a). 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.

Para generar la imagen sintética se utiliza la técnica de *Ray-Tracing* (PARKER *et al.*, 1998). Aplicada al caso que nos ocupa, consiste en trazar rectas que van desde el foco de la cámara virtual, pasando por cada uno de los puntos que componen la matriz $(m \times n)$ y obtener los datos del plano 3D por donde cruzan (Figura 2).

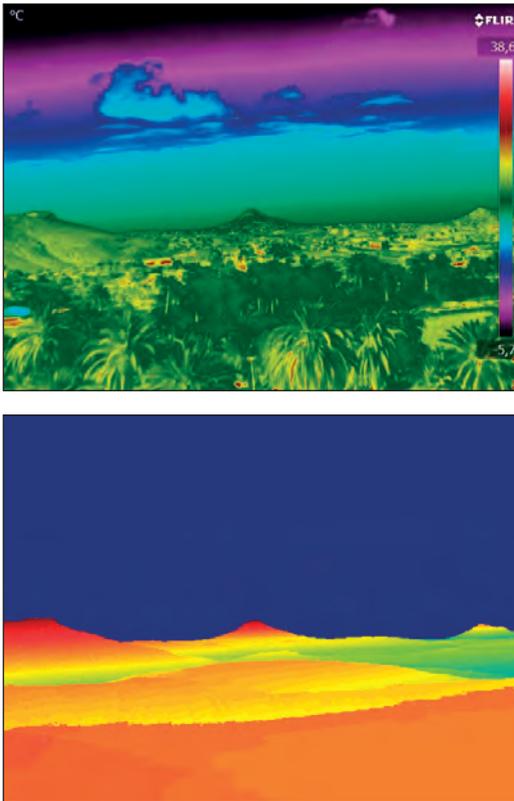


Fig. 1. Ejemplo de aplicación para imagen térmica e imagen sintética elaborada para el proyecto SeLiF. Al fondo y centrada, puede observarse la Montaña de Arucas. a) Imagen obtenida con cámara térmica (640x480 puntos). b) Representación de alturas asociadas a cada punto de la imagen sintética (640x480 puntos).

La precisión en la ubicación de los puntos de fuego, pasa por tener una información fiable de la posición y orientación de la cámara térmica, es decir, coordenadas geográficas del terreno, altura del terreno en ese punto y ángulos de cabeceo, alabeo y rumbo geográfico. La ubicación se obtiene de un GPS (Global Positioning System) y la orientación de una IMU (Inertial Measurement Unit).

La precisión del GPS viene dada por el parámetro HDOP (Horizontal Dilution of Precision) (WING & FRANK 2011) que depende

del número de satélites que están visibles en un momento dado. Una visión de 7 u 8 satélites puede proporcionar un HDOP inferior a uno, lo que se traduce en errores de dos o tres metros en superficie. Sin embargo, el error en altura se mantiene relativamente elevado y resulta mucho más práctico extraer la información de altura a partir de la posición anterior llevada a un plano 3D de la zona.

La IMU o unidad de medida inercial está compuesta por giróscopo, acelerómetro y magnetómetro. La información del rumbo geográfico se obtiene a partir del rumbo magnético que proporciona la IMU y del valor de la declinación magnética en el lugar e instante correspondiente. La IMU debe ser calibrada (Figura 3) para conseguir errores que pueden estar por debajo del grado en cada uno de los ángulos. Sin embargo, el sensor más crítico es el magnetómetro porque se ve sometido a interferencias electromagnéticas que pueden producir los elementos circundantes (LUO et al., 2013). Un error teórico de un grado (0,017 radianes) supone un desplazamiento de 34 metros en un punto que se encuentra a 2 Km ($0,017 \times 2000 \text{ m} = 34 \text{ m}$), lo que sigue siendo aceptable para una aplicación como la de incendios forestales.

El programa desarrollado permite obtener la imagen sintética a partir de: mapas con formato GeoTIFF (los mapas con resolución $5 \times 5 \text{ m}^2$ pueden adquirirse gratuitamente para todo el territorio español), datos característicos de la cámara (imagen: 640×480 puntos, apertura angular: $24^\circ \times 18^\circ$), datos de posición (longitud y latitud), datos de orientación (cabeceo, alabeo y rumbo magnético), declinación magnética y distancia máxima. Esta última determina los kilómetros que se consideran para reconstruir el perfil y que vienen fijados por la sensibilidad de la cámara utilizada, es decir, por su capacidad para detectar la temperatura umbral que determina la amenaza de fuego

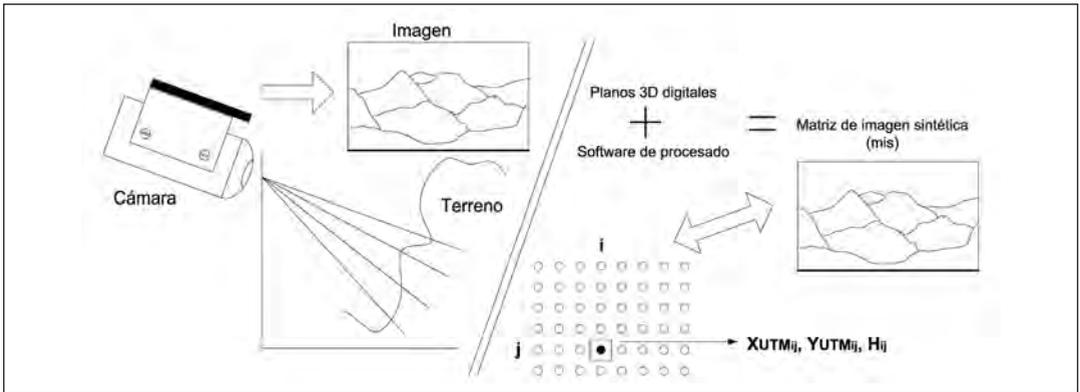


Fig. 2. Ejemplo de Ray-Tracing y formación de la imagen sintética de dimensión $\{m, n, 3\}$. Cada punto de la matriz contiene las coordenadas UTM y altura $(X_{UTMij}, Y_{UTMij}, H_{ij})$.



