



**Universidad**  
Zaragoza

## Trabajo Fin de Máster

TÉCNICAS DE VISIÓN POR COMPUTADOR PARA  
APLICACIONES DE REALIDAD AUMENTADA EN  
EXTERIORES

COMPUTER VISION TECHNIQUES FOR  
OUTDOOR AUGMENTED REALITY  
APPLICATIONS

Autor

Juan Olarte Martínez

Director

Carlos Orrite Uruñuela

Titulación

Máster Universitario en Ingeniería Electrónica

Escuela Universitaria de Ingeniería y Arquitectura  
Universidad de Zaragoza

Año 2021

# Técnicas de visión por computador para aplicaciones de realidad aumentada en exteriores

## RESUMEN

La generación eficiente de puntos clave a partir de imágenes es un problema estudiado en la literatura y que constituye la base de muchas aplicaciones de visión por ordenador. A pesar de la gran cantidad de literatura que aborda este tema, sigue siendo un asunto desafiante para lograr resultados de coincidencias estables y válidos en situaciones complejas, como puede ser, enfrentamientos con variación de iluminación, cambios de escala y forma, ruido de fondo, cambio de traza debido al movimiento de una cámara, oclusiones parciales en la imagen, etc.

En este proyecto final de máster, se propone un nuevo análisis de correspondencias de puntos, basado en la triangulación Delaunay entre los puntos clave. Conformando un grafo de atributos, en el que cada nodo corresponde a un punto clave proporcionado por un detector de características, que tiene un descriptor asignado. Este gráfico piramidal se descompone posteriormente en diversos subgrafos, facilitando el emparejamiento, optimización de costes y subsanando problemas de oclusiones de objetos.

Cabe destacar, que todos los algoritmos desarrollados e implementados han sido evaluados y verificados en ambientes exteriores a través de una base de datos, con el principal objetivo de que las nuevas técnicas filtradas aseguren que los emparejamientos sean más robustos y confiables ante los diversos problemas que se presentan en la actualidad.

## Índice

|  |    |
|--|----|
| RESUMEN .....  | 1  |
| 1. Introducción .....  | 4  |
| 1.1. Antecedentes .....  | 4  |
| 1.2. Objetivo .....  | 4  |
| 1.3. Visión artificial .....   | 5  |
| 1.4. Detección de características .....                              | 5  |
| 1.5. Extracción de descriptores .....                                | 6  |
| 1.6. Emparejamiento de puntos de interés por descriptores .....      | 6  |
| 1.7. Filtrado de coincidencias .....                                 | 7  |
| 1.8. Metodología y problemas abordados .....                         | 8  |
| 1.9. Medios de trabajo .....   | 9  |
| 1.9.1. Lenguajes de programación .....                               | 9  |
| 1.9.2. OpenCV.....   | 9  |
| 1.9.3. Base de datos .....   | 9  |
| 2. Puntos característicos y descriptores en entornos exteriores..... | 10 |
| 2.1. Algoritmos de detección y descriptores empleados.....           | 10 |
| 2.1.1. Detector FAST.....  | 10 |
| 2.1.2. Detector ORB.....   | 11 |
| 2.1.3. Detector GFTT .....   | 12 |
| 2.1.4. Detector AGAST.....   | 12 |
| 2.1.5. Detector MSER .....   | 13 |
| 2.1.6. Detector BRISK .....  | 13 |
| 2.1.7. Detector A-KAZE.....  | 13 |
| 2.1.8. Detector SIFT .....   | 13 |
| 2.1.9. Detector SURF .....   | 13 |
| 2.2. Algoritmos de extracción de características .....               | 14 |
| 2.2.1. Descriptor BRIEF.....   | 14 |
| 2.2.2. Descriptor ORB .....  | 14 |
| 2.2.3. Descriptor FREAK.....   | 14 |
| 2.2.4. Descriptor BEBLID.....  | 14 |
| 2.2.5. Descriptor BRISK.....   | 14 |
| 2.2.6. Descriptor SIFT .....   | 15 |
| 2.2.7. Descriptor SURF.....  | 15 |

