

# Estudio preliminar del registro de alta precisión de imágenes multitemporales de observación terrestre

Daniel Fuentes<sup>1,2</sup>, Álvaro Ordóñez<sup>1,2</sup>, Dora B. Heras<sup>1,2</sup> y Francisco Argüello<sup>2</sup>

**Resumen**— El creciente uso de varias imágenes multidimensionales de teledetección para una misma zona geográfica con el objetivo de realizar procesos de observación terrestre hace imprescindible realizar un alineamiento previo de dichas imágenes. El alineamiento, conocido también como registro, consiste en, dadas dos imágenes, explotar la información espacial y espectral de la zona capturada para obtener la transformación geométrica que permita alinear una imagen respecto de la otra. En este artículo se propone un análisis previo del registro de alta precisión de imágenes multitemporales basado en la combinación de métodos ya existentes en la literatura. Se realizará sobre imágenes multiespectrales de alta resolución espacial capturadas en diferentes fechas. Las imágenes presentan diferentes condiciones de captura tanto lumínicas como de inclinación que suponen un reto en cuanto a su registro. Mediante una evaluación sistemática de los métodos disponibles en la literatura seleccionamos los más adecuados para ser aplicados de manera consecutiva. Se mide la calidad del registro mediante la evaluación de su precisión, la robustez ante solapamientos de imágenes y el tiempo de ejecución. Finalmente se selecciona la combinación de métodos que proporciona la más alta precisión de registro.

**Palabras clave**— Registro de imágenes, multiespectral, multitemporal, teledetección, dron

## I. INTRODUCCIÓN

EN los últimos años, el desarrollo tecnológico de espectrómetros ha impulsado el uso de imágenes multiespectrales en una amplia variedad de aplicaciones de observación terrestre. Ejemplo de ello son la agricultura [1] o la protección medioambiental de espacios naturales [2], aplicaciones para las que es común emplear drones con sensores espectrales capaces de capturar la información de reflectancia en múltiples bandas del espectro electromagnético.

Las tareas de preprocesamiento, como el registro, son un paso necesario tanto para construir imágenes más grandes a partir de porciones como para superponer imágenes de la misma zona geográfica. El registro o alineamiento de imágenes multiespectrales consiste en alinear dos imágenes capturadas de la misma zona, aprovechando para ello tanto la información espacial como la espectral [3]. Para realizar este alineamiento será necesario obtener las transformaciones geométricas que permitan rotar, escalar y desplazar una respecto de la otra.

El registro de imágenes se ve afectado por diferentes factores [4]. Entre ellos podemos destacar la altura a la que se capturan las imágenes, las condiciones de luz o el tipo y la calibración de los sensores empleados. Adicionalmente, las características del terreno que variarán dependiendo de si las imágenes se capturan en diferentes estaciones del año, o si corresponden a un año de sequía o de abundantes lluvias, así como si hay cambios en la vegetación o en las infraestructuras, también afectarán al alineado.

Los algoritmos de registro de imágenes pueden ser categorizados en métodos basados en detección de características y métodos basados en área [5]. Los basados en características identifican puntos o regiones distintivas en las imágenes a registrar para luego emparejarlos y poder calcular la transformación geométrica que alinee una imagen con la otra. Los métodos basados en área comparan directamente las intensidades o valores de los píxeles empleando técnicas de correlación, como la transformada de Fourier, o minimizando una función de pérdida.

En la literatura podemos encontrar métodos de ambos tipos ya adaptados para aprovechar toda la información espectral presente en imágenes multiespectrales o hiperespectrales para alinear pares de imágenes hiperespectrales de baja resolución espacial. Ejemplos de los métodos basados en detección de características adaptados para este propósito son Hyperspectral-KAZE (HSI-KAZE) [6], que detecta puntos característicos, y Hyperspectral-MSER (HSI-MSER) [7], que define regiones comunes entre las imágenes que se registran. De entre los basados en área destaca el método Hyperspectral Fourier-Mellin (HYFM) [8] por su baja carga computacional.

Los métodos anteriores han sido probados sobre imágenes hiperespectrales con grandes diferencias de escala. En este trabajo, se analiza su aplicación a imágenes multisensor para las que se persigue una muy alta precisión de registrado. Se aplicarán a imágenes compuestas que se generan al combinar y alinear múltiples imágenes aéreas de menor tamaño capturadas a bordo de un dron y que, por tanto, presentan gran resolución espacial. Las imágenes objeto de estudio han sido capturadas sobre ecosistemas fluviales gallegos durante los años 2019, 2023 y 2024.

Para abordar esta tarea, se propone la aplicación acumulativa de métodos que consiste en realizar un registro inicial, seguido de un registro de ajuste que se analizarán para diferentes tamaños de las imágenes y desde la perspectiva de tiempo de computación.

<sup>1</sup>Centro Singular de Investigación en Tecnologías Inteligentes (CiTIUS), Universidad de Santiago de Compostela, e-mail: {daniel.fuentes.rodriguez, alvaro.ordonez,dora.blanco}@usc.gal.