Fig. 3. Placa de evaluación del sistema de orientación Razor-9DOF en la cámara térmica usada en el sistema de autocalibración. Se ha superpuesto la nube de puntos que se obtiene en el proceso de calibración.

Unidad móvil de detección y seguimiento automatizado

Una vez desarrollado el software que permite realizar la geolocalización de puntos potenciales de fuego, se procede a la integración de los elementos que dotan al sistema de la capacidad de movilidad y automatización de todo el proceso. A continuación, se describen las diferentes partes que lo componen, así como las interfaces de conexión y el programa principal que las integra.

El diagrama de bloques del prototipo se muestra en la figura 4. En ella cabe destacar la cámara ter-

mográfica, la unidad de posicionamiento (GPS), la unidad de orientación (IMU) y los siguientes sistemas: servos, alimentación, comunicaciones y control. Además, aunque no es necesario para conseguir los objetivos del proyecto, se ha incorporado una cámara de espectro visible a petición de los técnicos en extinción de incendios, con el objeto de aprovechar el sistema de comunicaciones que lleva incorporado el sistema y poder realizar una valoración visual en un punto remoto. Para proporcionar una mayor comodidad en las pruebas de campo, parte del sistema se ha integrado en una mochila que ha sido preparada para realizar de forma externa el conexionado con los elementos que deben ir en el exterior y sobre un trípode.

En la figura 5 se muestra en detalle los elementos que van integrados en el trípode. La IMU está montada en la parte superior de la cámara térmica y el conjunto de cámaras está ubicado en una base que tiene posibilidad de movimiento en azimuth y elevación, mediante dos servos que se controlan desde la unidad ubicada en la mochila. Gracias al sistema de autocalibración que tiene en cuenta la información que llega de la IMU y el GPS, no es necesario que la base de las cámaras se encuentre paralela al plano de tierra, lo que facilita su operación incluso en situaciones de estrés, en las que el operario podría colocar el trípode de cualquier forma, siempre y cuando estuviese bien

añanzado en tierra. Las cámaras utilizadas tienen una resolución de 640x480 y un ángulo de visión horizontal de 25°, lo que cubriría una franja lineal de 873 metros a 2 Km de distancia. Obviamente, el movimiento de los servos permitiría cubrir los 360° con 15 imágenes ($330^\circ \div 25^\circ = 14,4$).



Fig. 4. Diagrama de bloques de la unidad móvil de despliegue rápido.



Fig. 5. Cámara visible y térmica sujetas a la base que mueven los servos.

En el interior de la mochila (Figura 6) se encuentra el resto de los elementos, además de un sistema de extracción de aire para mejorar la disipación de calor. El sistema de alimentación es el encargado de suministrar la energía necesaria a

todo el equipo, regulando las diferentes tensiones que requieren (19.5, 12, 7.4 y 5 voltios). El diseño incluye dispositivos de protección para cortocircuito y sobrecarga, dos baterías de plomo-ácido de gel (12v y 7.5 Ah) que pueden ser recargadas a través de conectores externos, así como la posibilidad de conectar un sistema auxiliar de alimentación (generador, paneles solares, etc.). Las interfaces de los sistemas de posicionamiento (GPS), orientación (IMU) y servos, también se encuentran en el interior de la mochila.



Fig. 6. Mochila adaptada que contiene los subsistemas de control, alimentación y comunicaciones.

El sistema de comunicaciones se ha diseñado con capacidad de redundancia para garantizar la evacuación de la información mínima necesaria, incluso en condiciones extremas. Hay que tener en cuenta que en zonas forestales no es habitual que exista una buena cobertura y ancho de banda. Además, en caso de incendio suelen «caer» las estaciones repetidoras y se reduce aún más la ca-

pacidad de transmitir la información necesaria. En el sistema se ha desarrollado un gestor que combina tres tipos de comunicación: UMTS (Universal Mobile Telecommunications System), TETRA (Terrestrial Trunked Radio) e Iridium SSDB (Satellite Short Burst Data). Cabe destacar que el coste del sistema satelital utilizado es de unos 16\$/mes para una velocidad de unos 250 bytes/minuto. Aun así, el sistema desarrollado permite transmitir en tiempo real (inferior a 2 minutos para Iridium SSDB) la información mínima necesaria para visualizar la evolución de un incendio en 3D.

Por último, el sistema de control es el encargado de configurar todos los dispositivos y mantenerse vigilante de forma autónoma desde el momento que se activa la unidad. La figura 7 recoge la secuencia en la que se ejecutan las diferentes partes que conforman el programa desarrollado. El programa dispone de varias opciones que atienden a diferentes condicionantes de uso. Atendiendo al modo (Normal/Demostrador), permite realizar una ejecución que ilustra paso a paso los detalles del programa (Demostrador). En cuanto a la ubicación (Interior/Exterior), permite realizar pruebas en interior donde no se recibe señal del GPS y pueden existir grandes alteraciones del campo magnético. Por último, el control del sistema de posicionamiento (Auto/Manual) establece si la búsqueda de fuego se realiza de forma totalmente autónoma o mediante comandos que permiten el control remoto.