## Índice.

|   |    |
|---|----|
| 2.3. Emparejamiento de características.....   | 15 |
| 2.4. Resultados de los métodos de emparejamientos evaluados.....                            | 16 |
| 2.5. Combinación de algoritmos de detección y descriptores evaluados.....                   | 16 |
| 2.6. Resultados de los detectores y extractores evaluados .....                             | 16 |
| 3. Filtrado de correspondencias a través de triangulación y análisis multirresolución ..... | 18 |
| 3.1. Emparejamiento de puntos de interés por triangulación .....                            | 18 |
| 3.2. Extracción atributos de nodos .....  | 19 |
| 3.2.1. Segregación de triangulaciones .....   | 20 |
| 3.2.2. Atributo de dirección de nodo .....  | 20 |
| 3.2.3. Proceso de filtrado de atributos de nodo .....                                       | 22 |
| 3.3. Análisis multirresolución .....  | 24 |
| 3.3.1. Atributos gráficos .....   | 24 |
| 3.3.2. Grafo piramidal .....  | 25 |
| 4. Filtrado de coincidencias.....   | 27 |
| 4.1. Métodos de filtrado .....  | 27 |
| 4.2. Filtrado de coincidencias por atributo de nodos .....                                  | 28 |
| 4.3. Resultados entre algoritmos de filtrado .....  | 28 |
| 4.4. Pre-Filtrado puntos de interés .....   | 28 |
| 4.4.1. Pre-filtrado ángulos.....  | 28 |
| 4.4.2. Pre-filtrado áreas.....  | 28 |
| 4.4.3. Resultados de pre-filtrados .....  | 29 |
| 5. Resultados .....   | 31 |
| 6. Conclusiones.....  | 35 |
| Referencias.....  | 36 |
| Anexo A, Comparativa métodos emparejamiento por fuerza bruta .....                          | 38 |
| Anexo B, Evaluación de combinaciones de algoritmos de detección y descripción.....          | 39 |
| Anexo C, Direcciones invariantes.....   | 53 |
| Anexo D, Resultados entre algoritmos de filtrado.....                                       | 56 |
| Anexo E, Pre-filtrados implementados.....   | 67 |
| Anexo F, Incremento número emparejamientos.....   | 70 |
| Anexo G, Estudio y estructuración de la implementación de metodologías desarrolladas.....   | 71 |
| Anexo H, Resultados de las técnicas de visión en exteriores.....                            | 82 |

## 1. Introducción.

### 1. Introducción

#### 1.1. Antecedentes

En el grupo de Graphics and Imaging Lab de la Universidad de Zaragoza existe una línea de investigación en Realidad Aumentada (RA), que en los últimos años ha estado trabajando en un enfoque de RA aplicado a exteriores, más concretamente a la recuperación del patrimonio cultural oculto o perdido. Una notable aportación en este sentido constituye la visualización de la Torre Nueva sita en la Plaza San Felipe [25].



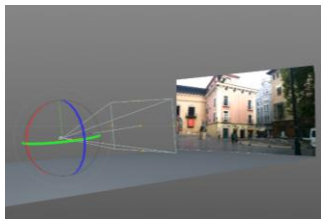
3D model of the lost asset



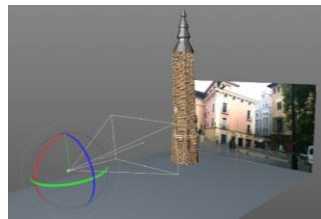
Real Scenario



Modelling the scenario



Geolocalization



Rendering in the cloud



Mobile application

Imagen 1. Aplicación de RA para la recuperación del patrimonio cultural perdido en la ciudad de Zaragoza.

Este desarrollo ha permitido por una parte, mostrar el potencial de las aplicaciones de RA en entornos urbanos y, por otra, detectar una serie de limitaciones y problemas que quedan por resolver.

Desde el punto de vista técnico, el principal problema en este trabajo es la estimación de la posición de una cámara a través de una imagen y poder presentar una imagen virtual superpuesta a la real.

#### 1.2. Objetivo

El proyecto tiene como objetivo el desarrollo y estudio de la viabilidad de un sistema de filtrado de coincidencias de características en imágenes mediante la visión por ordenador, y la evaluación de su funcionamiento. Con la principal meta de mejorar la fiabilidad de detección y la disminución del coste computacional en su implementación.

Para establecer esta viabilidad se ha realizado un estudio y comparación a diversos métodos presentes en la literatura en la obtención de puntos característicos o “keypoints” de manera eficaz y eficiente y de los métodos de filtrados presentes actualmente.

## 1. Introducción.

### 1.3. Visión artificial

En los últimos años hemos visto como se han incrementado los métodos para adquirir, procesar, analizar y comprender las imágenes con el principal objetivo de poder ser procesados por ordenadores.

En este campo de la inteligencia artificial se busca mediante lenguajes de programación, que un ordenador pueda ser capaz de la identificación y del procesamiento de tareas por el reconocimiento de ciertas características en imágenes.

Desde su creación, la visión artificial es un área de investigación con un constante crecimiento, ya que ha permitido el desarrollo de aplicaciones muy variadas en diversos ámbitos con aplicaciones de visión, detección de objetos, identificación, detección de movimiento y seguimiento de objetos.

El método de reconocimiento de objetos aplicado en este campo se basa en la extracción de puntos característicos y de sus descriptores.

### 1.4. Detección de características

La detección de características es un aspecto esencial en diversas aplicaciones de visión artificial, por lo que ha recibido una creciente atención en los últimos años.

El término “características” dentro del área de visión artificial y el procesamiento de imágenes hace referencia al conjunto de elementos visuales presentes en una imagen, escena u objeto, que pueden ser identificados en otras imágenes, obtenidas con variaciones angulares o cambios en iluminación. Por lo que la detección de características consiste en mostrar sobre la imagen la posición de los elementos visuales, para poder con ello posteriormente proceder a una segunda etapa de extracción de descriptores sobre cada característica presente.