<sup>2</sup>Departamento de Electrónica e Computación, Universidad de Santiago de Compostela, e-mail: francisco.arguello@usc.gal.

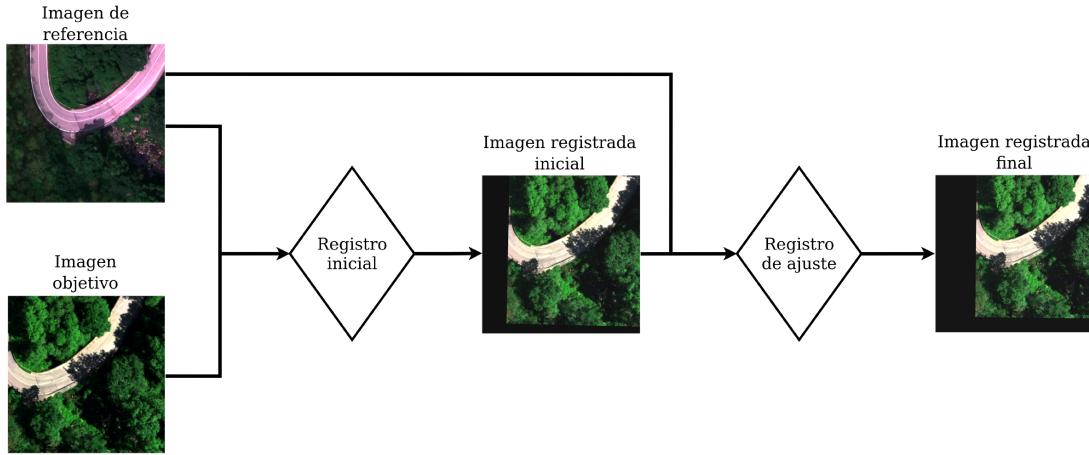


Fig. 1: Diagrama de flujo de la combinación de métodos de registro propuesto en este trabajo.

## II. COMBINACIÓN DE MÉTODOS DE REGISTRO

Para la resolución del problema planteado se propone un proceso de registro en varias pasadas tal y como se muestra en la Figura 1. El objetivo es obtener las transformaciones de rotación, escala y desplazamiento que permitan alinear la imagen objetivo respecto de la imagen de referencia, tal como se ilustra en la figura. Más en detalle, se realiza un registro inicial del que se obtiene una primera transformación, la cual es refinada por el registro de ajuste considerando siempre la misma imagen de referencia. Se seleccionará la combinación de métodos que produzca la más alta precisión de registro combinada.

Para cada nivel del proceso propuesto se han evaluado tanto métodos basados en características como métodos basados en área. Se seleccionará la combinación de métodos que produzca la más alta precisión de registro combinada. Como método representativo de detección de características se ha seleccionado el método **HSI-KAZE** debido a su robustez probada en la literatura para el registro de imágenes hiperespectrales de satélite [6]. Este método se basa en la detección de puntos característicos entre las imágenes a registrar. Fue diseñado para lidiar con condiciones extremas donde existan grandes diferencias de escala, rotación y desplazamiento.

A diferencia de los métodos basados en características, los métodos basados en área trabajan directamente con la intensidad de los píxeles y son menos costosos a nivel computacional. Sin embargo son más sensibles a cambios o diferencias entre las imágenes. Los métodos basados en área se pueden clasificar a su vez en métodos basados en la transformada Fourier y métodos de optimización [5]. Los métodos basados en la transformada de Fourier emplean dicha transformada para calcular eficientemente la correlación entre las imágenes a registrar, mientras que los métodos de optimización buscan minimizar una medida de disparidad entre las imágenes. Los métodos basados en área que se han probado en este trabajo son los siguientes:

- **HYFM** [8]: método basado en el algoritmo Fourier-Mellin [9], que emplea la transformada

rápida de Fourier (FFT) para el cómputo eficiente de la correlación de las imágenes a registrar. Ha sido también diseñado para explotar eficientemente la información espectral.

- **Elastix** [10]: se trata de un conjunto de métodos de registro basados en la optimización de una función de pérdida para el alineamiento de resonancias magnéticas cerebrales u otro tipo de imágenes donde se pretenda corregir distorsiones locales. Por esta razón, este método es utilizado en la etapa de ajuste. A diferencia de los anteriores, Elastix solo emplea una banda espectral de las imágenes que se registran.

## III. RESULTADOS

En esta sección se describen el hardware, el software y las imágenes utilizadas en los experimentos, las métricas empleadas y los resultados obtenidos en términos de precisión del registro y tiempo de ejecución para la combinación de métodos empleada.

### A. Condiciones experimentales

El equipo hardware empleado para la experimentación es un ordenador personal con un procesador Intel Core i7 9700k, 32 GB de RAM y tarjeta gráfica NVIDIA GeForce 3050 con 8 GB de VRAM. HSI-KAZE y HYFM hacen uso de la tarjeta gráfica al estar programados en CUDA.