Al activar el interruptor, comienza la inicialización del sistema y se ofrece durante tres segundos la posibilidad de modificar alguna opción de funcionamiento. En este párrafo se describe sólo la configuración por defecto (Normal/Exterior/Auto). En primer lugar se actualiza el dato del GPS cuando está dentro de los márgenes de error establecidos ($HDOP < 1$). A partir de ese instante comienza el bucle de búsqueda de fuego. De forma cíclica y en intervalos de tiempo configurables que permiten reducir el consumo, los servos van posicionando la cámara por todo el espacio hasta

que algún punto de la imagen térmica supera el umbral de fuego. En ese instante, se obtienen los datos de posición y orientación para poder realizar la georreferenciación de la imagen y posterior geolocalización de los puntos de fuego mediante la generación de la imagen sintética. La información es enviada al gestor de comunicaciones que se encargará de transmitirla por la vía más eficiente según disponibilidad y coste del servicio (UMTS, TETRA o Iridium). Mientras el gestor de comunicaciones envía la información, el sistema prosigue con la búsqueda de fuego en otra posición. El funcionamiento correcto del programa y su interacción con cada uno de los elementos que componen el prototipo ha sido evaluado y depurado, tanto individualmente como integrado con el resto del sistema (Figura 8).

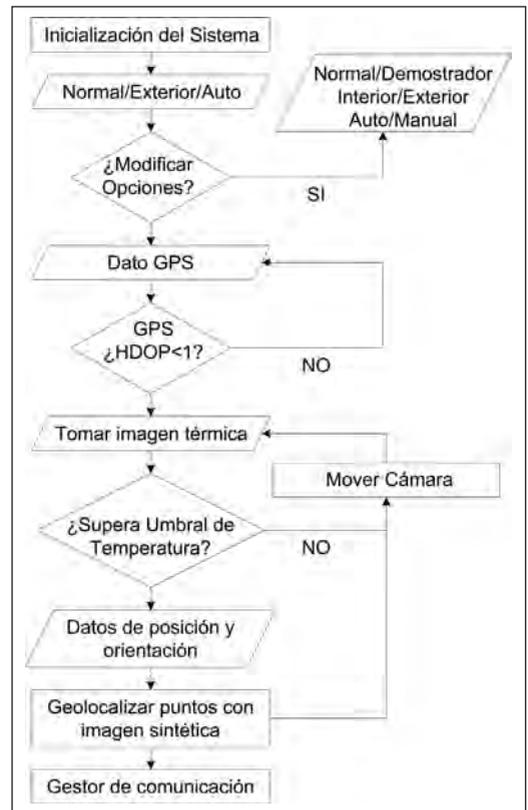


Fig. 7. Diagrama de flujo simplificado que detalla los pasos del programa de control.

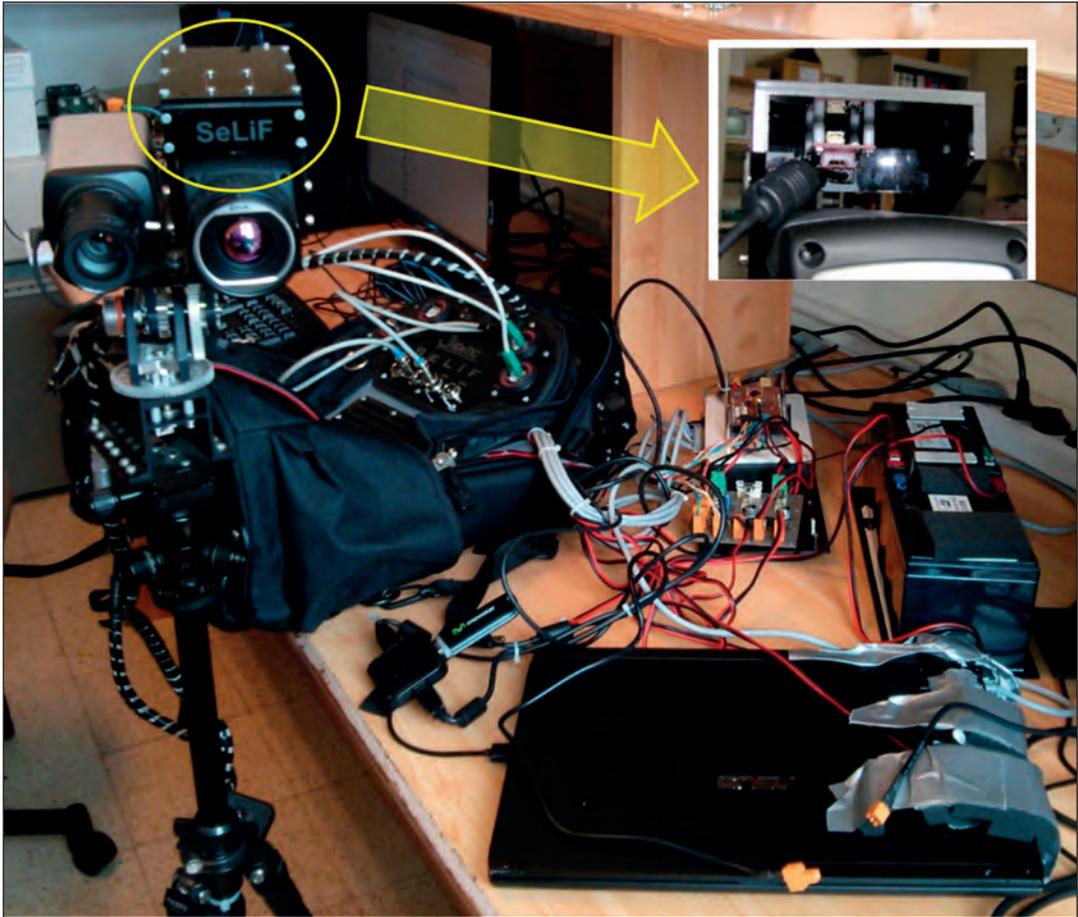


Fig. 8. Pruebas finales del prototipo SeLiF en los laboratorios del IDeTIC. Se ha incluido un detalle de la IMU.