La detección de puntos de interés corresponde a la primera etapa durante el procesamiento de una imagen, en la siguiente imagen 2, se pueden ver representadas las características presentes obtenidas mediante el detector FAST (Features from Accelerated Segment Test)[1].



Imagen 2: Detección de puntos clave mediante FAST.

## 1. Introducción.

### 1.5. Extracción de descriptores

Tras la etapa de detección de características, es posible extraer atributos complementarios de cada uno de los puntos de interés o “keypoints”, tales como orientación, magnitud, polaridad e intensidad.

Por lo tanto, un descriptor de puntos de interés obtiene de cada “keypoint”, información relevante y distinta de la región que le rodea, de manera que la misma estructura pueda ser reconocida si es encontrada en otra imagen. Supone un reto describir de manera eficiente los puntos de interés, con implementaciones robustas, invariantes a escala, rotación, transformaciones y ruido.

En la imagen 3 se puede ver representados con un número menor de puntos de interés respecto de la imagen 2, la magnitud y orientación obtenidos mediante el descriptor BRIEF (Binary Robust Independent Elementary Features)[10].

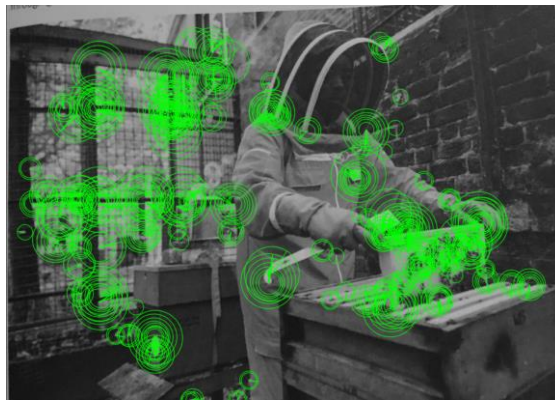


Imagen 3: Extracción de características mediante descriptor BRIEF.

### 1.6. Emparejamiento de puntos de interés por descriptores

Una vez se dispone de los puntos de interés junto a sus atributos, es necesario realizar un emparejamiento (ver imagen 4) óptimo entre los puntos de las imágenes en estudio. Para ello, se hacen coincidir los descriptores de puntos clave para cada par de imágenes.

En la actualidad, existen diversas técnicas de clasificación, dividiéndose principalmente en dos grupos según el tipo de aprendizaje. En el aprendizaje supervisado, para llevar a cabo la clasificación de los datos de entrada es necesaria la disposición de un conjunto de entrenamiento, el cual provee la información necesaria para discernir si un dato futuro de entrada corresponde a la parte de la colección de datos predefinidos. Los clasificadores más utilizados son SVM (Support Vector Machine), Adaboost [13], K-NN(K-Nearest Neighbor) [14] o redes neuronales (ANN) [15]. En cambio el aprendizaje no supervisado, no requiere de un conjunto de entrenamiento que permita etiquetar los datos, por lo que es necesario recurrir a técnicas de agrupación que constituyan etiquetas. Este sistema de agrupación, o “clustering” tiene la finalidad de catalogar los objetos en conjuntos, dentro de este tipo de clasificadores podemos destacar el algoritmo K-MEANS.

## 1. Introducción.



Imagen 4: Emparejamiento de puntos de interés mediante vecino más cercano.

### 1.7. Filtrado de coincidencias

Una vez obtenidas las coincidencias entre imágenes, aplicando conceptos teóricos de la visión por ordenador, encontraremos siempre interferencias y problemas relacionados con el mundo que nos rodea. Pudiéndose presentar ruidos técnicos interferencias debidas a la variación del punto de vista respecto al observador, oclusión, diferencia de escala, deformación, desorden de fondo o simplemente por la mera variación dentro de una misma clase, como se puede apreciar en la siguiente imagen.



Imagen 5. Imprecisión de coincidencias en emparejamiento de imágenes.

Por lo que, tras hacer coincidir los descriptores de puntos clave entre ambas imágenes, se estima la matriz fundamental (matriz que contiene la relación geométrica espacial entre dos imágenes) relacionada con el par de imágenes, con el propósito de rechazar los valores atípicos y ajustar los modelos de transformación a través de RANSAC [16].

Aunque RANSAC (Random Sample Consensus) funciona bien en la mayor parte de los casos, presentando un buen comportamiento al ruido, en muchos casos no hay garantía de que obtendrá una solución, incluso si existe una. También puede ser difícil de determinar si no hay ninguna solución.

Por lo tanto, podemos ver que este enfoque puede fallar fácilmente por varios factores y es aquí donde se centra este proyecto fin de master.



## 1. Introducción.

### 1.8. Metodología y problemas abordados

Una de las partes más importantes dentro del área de la visión artificial es la detección de patrones a través del procesamiento de las imágenes. Pero a la hora de aplicar conceptos teóricos encontramos interferencias y ruidos que los hacen errar en su ejecución.

En este proyecto se han estudiado una serie de algoritmos de detección y extracción de puntos característicos con el fin de trabajar con los mejores emparejamientos de “keypoints” que se puedan proporcionar en entornos exteriores.