En cuanto al software, el sistema operativo del ordenador es Ubuntu 22.04.5 LTS y se ha empleado la versión de CUDA 12.6 con gcc y g++ en la versión 11.4 para la compilación de HSI-KAZE y HYFM. Elastix, en su versión 5.2.0, se ha utilizado a través de su wrapper PyElastix 3.12.2. Se ha empleado también un software propio del grupo de investigación para la visualización y manipulación de imágenes hiperespectrales y multiespectrales denominado Htools en su versión 303.

Por otro lado, los métodos empleados en este trabajo han necesitado de un ajuste de parámetros para adaptarlos a las características específicas de las imágenes empleadas y para optimizar su rendimiento. Los parámetros de configuración son comunes a

todas las imágenes registradas. En la Tabla I se muestra la configuración elegida para cada uno de los métodos. En el caso de HSI-KAZE se han ajustado dos parámetros: el umbral de emparejamiento y el escalado inicial. El umbral de emparejamiento es el parámetro que determina si dos puntos característicos, uno de cada una de las imágenes, corresponden al mismo punto [6]. Se han probado valores desde 0,65 a 0,85 con un paso de 0,05 y se ha seleccionado este valor ya que es para el cual se obtiene un mayor número de emparejamientos correctos para este tipo de imágenes. El escalado inicial es el factor de escala aplicado por HSI-KAZE para realzar elementos espaciales diferenciadores de las imágenes y obtener así un mayor número de puntos característicos.

En HYFM se ha ajustado el número de componentes principales que el algoritmo selecciona en su etapa de preprocesado. Se han realizado pruebas con un número de 2, 3, 4 y 5 componentes, seleccionando finalmente 5 al obtener mejores resultados.

Por último, el ajuste realizado para Elastix consiste en la selección de la banda multiespectral sobre la cual el método realizará el registro. Hemos observado que la mejor opción era utilizar la banda de infrarrojo cercano ya que ofrece los mejores resultados en términos de precisión de registro.

### B. Características de las imágenes

En este trabajo se han empleado dos conjuntos de imágenes de ecosistemas fluviales de ríos gallegos. Se trata de imágenes compuestas, generadas a partir de múltiples fotografías aéreas parcialmente superpuestas, unidas y alineadas, que crea un mapa detallado y, sin distorsiones geométricas. En la Figura 2 se presenta una composición RGB de dichas imágenes compuestas.

Estas imágenes fueron capturadas en la misma localización pero en distintos años como se indica en sus nombres y con diferentes sensores. Han sido capturadas con el objetivo de monitorizar la situación respecto a la presencia de especies vegetales invasoras y la construcción de estructuras artificiales.

Las imágenes tomadas en 2019 fueron obtenidas mediante un sensor multiespectral MicaSense RedEdge-MX [11], montado en un dron que capturaba el territorio a 120 metros de altitud. Este sensor captura cinco bandas espectrales correspondientes a las longitudes de onda de 475nm (azul), 560nm (verde), 668nm (rojo), 717nm (borde rojo) y 842nm (infrarrojo cercano) con una resolución espacial de 8,2 cm/píxel.

Por otro lado, las imágenes capturadas en 2023 y 2024, fueron capturadas con un sensor MicaSense Altum, montado de nuevo sobre un dron a 120 metros de altitud y con una resolución espacial de 5,2 cm/píxel. Este sensor captura 6 bandas espectrales, añadiendo un sensor térmico con una longitud de onda de 11  $\mu\text{m}$  respecto de la cámara de 2019. Esta nueva banda es despreciada dado que el primer conjunto no cuenta con ella.

De entre las imágenes de 2019 se seleccionaron dos

denominadas Eiras y Oitavén. El nombre de Oitavén viene asociado al río que se observa en la imagen y Eiras es el nombre del embalse que se puede observar en la imagen del mismo nombre. Sin embargo, se trabajará con 4 parejas de imágenes ya que Eiras ha sido obtenida mediante 3 vuelos en 2024, tal como se observa en la Figura 2.

Se presentan a continuación las características de cada imagen:

- **Oitavén:** El territorio capturado en estas imágenes cuenta con gran cantidad de árboles compuesta por eucalipto y pinos acompañada del río como elemento principal, con diferentes secciones de rápidos y zonas rocosas. Se añaden como elementos artificiales un conjunto de carreteras a la izquierda de los mosaicos y una edificación de teja en la zona central. La imagen capturada en 2019 es de tamaño  $14.662 \times 6.000$  píxeles frente a la segunda, que fue capturada en 2023 de tamaño  $30.525 \times 12.058$  píxeles.
- **Eiras vuelo 1:** En estas imágenes predominan las pronunciadas pendientes que rodean la cuenca del río, con ciertas agrupaciones de árboles conforme nos acercamos al embalse (a la derecha en las imágenes). También se puede ver a lo largo de la zona un extenso conducto de agua en paralelo al río. La imagen de 2019, cuenta con un tamaño de  $7.220 \times 3.400$  píxeles. El tamaño de la imagen de 2024 es de  $16.730 \times 6.510$  píxeles.
- **Eiras vuelo 2:** Al ser la continuación de la anterior pareja imágenes, la composición de elementos es muy similar. La imagen de 2019 cuenta con un tamaño de  $7.700 \times 3.400$  píxeles frente a la de 2024, que cuenta con un tamaño de  $17.325 \times 7.572$  píxeles.
- **Eiras vuelo 3:** En esta pareja de imágenes se observa la frondosidad de árboles y la gran cantidad de obstáculos rocosos en el río, además de la continuación de los conductos y un camino de tierra en paralelo a estos. La imagen de 2019 es de  $6.700 \times 4.776$  píxeles frente a la imagen de 2024 que cuenta con un tamaño de  $14.984 \times 11.145$ .

La Figura 3 muestra tres ejemplos de parejas de imágenes utilizadas en los experimentos, que corresponden a recortes de diferentes tamaños extraídos de las imágenes de la Figura 2. Estos recortes se han realizado en zonas que incluyen elementos destacados visualmente, tratando de representar la variabilidad de las escenas. Queremos probar si la transformación obtenida para registrar los recortes es de aplicación global para toda la imagen o si se debe realizar un registro a trozos o flexible debido a distorsiones locales. Se registrarán los recortes (a) y (d), (b) y (e) y, finalmente, (c) y (f). En total se ha trabajado con un total de 18 pares de recortes.

### C. Métricas

Para evaluar la precisión de los diferentes métodos de registro en cada una de las etapas del proceso de

Tabla I: Configuración de los diferentes métodos de registro.

Método	Parámetros	Valor
HSI-KAZE	Umbral de emparejamiento	0,65
	Escalado inicial	$\times 2$
HYFM	Nº de componentes principales	5
Elastix	Banda multiespectral seleccionada	Infrarrojo cercano

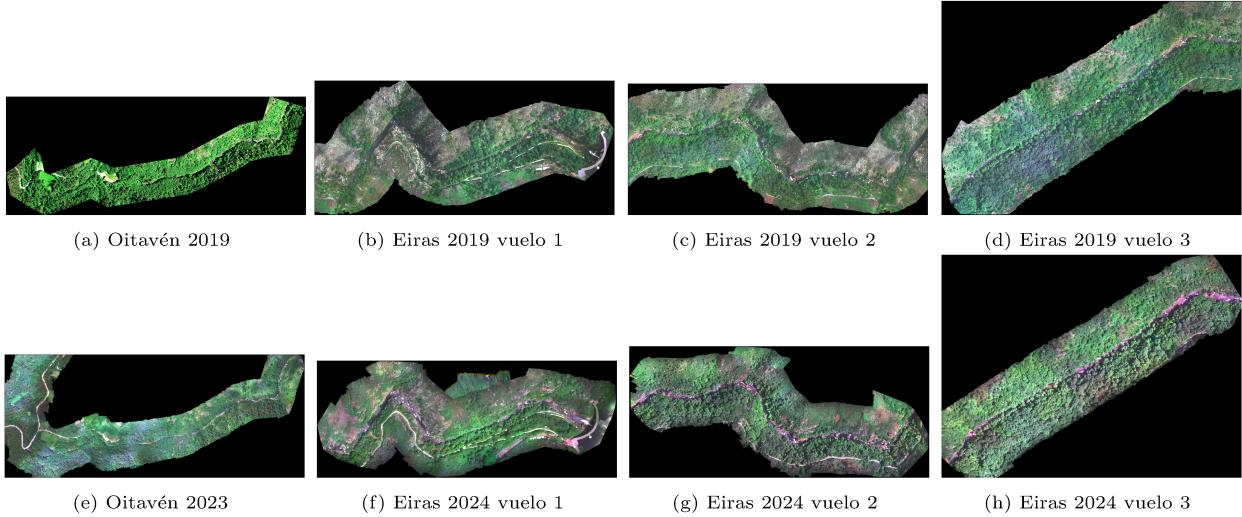


Fig. 2: Composición RGB de las imágenes empleadas en la fase de experimentación.