Asistente al despliegue

El Asistente al despliegue es un programa que tiene por objeto proponer las mejores ubicaciones para vigilar un área que puede ser delimitada con carácter preventivo, cuando las condiciones ambientales pueden suponer una amenaza potencial de incendio (regla del 30: humedad inferior al 30%, temperaturas superiores a 30°C y vientos superiores a 30Km/h); o en caso de incendio, es decir, áreas por las que discurre el incendio o zonas que requieren vigilancia preventiva por si cambian las condiciones de propa-

gación, viento principalmente. Aunque en última instancia la responsabilidad de la ubicación de los observadores móviles es de los técnicos de parques o de extinción, se pueden fijar unos criterios de valoración a cada uno de los puntos previamente estudiados, que permitan fijar unas funciones objetivo y elegir la ubicación más adecuada. En esta versión los parámetros considerados son cinco: superficie de detección en m², coeficiente de valoración del acceso, coeficiente de valoración de la cobertura radioeléctrica, coeficiente de visibilidad y coeficiente de valoración general.

Siguiendo estas premisas, se ha desarrollado un programa que incluye una interfaz gráfica de usuario (GUI) que obtiene las coberturas de detección de los puntos estratégicos de una zona geográfica. Desarrollar la totalidad de las funciones facilitará la interacción con el resto del sistema en versiones posteriores, puesto que no habrá necesidad de llamadas a programas externos y se logrará una mayor integración. El programa permite como aspectos más relevantes: introducir planos cartográficos GeoTIFF, mostrar 4 zooms del plano; introducir

ubicaciones de observación, asociando sus parámetros de calidad (cobertura radioeléctrica, accesibilidad, visibilidad, valoración global) y cobertura de detección; finalmente, generar un fichero con formato kml para poder representar en Google-Earth los puntos, parámetros de calidad y cobertura de detección (Figura 9). La cobertura de detección viene delimitada por las características de la cámara térmica y la temperatura mínima que se desea detectar. Este valor viene fijado por la temperatura umbral que determina la presencia de fuego.

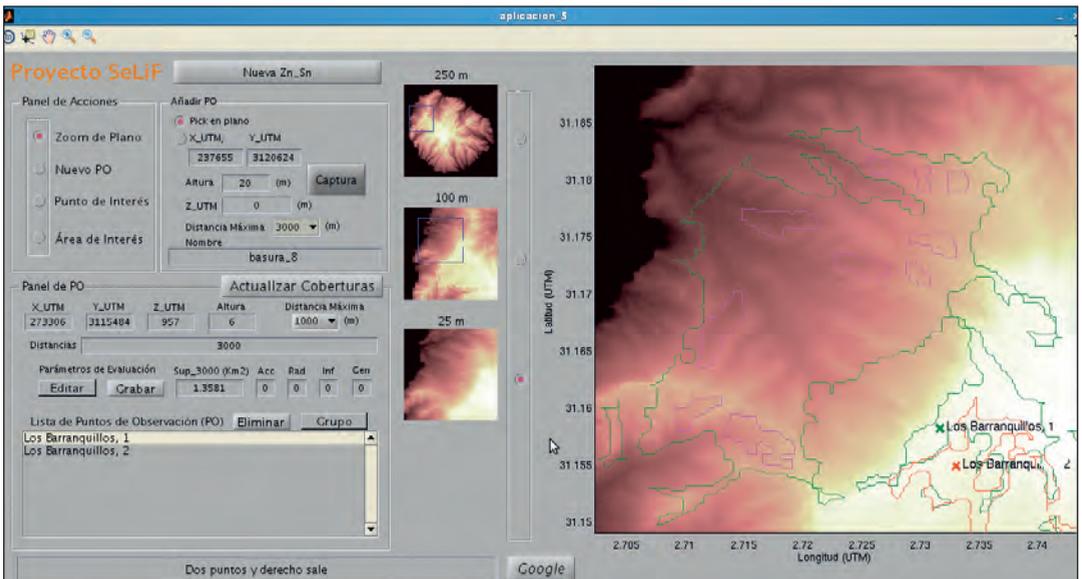


Fig. 9. GUI (Interfaz Gráfica de Usuario) del programa de asistencia al despliegue. Se ha incluido dos puntos con sus respectivas áreas de detección. Las zonas de sombra interiores se han representado en color cian.

RESULTADOS

Los resultados del proyecto se circunscriben a las tareas asociadas para evaluar el comportamiento del prototipo desarrollado y la aplicación del programa de despliegue al Parque Nacional de Garajonay de La Gomera. Las condiciones meteorológicas y la disponibilidad de medios para poder realizar una quema controlada en La Gomera aconsejaron realizar pruebas en el interior de las oficinas del parque y pruebas de exterior donde

se detectaron objetos calientes que superaban el umbral de temperatura ajustado para la ocasión.