Como principal objetivo de este proyecto final de máster se propone realizar el emparejamiento de dos nubes de puntos correspondientes a dos imágenes del mismo elemento (misma situación), abordando diversos problemas presentes como:

- Fuerte cambio del punto de vista
- Oclusiones o elementos distractores
- Ruido
- Cambios de iluminación
- Otros

Para ello, se propone que los puntos característicos proporcionados por un detector, sean representados mediante un gráfico, en la que los vértices representan los atributos de los “keypoints”, como son la escala u orientación, útiles para filtrar coincidencias falsas.

Por lo tanto, los emparejamientos tienen que corresponderse tanto en escala como en orientación entre ambas imágenes, pudiéndose así eliminar correspondencias incorrectas.

Sin embargo, este proceso de filtrado puede no ser suficiente por el hecho de basarse en correspondencias de punto a punto, sin tener en cuenta la estructura general del objeto. La estructura de gráfico que se propone, contiene información relevante y puede emplearse para filtrar discrepancias. Además, estructurar la idea de gráfico de atributos en diferentes escalas o niveles, jerarquizando la estructura, con un concepto similar a una pirámide de imágenes, puede ser utilizado en el procesamiento de imágenes como método multirresolución.

Por lo tanto las principales aportaciones del trabajo pueden resumirse en:

- Estudio y evaluación de las técnicas de detección y extracción de características de los puntos de interés.
- Emparejamiento de nubes de puntos de interés mediante triangulaciones de descriptores.
- Representación jerárquica del objeto mediante un gráfico piramidal, con el principal objetivo de optimizar los recursos mediante el análisis multirresolución de los descriptores.
- Filtrado de coincidencias teniendo en cuenta atributos de nodos, como son la orientación, la escala y la estructura de gráfico.

## 1. Introducción.

### 1.9. Medios de trabajo

En el estudio, desarrollo y validación de los diversos algoritmos de este proyecto final de máster se han empleado diferentes lenguajes de programación, bibliotecas y bases de datos.

#### 1.9.1. Lenguajes de programación

El principal lenguaje empleado en este proyecto es Python, con el cual se ha implementado todo el conjunto de algoritmos. Se trata de un código abierto, orientado a objetos con una gran biblioteca de herramientas.

Se ha empleado adicionalmente Matlab como medio de programación, en casos de patentes registradas y propiedad intelectual de ciertos algoritmos presentes en el estado del arte.

#### 1.9.2. OpenCV

Gran parte del trabajo de este proyecto se ha podido implementar por medio de OpenCV (Open Source Computer Vision) [24], una librería sobre visión artificial y machine learning que ofrece una infraestructura para aplicaciones de visión artificial en distintos interfaces como Python, Java, C, C++ y Matlab y que permite utilizar y modificar el código.

#### 1.9.3. Base de datos

Para el estudio de los diversos algoritmos presentes en el estado del arte y para el desarrollo, implementación y validación del resto de algoritmos propuestos en este proyecto, es necesaria una base de datos de imágenes en la que cada secuencia de imágenes contenga imágenes de las mismas escenas. Estas imágenes además deben de contener diversas transformaciones y cambios en las secuencias de imágenes, tales como cambios de iluminación y puntos de vista, permitiendo así evaluar las propuestas frente a diversos problemas que se presenten.

El repositorio HPatches [23], presenta un conjunto de secuencias (como la presente en la imagen 6) que se han usado en la evaluación de los detectores y descriptores presentes en el estado del arte y estudiados en este proyecto, además de emplearse para evaluar los algoritmos desarrollados.

Junto al repositorio de imágenes, HPatches, proporciona las homografías correspondientes, en forma de matriz entre cada uno de las imágenes de la secuencia y la imagen de referencia.



**Imagen 6. Secuencia de imágenes del repositorio HPatches. Imagen de la izquierda tomada como referencia y seguida de cinco imágenes con cambio de punto de vista.**

2. Puntos característicos y descriptores en entornos exteriores.

## 2. Puntos característicos y descriptores en entornos exteriores

Como ya se ha apuntado en la introducción, en el procesamiento de imágenes, es necesario conocer los puntos característicos de las imágenes o “keypoints”, tal y como se conocen con el termino en inglés. Siendo las características, meras representaciones matemáticas de las áreas clave de una imagen, al tratarse de representaciones vectoriales del contenido.

La extracción de descriptores tiene como objetivo representar aquellos puntos para luego poder ser comparados con otros puntos de interés o características correspondientes a una imagen diferente.

Existen diferentes tipos de métodos empleados para la coincidencia de características basados en descriptores conocidos para la detección y coincidencia de puntos como pueden ser los detectores SIFT [8] y SURF [9], aunque también algunos más recientes como BRIEF [10] o BRISK [6] que muestran un trabajo apto con una disminución computacional notable.

Para la obtención de atributos en las imágenes se recurrirá a descriptores basados en extracción de puntos característicos cuya finalidad sea obtener características, fácilmente tratables, de una serie de imágenes.

El estado del arte muestra una gran cantidad de detectores y descriptores por lo que se han contemplado para el estudio principalmente los que mejores resultados y menor coste computacional presentan en la actualidad.