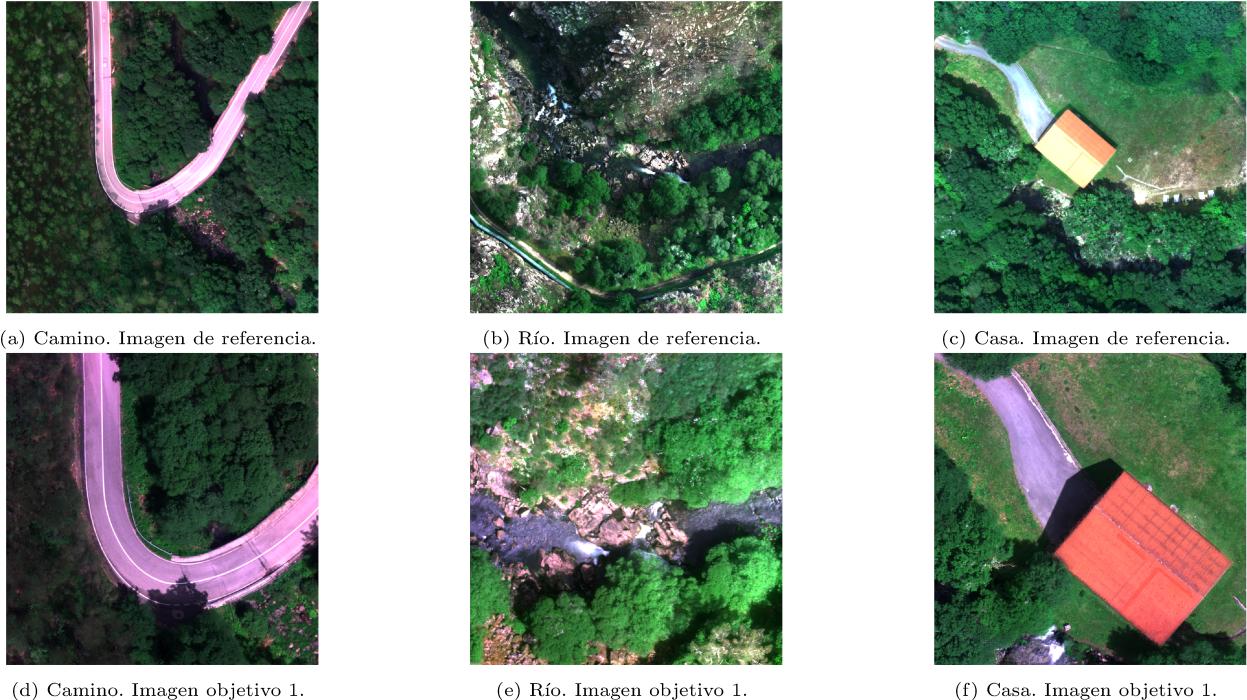


Fig. 3: Composición a color de algunas de las imágenes recortadas con las que se ha realizado la experimentación.

registro acumulativo se ha optado por una evaluación visual de la calidad del alineamiento obtenido. Se ha establecido una escala de valoración sobre la que hemos etiquetado cada imagen registrada en función de si el resultado es correcto, ligeramente impreciso, impreciso o incorrecto tal y como se puede ver en el ejemplo de la Figura 4. Los resultados correctos son aquellos donde el registro es coincidente en escala, rotación y desplazamiento, logrando un solapamiento exacto entre ambas imágenes. En los resultados

ligeramente imprecisos el registro presenta pequeños errores en escala, rotación o desplazamiento respecto de los valores correctos (los que proporcionan una superposición total visualmente). En cambio, en los registros imprecisos se observan errores mayores. En este último caso el algoritmo ha corregido parte de las diferencias de escala, rotación y desplazamiento pero las imágenes están lejos de solapar correctamente. Los resultados incorrectos son registros con grandes errores en escala, rotación y desplazamiento respecto

de los valores correctos. Este método de clasificación visual nos permitirá determinar la robustez de los métodos evaluados.



Fig. 4: Ejemplos de valoración visual de la calidad del registro.

Además de la precisión de registro, se medirá el tiempo de ejecución, incluyendo la lectura de las imágenes de disco, para cada uno de los métodos. Esta métrica se obtendrá como el promedio de 10 ejecuciones.

#### D. Experimentación y resultados

Para evaluar la robustez de los métodos seleccionados en cada etapa se han realizado una serie de experimentos. Empezando por el registro inicial, se han realizado dos experimentos: variando los tamaños de cada par de imágenes que se quiere registrar y variando el porcentaje de solapamiento entre ellas.

El primer experimento tiene como objetivo analizar cómo el tamaño de los recortes extraídos de las imágenes influye en el proceso de registro. Para ello, se emplea un conjunto de recortes de los siguientes tamaños:  $500 \times 500$ ,  $600 \times 600$ ,  $800 \times 800$ ,  $1000 \times 1000$  y  $1200 \times 1200$ . Estos se extraen de las imágenes correspondientes a la misma zona: las imágenes de referencia fueron capturadas en 2019, mientras que las imágenes objetivo fueron capturadas en 2023 o 2024.

En la Tabla II se muestran los resultados en términos de precisión y tiempo de ejecución requeridos para cada tamaño de imagen. Los resultados para cada tamaño son el resultado de promediar 10 ejecuciones. Se puede observar para ambos métodos, HSI-KAZE y HYFM, cómo el aumento del tamaño de los recortes produce un aumento del tiempo de ejecución debido a que es necesario procesar un mayor número de píxeles con componentes en todas las bandas. El tiempo requerido por el método HYFM depende solamente de las resoluciones espaciales y espectrales de los recortes a registrar ya que se basa en el cómputo de la correlación entre ellos que es computada de manera muy eficiente computacionalmente gracias a la FFT. Por el contrario, los métodos basados en características, como HSI-KAZE, dependen también del número de características detectadas. A

mayor tamaño de las imágenes, mayor número de características se detectarán y, por lo tanto, mayor tiempo de computación se consumirá.