El primer aspecto considerado es la capacidad de detección y seguimiento de incendios forestales, evaluando el prototipo en condiciones de campo abierto mediante pruebas de detección de umbral térmico. A continuación, se evalúa el potencial del programa de asistencia al despliegue a partir del mapa de detección del Parque Nacional de Garajonay.

Geolocalización de puntos calientes

Los ajustes previos del prototipo se realizaron a partir de quemas controladas que realiza periódicamente el Cabildo de Gran Canaria en la zona de La Cumbre. Paralelamente, se realizaron dos cortas estancias en el Parque Nacional de Garajonay para mostrar la capacidad del sistema y explicar los procedimientos seguidos hasta la fabricación del prototipo. A continuación, se exponen los resultados más destacados.

El umbral de detección de fuego puede tomar un valor que reduce el riesgo de falsas alarmas (100°),

independientemente de la temperatura media que pueda tener el entorno. Es decir, independientemente de la estación del año, hora del día y distancia fuera del rango de detección de la cámara térmica, superar los 100° en alguno de los puntos de la imagen térmica es un claro indicio de que existe fuego. La figura 10 muestra un compendio de diferentes imágenes que resumen el proceso de detección y localización de fuego en una quema controlada realizada en La Cumbre (Gran Canaria): localización del prototipo desarrollado, imagen visible y térmica, imagen que resalta los puntos que superan el umbral y resultado de la geolocalización de dichos puntos en Google-Earth.

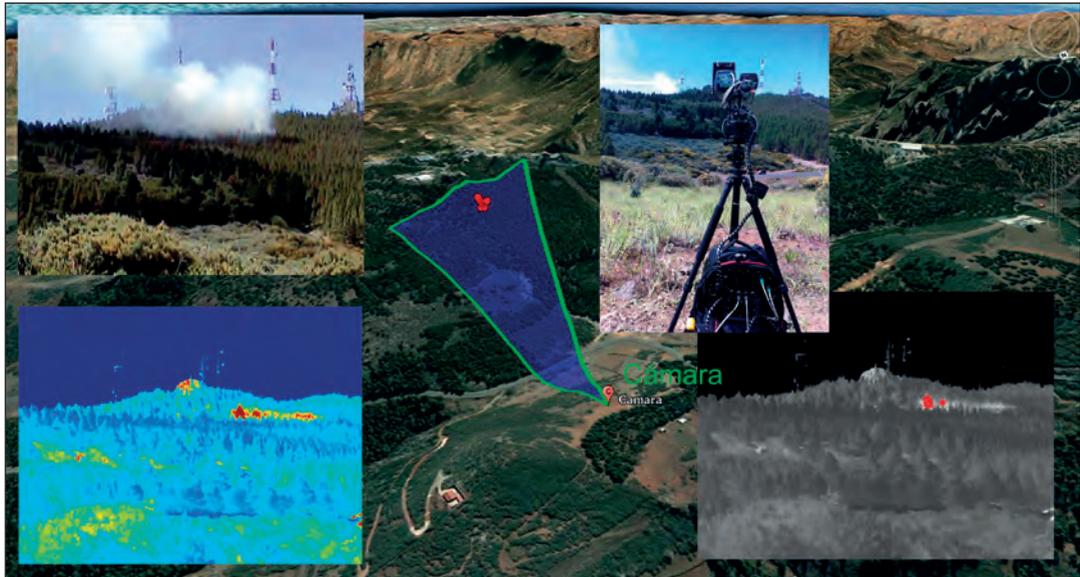


Fig. 10. Muestra del formato de representación sobre Google-Earth de la ubicación de cámara y puntos calientes detectados. Se han incrustado algunas imágenes del proceso de detección.

Ajustando el umbral de detección hacia valores menores, nos ha permitido realizar multitud de pruebas del sistema sin necesidad de existencia de fuego. En muchas demostraciones era suficiente con detectar el calentamiento de una loma por el sol o el calentamiento de un vehículo aparcado, para que el sistema entendiera que era una amenaza potencial y realizara las tareas programadas hasta llegar a localizar sobre el Google-Earth la zona correspon-

diente. La figura 11 muestra las pruebas realizadas en las proximidades de las oficinas del Parque Nacional de Garajonay (La Gomera). A pesar de ser un día nublado en la zona del parque, se realizaron geolocalizaciones de vehículos que estaban aparcados y tenían el motor caliente.

Las pruebas mostraron errores de ubicación inferiores a 30m en distancias de 2.5Km, lo que equi-

vale a errores de orientación inferiores a 0.7° . Sin embargo, cuando se ubicaba el sistema en las proximidades de líneas y torres de alta tensión o grandes edificaciones de hormigón armado o metálicas, las alteraciones del campo magnético aumentaban considerablemente este error y se desaconseja el uso en estos lugares, salvo que se conozca previamente el desfase a partir de medidas previas o que se realice una calibración in-situ en esas zonas.



Fig. 11. Pruebas del sistema SeLiF en La Gomera (noviembre de 2015)

Las prestaciones que posee el prototipo para poder realizar demostraciones en interiores ha facilitado la difusión de resultados en el Parque Nacional de Garajonay, Consejería de Medio Ambiente de La Gomera, Colegios e Institutos de Gran Canaria y Tenerife, Centros de la Universidad de Las Palmas y La Laguna, empresas del sector medioambiental (MEDI XXI) y Unidad Militar de Emergencias (UME). En ese caso, se introduce manualmente la posición y se comprueba previamente la desviación del campo magnético para poder aplicar dicho desfase en la orientación y poder así, lograr que exista una coherencia entre el paisaje exterior al edificio y lo que el sistema muestra en Google-Earth. Para emular el incendio, se ubica un pequeño objeto caliente (calefactor, secador, etc.) a cierta distancia del objetivo de la cámara térmica para que se desencadene toda la secuencia del programa. En este modo de funcionamiento (Demostrador/Interior/Manual o Auto), los asistentes pueden ir viendo paso a paso cada uno

de los elementos claves del proceso hasta llegar a representar la proyección en Google-Earth de los puntos calientes sobre el relieve exterior al edificio.