### 2.1. Algoritmos de detección y descriptores empleados

Los algoritmos de detección evaluados han sido los siguientes:

#### 2.1.1. Detector FAST

FAST (Features from Accelerated Segment Test) [1] es un método de detección de esquinas desarrollado por Edward Rosten y Tom Drummond en 2006. La ventaja destacable de este detector de esquinas FAST es su alta eficiencia computacional en comparación con otros métodos comúnmente utilizados como SIFT o SURF.

El algoritmo emplea un círculo de 16 píxeles en el sentido de las agujas del reloj (ver imagen 7), para evaluar si un punto es realmente una esquina.

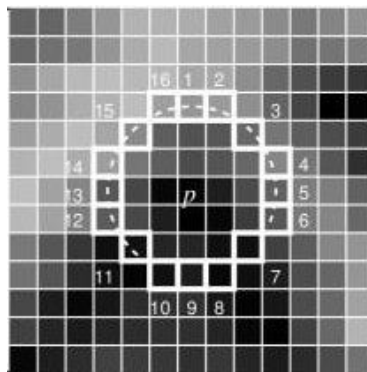


Imagen 7. Pixel evaluado con el detector FAST.

## 2. Puntos característicos y descriptores en entornos exteriores.

Las condiciones de detección de esquina pueden escribirse como:

- Condición 1: Un conjunto de N píxeles contiguos S,  $\forall x \in S$ , siendo la intensidad de x (1)

$$I_x > I_p + t \quad (1)$$

- Condición 2: Un conjunto de N píxeles contiguos S,  $\forall x \in S$ , (2)

$$I_x > I_p - t \quad (2)$$

Dado el cumplimiento de ambas condiciones, el pixel p candidato puede catalogarse como una esquina.

### 2.1.2. Detector ORB

ORB (Orientated Fast and rotated BRIEF) [2] es un detector de características local rápido y robusto, presentado por Ethan Rublee en 2011. Se basa en el detector de puntos clave FAST y en una versión modificada del descriptor BRIEF, tratándose de una alternativa rápida y eficaz a SIFT.

Utiliza el detector FAST modificado para calcular la orientación de forma rápida y precisa.

Las funciones de FAST no contemplan un componente de orientación ni funciones de multiescala. Por lo que se integra en este algoritmo de detección una pirámide de imágenes multiescala. Comprendiendo unas secuencias de imágenes, siendo todas versiones de la imagen en diferentes resoluciones, en la que cada nivel contiene una versión reducida de la imagen que el nivel anterior. Tras la creación de la pirámide como puede apreciarse en la imagen 8, utiliza el algoritmo FAST para la detección de los puntos clave en la imagen. Al detectar los puntos característicos en cada nivel, ORB localiza puntos en escalas diferentes. De esta manera, ORB es invariante de escala parcial.

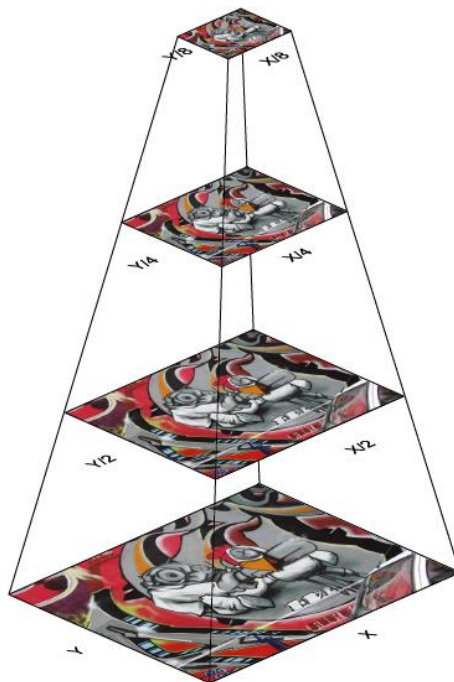


Imagen 8. Multiescala empleada en la detección ORB.

## 2. Puntos característicos y descriptores en entornos exteriores.

También incorpora un cálculo eficiente de la orientación (Orientación por la intensidad de centroide) ver imagen 9. En el que la intensidad del centroide asume que la intensidad de una esquina esta desplazada de su centro, y este vector de desplazamiento se puede utilizar para calcular su orientación.

Siendo el momento de un pixel (3)

$$m_p = \sum_{x,y} x^p y^q I(x,y) \quad (3)$$

Y el centroide (4)

$$C = \left( \frac{m_{10}}{m_{00}}, \frac{m_{01}}{m_{00}} \right) \quad (4)$$

Pudiendo obtener la orientación de la esquina como el vector desde el centro a la esquina (5).

$$\theta = \text{atan} \left( \frac{m_{01}}{m_{10}} \right) \quad (5)$$

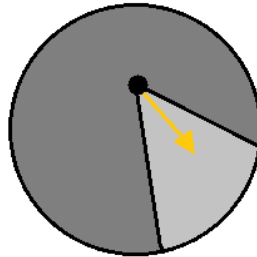


Imagen 9. Representación de la orientación centroide en una esquina.