En cuanto a la precisión, esta se mide como el porcentaje de resultados clasificados como correctos respecto al total de imágenes de prueba. Se puede observar en la Tabla II que la precisión de HSI-KAZE se incrementa al aumentar el tamaño de las imágenes, excepto para el último tamaño de  $1200 \times 1200$ . Este descenso se debe a que HSI-KAZE escala las imágenes al inicio para construir un escala-espacio mediante divisiones sucesivas por 2 [6]. Para el tamaño  $1200 \times 1200$ , será necesario expandir la imagen hasta el tamaño inmediatamente superior que sea potencia de 2, es decir, a  $2048 \times 2048$  píxeles. Esto implica llenar los bordes con  $848 \times 848$  píxeles, aproximadamente un 40 % de la imagen total, lo que introduce información redundante que afecta a la precisión de registro. En el caso de HYFM no se observa una mejora en precisión al aumentar el tamaño.

Ambos métodos consiguen los mejores resultados en calidad de registro con recortes de tamaño  $1000 \times 1000$ , aunque HSI-KAZE registra correctamente un 83,33 % de los casos mientras que HYFM solo el 58,33 %. Sin embargo, HYFM requiere de 0,38 segundos de media frente a los 46,59 segundos requeridos por HSI-KAZE para ese tamaño.

Para evaluar robustez de los algoritmos frente a diferentes niveles de solapamiento entre las imágenes a registrar se ha realizado otro conjunto de experimentos. Dado que las imágenes capturadas en 2023 y 2024 tienen una resolución aproximadamente del doble que las de 2019, se les aplica un proceso de reducción de escala para igualar su resolución. Este ajuste previo, realizado manualmente, asegura que las imágenes estén alineadas en términos de escala, permitiendo controlar en condiciones de laboratorio el porcentaje de solapamiento entre ellas. Esto permite analizar cómo la reducción del área común entre las imágenes afecta a la precisión del registro.

Para este experimento se utilizan imágenes de tamaño  $1000 \times 1000$ , ya que este tamaño mostró mejores resultados en el experimento anterior. El porcentaje de solapamiento se varía de manera controlada en ambos ejes, vertical y horizontal, evaluando solapamientos que van desde el 100 % hasta el 70 % con un salto de 10 %, como se puede ver en la Figura 5.

La Tabla III muestra para cada nivel de solapamiento el porcentaje de registros categorizados según el nivel de precisión obtenido (correctos, lig. imprecisos, imprecisos e incorrectos). Podemos ver que la precisión disminuye en ambos métodos a medida que se reduce el solapamiento entre imágenes. En HSI-KAZE, la reducción es moderada, con una caída máxima del 4 %, mientras que en HYFM alcanza el 57 %. Esto se debe a que HYFM, al ser un método basado en área, necesita de una mayor superposición entre las imágenes para calcular la correlación entre ellas. HYFM supera ligeramente a HSI-KAZE en precisión con un solapamiento del 100 % y consigue

Tabla II: Resultados de precisión y tiempos de ejecución del registro inicial para diferentes tamaños de imágenes. Valores promedio para todas las imágenes.

Método	Tamaño	Tiempo (s)	Precisión (%)
HSI-KAZE	500 × 500	3,57	66,67
	600 × 600	10,67	72,22
	800 × 800	25,68	75,00
	1000 × 1000	46,59	83,33
	1200 × 1200	115,82	66,67
HYFM	500 × 500	0,12	50,00
	600 × 600	0,37	41,67
	800 × 800	0,37	41,67
	1000 × 1000	0,38	58,33
	1200 × 1200	1,44	41,67

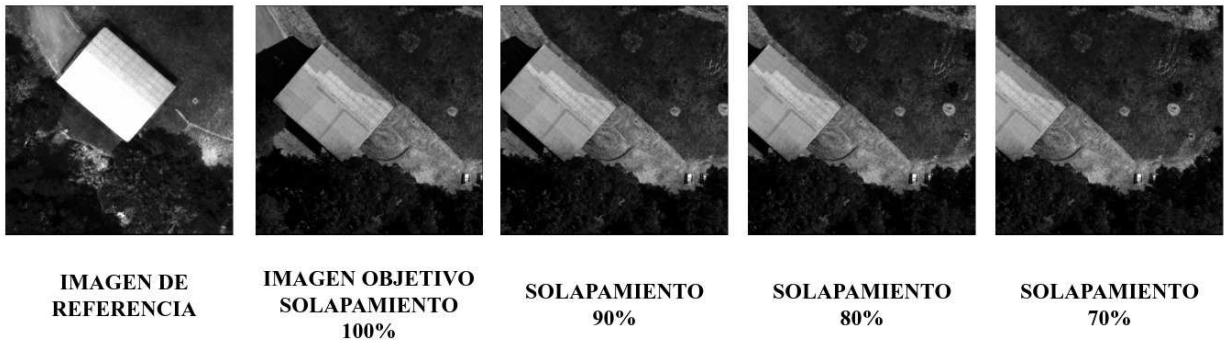


Fig. 5: Imagen de referencia y recortes con diferentes niveles de solapamiento de la imagen objetivo .