En todas las demostraciones se hace hincapié en la automatización del proceso, aspecto especialmente recomendado en situaciones de estrés donde el operario no siempre puede tener el tiempo y la calma para realizar una calibración cuidadosa o simplemente, estabilizar adecuadamente la plataforma que sustenta las cámaras.

Mapa de detección del Parque Nacional de Garajonay

Un mapa de cobertura visual permite garantizar que siempre se dispone de un punto de observación que cubra un área de interés. En nuestro caso, el área de interés no sólo se debe limitar a la superficie del parque, sino que debe ser necesariamente ampliada a la periferia porque el origen de muchos incendios se produce en el exterior donde las imprudencias son más usuales y la circulación de personas no está sujeta a un control preventivo. En nuestro caso, el mapa de detección viene limitado por la distancia máxima a la que una cámara térmica puede detectar la existencia de fuego, dentro de su cobertura visual.

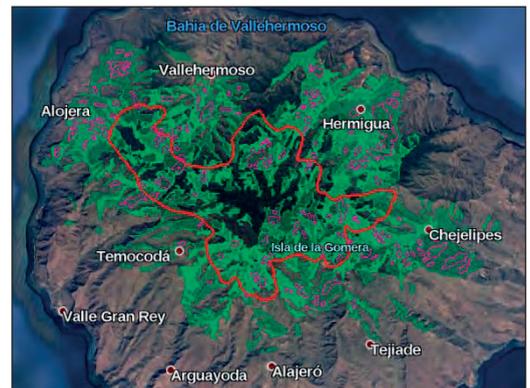


Fig. 12. Zonas cubiertas desde los puntos de observación, considerando 3Km de rango de detección. En color cian se han representado las zonas de sombra.

En la segunda estancia realizada en el Parque Nacional de Garajonay se han tomado datos de aquellos puntos que los técnicos entendían que podían cubrir con garantías la superficie del parque y sus aldeaños. En cada punto se ha evaluado de 1 a 10 aquellos aspectos que se han incluido en el programa de asistencia al despliegue: cobertura radioeléctrica, accesibilidad, visibilidad y valoración global. En la Tabla I se detalla el listado de ubicaciones, valoración de los diferentes aspectos y la superficie de detección calculada. Para el cálculo de la superficie se ha fijado ar-

bitrariamente un alcance máximo de la cámara térmica de 3Km. En realidad, la cámara utilizada posee un rango superior pero se ha considerado un valor más acorde a las cámaras de menor coste (hasta 10 veces menor) que existen en el mercado y que serían el futuro de esta propuesta. La figura 12 muestra los límites del Parque Nacional de Garajonay y el conjunto de coberturas calculadas según se ha indicado. Los 34 puntos que componen la lista garantizarían una cobertura del 65% aunque la periferia queda cubierta en más del 90%.

Tabla I. Propuesta de puntos de observación del Parque Nacional de Garajonay caracterizados por su latitud, longitud, valoración del acceso (Acc), valoración de la cobertura radioeléctrica (Rad), valoración de la visibilidad (Infr), valoración general (Gen) y Superficie cubierta en Km2 para una altura de 6 metros y 3Km de alcance (Sup).

	Denominación del punto de observación	Latitud	Longitud	Acc	Rad	Infr	Gen	Sup
1	Parte baja de torreta militar Degollada Perezá	28.099073	-17.180083	9	10	10	9	3,6844
2	Las Nieves	28.102401	-17.202139	5	6	6	6	4,2444
3	Mirador Agando-La Laja 1	28.107444	-17.213353	10	10	10	10	2,2475
4	Mirador Agando-La Laja 2	28.107408	-17.213643	10	10	10	10	2,1237
5	Mirador Roque Colgante	28.109928	-17.214223	8	0	10	5	1,5088
6	Mirador del Rejo	28.125195	-17.206506	10	4	9	6	1,1619
7	Mirador del Bailadero	28.123200	-17.209379	8	10	10	8	3,7781
8	Mirador de Tajaqué	28.109138	-17.224557	9	8	10	9	5,4481
9	Eretos	28.095948	-17.248000	9	8	7	9	0,5575
10	Eretos – Canteras	28.095105	-17.245705	8	8	7	8	2,3100
11	Caseta de las Paredes	28.099260	-17.246800	8	10	9	9	0,9737
12	Cruz de María	28.106678	-17.267386	10	8	10	9	2,4150
13	Mirador de Igualero	28.099417	-17.255172	10	10	10	10	2,7262
14	Mirador El Cedro	28.113265	-17.242010	10	0	9	5	1,7063
15	Alto Garajonay 1	28.107330	-17.249000	10	10	10	10	2,2025
16	Alto Garajonay 2	28.106851	-17.248830	10	10	10	10	2,8037
17	Mirador de Risquillos 1	28.145178	-17.286484	6	8	8	6	4,0881
18	Mirador de Risquillos 2	28.145740	-17.288550	6	8	9	7	2,1044
19	Mirador de Alojera	28.151260	-17.308622	9	0	10	5	5,5637
20	Las Cochineras	28.143322	-17.316400	9	8	10	9	4,0250
21	La Meseta, Barranco Los Tilos	28.155843	-17.290287	9	10	10	9	1,4125