### 2.1.3. Detector GFTT

GFTT (Good Features To Track) [3] es un detector elaborado en 1994, J.Shi y C. Tomasi que emplea el algoritmo de detección de esquinas Harris con alguna modificación, que muestra mejores resultados en comparación con algoritmo de Harris.

La función principal para detectar esquinas viene dada por (6)

$$R = \lambda_1 \lambda_2 - k(\lambda_1 + \lambda_2)^2 \quad (6)$$

Siendo  $\lambda$  autovalores del tensor de la imagen como suma de diferencias de cuadrado.

En lugar de la expresión (3), el detector GFTT implementa (7)

$$R = \min(\lambda_1, \lambda_2) \quad (7)$$

### 2.1.4. Detector AGAST

El detector de características AGAST (Adaptative and Generic corner detection base on the Accelerated Sefment Test) [4], es propuesto por Mair and Hager en 2010. Basando el algoritmo en el mismo criterio que FAST, pero utiliza un árbol de decisiones diferentes. Dando capacidad de combinaciones de los 16 pixeles del circulo imagen 7. Esto asegura que el árbol de

## 2. Puntos característicos y descriptores en entornos exteriores.

decisiones funcione en cualquier entorno, capacitando al algoritmo en áreas homogéneas y heterogéneas.

### 2.1.5. Detector MSER

El algoritmo de detección MSER (Maximally Stable Extremal Regions) [5] fue introducido por Matas en 2002 para la detección de características covariantes afines, llamadas MSER. Permitiendo recuperar un número sustancialmente mayor de características y mejorar la solidez de desenfoque. Siendo los MSER las regiones que se mantiene casi iguales a través de una amplia gama de regiones.

### 2.1.6. Detector BRISK

Leutenegger, Chil y Siegwart concibieron BRISK (Binary Robust Invariant Scalable Key-points) [6], como un reemplazo eficiente de los algoritmos de detección y descripción. Estando el detector de puntos basado en AGAST, el cual se trata de una extensión más rápida del algoritmo FAST. Posteriormente, la ubicación de los puntos se refina en la escala y el espacio. A continuación, el factor de escala del punto clave se calcula directamente con la información de profundidad de la imagen.

### 2.1.7. Detector A-KAZE

A-KAZE (Accelerated-Kaze Features) [7] se concibe como una versión mejorada de KAZE [17], considerándose un algoritmo en detección de características mediante la construcción de un espacio de escala mediante difusión no lineal.

### 2.1.8. Detector SIFT

El detector SIFT (Scale-Invariant feature transform), es un algoritmo publicado por David Lowe y patentado en 2004.

En el proceso, se parte de la aplicación de la diferencia gaussiana con distintos tamaños de regiones  $t$  y busca máximos locales a lo largo del espacio, determinando las coordenadas  $x$  e  $y$  en la imagen, como de la escala determinada por  $t$ . La localización de los puntos de interés se refina a precisión sub-píxel usando la expansión de la serie de Taylor del espacio-escala. Si el valor del punto encontrado es menor que cierto umbral, el punto es descartado.

A continuación se asigna una orientación a cada punto de interés para garantizar la invariancia respecto a la rotación en las imágenes, tomando los puntos vecinos en torno a cada punto de interés.

### 2.1.9. Detector SURF

El algoritmo SURF (Speeded-Up Robusted Features) se presentó por primera vez por Herbert Bay en 2006. Basado en los mismos principios que el SIFT, pero utilizando un esquema diferente y en teoría proporciona mejores resultados y mayor rapidez. Con el fin de detectar puntos característicos en una escala de manera invariante SIFT utiliza filtros de aproximación en cascada. Donde la diferencia de Gaussianos, DOG, se calcula sobre imágenes re-escaladas progresivamente.

2. Puntos característicos y descriptores en entornos exteriores.

## 2.2. Algoritmos de extracción de características

Los algoritmos descriptores evaluados han sido los siguientes:

### 2.2.1. Descriptor BRIEF

BRIEF (Binary Robust Independent Elementary Features), nace de la necesidad de incrementar la velocidad y eficiencia computacional de los descriptores, tratándose de un descriptor binario basado en simples test de diferencia de intensidad.

BRIEF define el test  $\tau$  en el área  $p$  del tamaño  $S \times S$  como (8)

$$\tau(p; x, y) = \begin{cases} 1, & \text{si } I(p, x) < I(p, y) \\ 0, & \text{lo contrario} \end{cases} \quad (8)$$

Donde  $I(p, x)$  es la intensidad del pixel en una versión suavizada de  $p$  siendo  $x = (u, v)^T$ . Tratándose de BRIEF de un vector de bits de  $n_d$  dimensional que corresponde a la siguiente expresión en su equivalencia decimal (9)

$$\sum_{1 \leq i \leq n_d} 2^{i-1} \tau(p; x_i, y_i) \quad (9)$$

### 2.2.2. Descriptor ORB

ORB implementa el descriptor BRIEF con muchas modificaciones para mejorar el rendimiento, ya que BRIEF se desempeña mal con la rotación. Por lo que ORB dirige BRIEF de acuerdo con la orientación de los puntos característicos.