Tabla III: Comparación de resultados promedio de precisión de registro inicial para dos métodos de registro al variar el solapamiento de las imágenes. Se parte de imágenes de tamaño 1000 × 1000. Se aplica previamente un escalado de 2× a las imágenes objetivo.

Método	Precisión	Solapamiento			
		100 %	90 %	80 %	70 %
HSI-KAZE	Correctos (%)	88,89	86,11	88,89	84,72
	Lig. Imprecisos (%)	5,56	11,11	8,33	9,72
	Imprecisos (%)	5,56	2,78	2,78	4,17
	Incorrectos (%)	0,00	0,00	0,00	1,39
HYFM	Correctos (%)	94,44	86,11	76,39	37,50
	Lig. Imprecisos (%)	0,00	0,00	0,00	0,00
	Imprecisos (%)	0,00	4,17	9,72	8,33
	Incorrectos (%)	5,56	9,72	13,89	54,17

iguales resultados con 90 %, esto es debido a que la escala ha sido previamente corregida para este experimento. En condiciones reales, como las mostradas en la Tabla III, HSI-KAZE ha demostrado ser más robusto.

Para la fase de registro de ajuste las imágenes, tomadas como objetivo, serán refinadas mediante un nuevo proceso de registro frente a la imagen de referencia, según el esquema mostrado en la Figura 1. Como imágenes objetivo se seleccionaron las ya registradas con HSI-KAZE en el experimento de tamaños (Tabla II). El conjunto de prueba de este experimento incluye los resultados clasificados por HSI-KAZE como correctos, ligeramente imprecisos e imprecisos, descartándose los incorrectos.

La Tabla IV presenta los resultados obtenidos tras la etapa inicial de registro con HSI-KAZE y tras el registro de ajuste empleando los métodos HSI-KAZE,

HYFM y Elastix. Se muestran los porcentajes de registros clasificados según su precisión (correctos, ligeramente imprecisos, imprecisos e incorrectos), así como el tiempo promedio de ejecución para cada método. Los resultados muestran el beneficio de realizar en segundo nivel de registro de ajuste, ya que todos los métodos consiguen mejorar la precisión obtenida tras la etapa inicial con HSI-KAZE. En particular, tras el registro de primer nivel que proporciona un 70 % de registros correctos, el registro de ajuste permite llegar al 81,53 %. HYFM logra el mayor porcentaje de registros correctos (81,53 %) con el menor tiempo de ejecución (0,45 s), mientras que Elastix, con un resultado similar (81,15 %) destaca por reducir el porcentaje de registros clasificados como imprecisos al 2,91 %, pero con un tiempo superior a HYFM. Se selecciona por lo tanto HYFM como método idóneo para la etapa de registro de ajuste.

Tabla IV: Comparación de resultados entre el registro inicial realizado con HSI-KAZE y la combinación de métodos aplicando registro inicial y registro de ajuste utilizando HSI-KAZE, HYFM y Elastix para un tamaño de  $1000 \times 1000$ .

	Reg. inicial	Reg. de ajuste		
		HSI-KAZE	HSI-KAZE	HYFM
Correcto (%)	70,00	79,34	81,53	81,15
Lig. Imp. (%)	11,67	5,11	2,92	5,94
Imprecisos (%)	8,33	5,55	5,55	2,91
Incorrectos (%)	10,00	10,00	10,00	10,00
Tiempo (s)	49,79	12,77	0,45	10,32

Tras la experimentación realizada, los mejores resultados en precisión de registro se obtienen aplicando un registro inicial con HSI-KAZE, seguido de HYFM como método para el registro de ajuste.

#### IV. CONCLUSIONES

En este artículo se propone una solución inicial al problema de registro de pares de imágenes multiespectrales multitemporales de alta resolución espacial. Dichas imágenes, tomados en distintos años, suponen un reto debido a la variabilidad tanto de condiciones de captura de las imágenes (sensores, vuelo, condiciones ambientales, entre otros) como relacionadas con cambios en el terreno cuya reflectancia es capturada. Es por ello que se analiza una combinación de métodos formada por un registro inicial y un segundo registro de ajuste que mejore los resultados del primero.