Denominación del punto de observación	Latitud	Longitud	Acc	Rad	Infr	Gen	Sup
22 Repetidores de Pina	28.171867	-17.292023	9	10	8	8	5,1994
23 La Meseta	28.155083	-17.281749	8	4	9	6	4,0512
24 Mirador de Manederos	28.124208	-17.162103	10	6	10	8	5,0775
25 Mirador de Carbonera	28.135139	-17.194301	6	2	6	4	4,0131
26 La Hermita de San Juan	28.161617	-17.202315	8	8	10	8	6,1338
27 Carretera a la Ermita Estanquillo	28.154310	-17.201395	8	4	10	7	4,2975
28 Mirador de Bolas 1	28.179076	-17.212968	10	8	10	9	2,5587
29 Mirador de Bolas 2	28.179021	-17.213143	8	0	8	5	2,9087
30 Moledor Aceviño	28.160357	-17.218443	10	2	7	4	2,7781
31 Moledor, Bco. La Palmita	28.160955	-17.219872	10	4	6	7	2,1694
32 Mirador del Dinero	28.159122	-17.237336	9	6	8	8	3,3400
33 Mirador de Vallehermoso	28.157304	-17.245492	10	6	8	8	3,6037
34 Las Hayas	28.124648	-17.288778	10	10	10	10	3,9700

DISCUSIÓN

El umbral de temperatura se utiliza para todos los puntos que componen la imagen térmica. Sin embargo, si se realiza un estudio promedio de las temperaturas detectadas en función de la distancia, se podría fijar un umbral adaptado (aspectos que gracias a la capacidad de georreferenciación de la imagen es posible realizar con el sistema), que permitiría aumentar el rango de detección para una cámara térmica dada. Puesto que ya se cuenta con una imagen georreferenciada de la que se conoce las coordenadas de cada punto, no será complicado añadir esta característica.

El proceso de geolocalización de puntos de fuego puede producir errores cuando existe un objeto que arde (por ejemplo, un árbol de gran tamaño), se encuentra próximo al punto de observación y no está incluido en la información del plano digitalizado 3D. En ese caso, el sistema interpretaría que la superficie quemada es la proyección sobre el terreno situado detrás, según la recta que une la cámara y dicho objeto. Sin embargo, si existe un objeto próximo que está ardiendo, no sería aconsejable mantener el sistema en esa ubicación.

La cámara que se ha utilizado en la mayor parte del proyecto posee unas características muy superiores a las necesarias para la detección de fuego. Sin embargo, es la que estaba disponible en el laboratorio del equipo investigador.

La complejidad de la función objetivo que debe decidir qué punto de observación es el más adecuado, abre un amplio abanico de posibilidades atendiendo a los recursos humanos y materiales disponibles, así como a las estrategias en términos de cobertura, capacidad de evacuación o riesgo, entre otras. No ha sido objeto detallado de estudio en este proyecto pero se augura que será una línea de trabajo futura bastante interesante.

La principal deficiencia que muestra el prototipo y que debe ser estudiada en futuros trabajos, es el error que experimenta el magnetómetro en presencia de estructuras metálicas principalmente. Sin embargo, el sistema desarrollado puede ser utilizado para calcular la desviación que se comete en cada punto, aspecto que ha sido utilizado para evaluar los errores comentados previamente.

CONCLUSIÓN

Los Parques Nacionales tienen asignado un papel activo en la gestión y prevención de incendios forestales. Los sistemas de vigilancia son parte fundamental de esa labor pero el coste de una red efectiva está actualmente fuera del alcance presupuestario de los PPNN. En este sentido, el proyecto SeLiF (<http://selif.idetic.eu>) supone un avance sustancial frente a las soluciones clásicas que se encuentran en el mercado. La solución propuesta permite desplegar rápidamente varios puntos de vigilancia en el área de interés y trazar la evolución de los puntos calientes detectados. El prototipo desarrollado es una demostración de que la visión sintética generada a partir de los planos digitales y la información de los sensores de ubicación (GPS) y orientación de la cámara (magnetómetro, giróscopo y acelerómetro), combinada con las imágenes térmicas, puede ser una solución barata y sostenible en el tiempo. Además, el sistema proporciona las coordenadas (geolocalización) de los puntos calientes a partir de un algoritmo que automatiza el proceso de georreferenciación de la imagen. Esto último permite que el despliegue y operación pueda ser controlado por personal no especializado. Por otro lado, el pre-procesado que se realiza en el equipo permite reducir el volumen de información que debe ser transmitida, lo que simplifica el sistema de comunicaciones al no tener que enviar las imágenes tomadas directamente de la cámara.

Como parte de los objetivos del proyecto, se ha desarrollado el programa que realiza la gestión en el despliegue de los puntos de observación. Las funciones desarrolladas permiten interactuar de forma transparente con el resto del sistema y establecer funciones objetivo que permitan elegir el mejor punto de observación atendiendo a parámetros como facilidad de acceso, cobertura radioeléctrica o visibilidad. En este proyecto se ha utilizado para realizar una

lista de puntos potenciales de observación que garantizan una cobertura de detección del 65% del Parque Nacional de Garajonay y de más del 90% en la periferia.