### 2.2.3. Descriptor FREAK

El algoritmo FREAK (Fast Retina Keypoints) [11] es similar a los algoritmos ORB y BRISK, al tratarse de un descriptor de características de imagen basado en codificación binaria, rápido de calcular, con buenos resultados frente al ruido y con invariancia de escala y rotación.

Se trata de un algoritmo basado en una composición de la retina para poder detectar los puntos de interés.

### 2.2.4. Descriptor BEBLID

El descriptor de características BEBLID (Boosted efficient binary local imagen descriptor) [12] desarrollado por Iago Suarez, Ghesn Sfeir, Jose M. Buenaposada y Luis Baumela en 2020, describe una pequeña parte de una imagen usando un motón de ceros y unos (cadena binaria) de tal manera que la próxima vez que se detecta la misma parte de la imagen con otra iluminación o desde una perspectiva diferente ambas cadenas binarias serán bastantes similar. Una cadena binaria se asimila a una huella digital de la imagen.

### 2.2.5. Descriptor BRISK

El descriptor BRISK destaca por el hecho de ser uno de los pocos descriptores binarios en incorporar patrones diseñados a "mano" para escoger los mejores pares de pixeles.

El descriptor emplea para el desempeño de la rotación y orientación un ruido gaussiano con el fin de evitar los efectos de aliasing.

## 2. Puntos característicos y descriptores en entornos exteriores.

### 2.2.6. Descriptor SIFT

SIFT como descriptor toma para cada punto de interés un vecindario de 16x16 puntos. Dividiéndose este a su vez en bloques de tamaño 4x4. Posteriormente elabora un histograma para de orientaciones para los 16 sub-bloques del puntos de interés que constituye el descriptor.

### 2.2.7. Descriptor SURF

Para la descripción de funciones SURF usa respuestas de Wavelet en dirección horizontal y vertical (definido en relación al punto de interés). Toma una vecindad del tamaño S 20x20, entorno al punto característico donde S es el tamaño. Se encuentra dividido en subregiones 4x4, en la que cada subregión calcula unas simples características de 5x5 entorno al punto característico evaluado junto el Wavelet de Haar para x e y, para simplificar, se llamará dx a la respuesta de Wavelet en el eje x y dy en el eje y.

Para proporcionar una mayor robustez en deformaciones geométricas y errores, las respuestas dx y dy se ponderan con un filtro gaussiano centrado en el punto característico.

De forma posterior, las respuestas dx y dy se suman en cada subregión y forman un primer conjunto de entradas en el vector de características. Para obtener información sobre la polaridad de los cambios de intensidad, también extraemos la suma de valores absolutos de las respuestas |dx| y |dy|. Por lo tanto, cada subregión tiene un vector descriptor cuadrimensional, v definido como (10).

$$v = \left( \sum d_x, \sum d_y, \sum |d_x|, \sum |d_y| \right) \quad (10)$$

SURF implementa muchas características que mejoran la velocidad en cada paso respecto a SIFT. Proporcionando buenos resultados en imágenes con desenfoque y rotación, pero no tan bueno en cambios de vista e iluminación.

## 2.3. Emparejamiento de características

El método de emparejamiento entre los puntos característicos de ambas imágenes empleado en este trabajo es el emparejamiento por fuerza bruta, tratándose de un método de emparejamiento simple, que probará todas las posibilidades y encontrará las mejores coincidencias.

El método “Brute Force Matches” determina las coincidencias entre los puntos clave. Las coincidencias se evalúan sobre la base de la distancia euclidiana ente los dos puntos tratados.

La distancia euclidiana en de cada punto en la primera imagen se calcula con todos los demás puntos clave en la segunda imagen. Las buenas coincidencias se separan después por criterios de mínima distancia.

En este proceso intervienen diversos algoritmos dependientes de descriptores encargados de obtener el vecino más cercano (knn o k-nearest neighbor) por medio del algoritmo de fuerza bruta.

El método “knn” por fuerza bruta [18] busca linealmente la distancia ente la instancia de entrada y cada instancia de entrenamiento y selección las k muestras vecinas más cercanas. El



## 2. Puntos característicos y descriptores en entornos exteriores.

algoritmo es simple, pero cuando el conjunto de entrenamiento o la dimensión características es grande el cálculo es muy costoso.

### 2.4. Resultados de los métodos de emparejamiento evaluados

OpenCV ofrece la posibilidad de implementar una variedad de algoritmos de emparejamiento de "keypoints". En este proyecto se ha realizado el estudio comparativo de los diversos algoritmos de emparejamiento por fuerza bruta presentes en Python como son:

- BRUTTEFORCE HAMMING
- BRUTTEFORCE
- BRUTTEFORCE L1
- BRUTTEFORCE HAMMINGLUT

Los resultados obtenidos pueden encontrarse en el anexo A. Presentando los algoritmos HAMMING Y HAMMINGLUT, los mejores correspondencias.