El esquema propuesto ha sido probado sobre recortes de imágenes capturadas en 2019, 2023 y 2024 mediante diferentes sensores multiespectrales MicaSense sobre cuencas fluviales, explorando diferentes tamaños de imagen y grados de solapamiento entre ellas. Se analizaron los métodos HSI-KAZE y HYFM, seleccionados por su capacidad para manejar imágenes hiperespectrales multitemporales, y el método Elastix, por su robustez en la corrección de distorsiones locales. La comparación entre estos métodos se ha realizado tanto en términos de precisión del registro, basada en una evaluación visual, como en términos de tiempo de ejecución.

Se identificó que la combinación de HSI-KAZE como método de registro inicial y HYFM como método de registro de ajuste ofrece los mejores resultados en términos de precisión. HSI-KAZE destaca por su robustez ante distintos grados de solapamiento entre las imágenes que se registran. Por su parte, en cuanto al registro de ajuste es HYFM el que presenta los mejores resultados de precisión de registro además de un bajo coste computacional. En conjunto, esta combinación de métodos basada en una primera pasada de HSI-KAZE y un ajuste mediante HYFM permite realizar un registro eficiente y preciso, alcanzando un nivel de precisión promedio para diferentes imágenes del 81,53 %.

Como trabajo futuro se propone implementar a partir de la técnica presentada en este trabajo un método automático capaz de registrar con mayor precisión imágenes de gran tamaño. En particular, se trabajará con imágenes multiespectrales de alta re-

solución a partir de la composición de capturas realizadas mediante sensores a bordo de dron.

El registro en condiciones reales deberá aplicarse sobre un alto número de secuencias de pares imágenes. Por ello es muy relevante que se realice en la mejor cantidad de tiempo posible. Se propone, por tanto, la exploración de implementaciones paralelas que permitan reducir el tiempo de computación del esquema de registrado propuesto. En dicho esquema el método HSI-KAZE presenta una gran eficiencia en términos de precisión en el registro inicial, pero su tiempo de ejecución es alto y dependiente de los elementos contenidos en la imagen.

#### AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo ha sido financiado por MCIN/AEI/10.13039/50110001103 a través de los proyectos TED2021-130367B-I00 y PID2022-141623NB-I00 y por la Xunta de Galicia - Consellería de Educación, Ciencia, Universidades e Formación Profesional mediante las ayudas 2024-2027 ED431G-2023/04 (centro de investigación de Galicia) y ED431C-2022/16 (grupo de referencia competitiva). Estos proyectos han sido cofinanciados por FEDER (UE) y la Unión Europea NextGenerationEU/PRTR.

#### REFERENCIAS

- [1] Haboudane, Driss and Miller, John R and Pattey, Elizabeth and Zarco-Tejada, Pablo J and Strachan, Ian B, "Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: Modeling and validation in the context of precision agriculture," *Remote sensing of environment*, vol. 90, no. 3, pp. 337–352, 2004.
- [2] Quan, Yinghui and Zhong, Xian and Feng, Wei and Dauphin, Gabriel and Gao, Lianru and Xing, Mengdao, "A novel feature extension method for the forest disaster monitoring using multispectral data," *Remote Sensing*, vol. 12, no. 14, pp. 2261, 2020.
- [3] Lisa Gottesfeld Brown, "A survey of image registration techniques," *ACM Comput. Surv.*, vol. 24, no. 4, pp. 325–376, Dec. 1992.
- [4] Jacqueline Le Moigne, Nathan S Netanyahu, and Roger D Eastman, *Image registration for remote sensing*, Cambridge University Press, 2011.
- [5] Zitova, Barbara and Flusser, Jan, "Image registration methods: a survey," *Image and vision computing*, vol. 21, no. 11, pp. 977–1000, 2003.
- [6] Ordóñez, Álvaro and Argüello, Francisco and Heras, Dora B, "Alignment of hyperspectral images using KAZE features," *Remote Sensing*, vol. 10, no. 5, pp. 756, 2018.
- [7] Ordóñez, Álvaro and Acción, Álvaro and Argüello, Francisco and Heras, Dora B, "HSI-MSER: hyperspectral image registration algorithm based on MSER and SIFT," *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 14, pp. 12061–12072, 2021.

- [8] Ordóñez, Álvaro and Argüello, Francisco and Heras, Dora B, “Fourier–Mellin registration of two hyperspectral images,” *International Journal of Remote Sensing*, vol. 38, no. 11, pp. 3253–3273, 2017.
- [9] Guo, Xiaoxin and Xu, Zhiwen and Lu, Yinan and Pang, Yunjie, “An application of Fourier-Mellin transform in image registration,” in *The Fifth International Conference on Computer and Information Technology (CIT'05)*. IEEE, 2005, pp. 619–623.
- [10] Klein, Stefan and Staring, Marius and Murphy, Keelin and Viergever, Max A and Pluim, Josien PW, “Elastix: a toolbox for intensity-based medical image registration,” *IEEE transactions on medical imaging*, vol. 29, no. 1, pp. 196–205, 2009.
- [11] AgEagle Sensor Systems Inc., d/b/a MicaSense, “Re-dEdge-MX — MicaSense,” En línea; consultado el 23 de junio de 2024.