Parte de los resultados de este trabajo se encuentran publicados en la revista *IEEE Aerospace & Electronics Systems Magazine* (JAVIER *et al.*, 2016), donde la imagen del prototipo desarrollado ha sido la portada y contraportada. Este trabajo ha dado lugar a la Tesis Doctoral de D. Javier Pérez Mato que será defendida a principios de 2017 y que lleva por título: «Nuevas técnicas de geolocalización basadas en la fusión de visión sintética y termográfica: aplicación en la detección de líneas de fuego». Además, una primera aproximación para drones que complementa la solución de tierra, ha sido desarrollada en el proyecto de la convocatoria 2014 de la Fundación Biodiversidad del Ministerio de Alimentación, Agricultura y Medio Ambiente (SIVU 2015).

Pendientes de las mejoras que se realicen (robustez, mayor integración, menor coste, peso y consumo) para poder pasar a producto industrial a través de la transferencia tecnológica a empresas, de forma general y como prevención de futuros incendios, se propone:

- Mantenimiento de los accesos a los puntos de observación de la Tabla I y eliminar los obstáculos que impidan una buena visión.
- Localizar nuevos puntos que permitan extender al 100% la zona de cobertura de detección, creando accesos cómodos que faciliten la movilidad y evacuación. Por ello, se recomienda disponer de un número suficiente que garantice grandes solapamientos entre las áreas cubiertas. Al menos habría que garantizar el 100% de la cobertura visual para que pueda observarse con prismáticos de infrarrojos o visible.

AGRADECIMIENTOS

A Juan Domingo Santana Urbín por su inestimable participación en la construcción del prototipo, especialmente la mochila. A Jaime, Silvia y Juanfra 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 incendios del Cabildo de La

Gomera y Personal Técnico del Parque Nacional de Garajonay por su atención y colaboración en las tareas que se realizaron durante las dos estancias que realizamos en La Gomera, además de entender la potencialidad del prototipo desarrollado en la prevención y gestión de incendios forestales, que se ha traducido en posteriores colaboraciones en proyectos afines. Finalmente, a los operativos en extinción de incendios de la Unidad Militar de Emergencia (UME), Cabildo de La Palma y Cabildo de Tenerife.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- EFFIS. (2014): Anual Fire Reports, Forest Fires in Europe, Middle East and North Africa. European Forest Fire Information System. <http://effis.jrc.it>
- MONTIEL, C.; Solana, J. y Herrero, G. (2009): Sistemas de Detección de Incendios Forestales en España. Revista Montes. INFOCA. (2011): Sistema Bosque. Plan de Emergencia por Incendios. Forestales de Andalucía (INFOCA), Junta de Andalucía.
- OLLERO, A., MARTÍNEZ DE DIOS, J. R., MERINO, L., CABALLERO, F. y VIEGAS, D. X. (2007): Sistema basado en el empleo de Vehículos Aéreos no Tripulados para la Lucha contra Incendios Forestales. IV Conferencia Internacional sobre Incendios Forestales, Op. Cit.
- GONZALO, J., CRUZ J. M. y DOMÍNGUEZ, I. (2007): Plataformas Aerostáticas para la Monitorización de incendios. IV Conferencia Internacional sobre Incendios Forestales, Op. Cit.
- INSA (2007): Ingeniería y Servicios Aeroespaciales, S.A. 2007. <http://www.insa.es>
- GONZALO, J., MARTÍNEZ, S. y MARTÍN, G. (2004): REMFIRESAT, Gestión de Emergencias en Tiempo Real Para Servicios de Lucha Contra Incendios Forestales Vía Satélite. Proceedings of the 2nd International Symposium on Fire Economics, Planning and Policy: A Global View. Córdoba, 19-22 de Abril de 2004.
- GONZALO, J., MARTÍN DE MERCADO, G., LORENZ, E., OERTEL, D., CASANOVA, J. L., AGUIRRE, M., LEIBRANDT, W. y BILLIG, G. (2005): Demonstration of a Semi-Operational FIRE Recognition Service Using BIRD Microsatellite. Proceedings of the 5th IAA Symposium on Small Satellites for Earth Observation, Berlin (Alemania). 4-8 de abril de 2005.
- SHUAI YUN, CHONGCHENG CHEN, JIANWEI LI y LIYU TANG (2011): Wildfire spread simulation and visualization in virtual environments. Spatial Data Mining and Geographical Knowledge Services (ICSDM), 2011 IEEE International Conference on, vol., no., pp.315-319, June 29 2011-July 1 2011.
- XUEFENG YAN, FENG GU, XIAOLIN HU y SONG GUO. (2009): A dynamic data driven application system for wildfire spread simulation. Simulation Conference (WSC), Proceedings of the 2009 Winter, vol., no., pp.3121-3128, 13-16 Dec. 2009.
- JAKOVCEVIC, T., BRAOVIC, M., STIPANICEV, D. y KRSTINIC, D. (2011): Review of wildfire smoke detection techniques based on visible spectrum video analysis. Image and Signal Processing and Analysis (ISPA). 7th International Symposium on, vol., no., pp.480-484, 4-6 Sept. 2011.
- PASTOR, E., ÁGUEDA, A., ANDRADE-CETTO, J., MUÑOZ, M., PÉREZ, Y. y PLANAS, E. (2006): Computing the Rate of Spread of Linear Flame Fronts by Thermal Image Processing. Fire Safety Journal. Elsevier, vol. 41, Issue 8, pp. 569-579. Nov 2006.
- PARKER, S., SHIRLEY, P., LIVNAT, Y., HANSEN, C. y SLOAN, P. (1998): Interactive ray tracing for isosurface rendering. Visualization '98, Proceedings. IEEE Conference on, pp. 233-238, ISSN: 1070-2385. USA, Oct. 1998. (DOI: 10.1109/VISUAL.1998.745713).