### 2.5. Combinación de algoritmos de detección y descriptores evaluados

Con objetivo de calificar, evaluar y comprobar el rendimiento de los detectores y descriptores expuestos con anterioridad en ambientes exteriores, se propone una comparativa entre todas las combinaciones posibles (ver tabla 1), presentes en OpenCV, dando un total de 30 combinaciones posibles.

También se ha realizado una comparativa entre los métodos SIFT SURF y ORB, siendo esta comparativa realizada en Matlab debido a restricción de patentes y propiedad intelectual de los algoritmos SIFT y SURF.

|            |                     |                            |              |             |              |               |
|------------|---------------------|----------------------------|--------------|-------------|--------------|---------------|
| ORB+ ORB   |                     |                            |              |             |              | AKAZE+AKAZE   |
| ORB+FREAK  | GFTTDetector+FREAK  | FastFeatureDetector+FREAK  | AGAST+FREAK  | MSER+FREAK  | BRISK        | AKAZE+FREAK   |
| ORB+BRIEF  | GFTTDetector+BRIEF  | FastFeatureDetector+BRIEF  | AGAST+BRIEF  | MSER+BRIEF  | BRISK+FREAK  | AKAZE +BRIEF  |
| ORB+BEBLID | GFTTDetector+BEBLID | FastFeatureDetector+BEBLID | AGAST+BEBLID | MSER+BEBLID | BRISK+BRIEF  | AKAZE +BEBLID |
| ORB+BRISK  | GFTTDetector+BRISK  | FastFeatureDetector+BRISK  | AGAST+BRISK  | MSER+BRISK  | BRISK+BEBLID | AKAZE+BRISK   |

Tabla 1. Combinaciones de detectores y descriptores propuestos.

### 2.6. Resultados de los detectores y extractores evaluados

El principal objetivo para el desarrollo de este proceso se compone en encontrar la mejor combinación de algoritmos de detección y extracción de características visuales que pueda ser utilizado en el proceso de filtrado tras el emparejamiento de "keypoints".

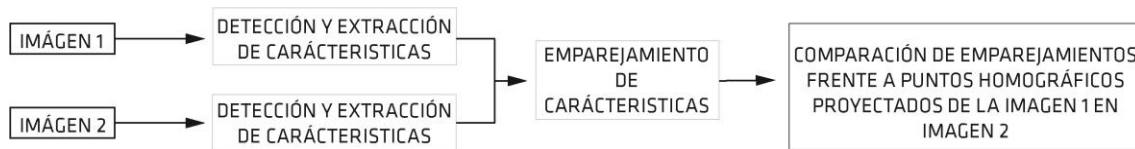
Para el estudio combinado de detectores y extractores se ha utilizado un conjunto de secuencias de imágenes procedentes de una base de datos Hpatches, con secuencias de cambios de puntos de vista, de escala e iluminación.

Los resultados obtenidos de las combinaciones presentes en la tabla 1 del estudio comparativo son plasmados en el anexo B, junto a la secuencia de imágenes empleadas.

La evaluación de los algoritmos combinados presentados en el apartado anterior se realiza en cuatro pasos (ver imagen 10). Primero, se obtienen la localización de los puntos de interés de la imagen 1, que será tomada como imagen de partida o de referencia y de la imagen a contrastar, pudiéndose tratar de una de las imágenes de la 2 a la 6 presentes en imagen 26. Segundo, se extraen las características de cada uno de los puntos de interés, a través de un

## 2. Puntos característicos y descriptores en entornos exteriores.

descriptor en ambas imágenes, tercero, se emparejan mediante “knn”-fuerza bruta los descriptores de ambas imágenes. Por último, se realiza una proyección homográfica de los puntos presentes en la imagen de partida a la imagen a contrastar, con el objetivo de verificar el correcto emparejamiento realizado de los “keypoints” realizado. Para la comprobación de emparejamientos, entre los puntos proyectados homograficos y emparejados mediante “knn”-fuerza bruta se establece un umbral con una distancia máxima de 10 píxeles.



**Imagen 10. Sistema de evaluación de detectores y descriptores.**

La combinación de detectores y descriptores con mejores resultados de precisión (15) sobre la secuencia de imágenes presente en la imagen 26 (ver anexo B) son:

- ORB
- ORB - FREAK
- ORB - BEBLID
- ORB - BRISK
- MSER - FREAK
- MSER - BRISK
- BRISK
- BRISK - FREAK
- AKAZE

Esta combinación de detectores y descriptores con mejores resultados de precisión han sido evaluados sobre las secuencias de imágenes presentes en la imagen 27 y en la imagen 28, presentes en el anexo B.

Siendo los métodos MSER - FREAK, ORB – FREAK y ORB – BRISK los que mejor precisión presentan en la secuencia presente en la imagen 27 y los métodos MSER - FREAK, MSER – BRISK, ORB – BRISK y AKAZE sobre la secuencia de la imagen 28.

3. Filtrado de correspondencias a través de triangulación y análisis multirresolución.

### **3. Filtrado de correspondencias a través de triangulación y análisis multirresolución**

Después de hacer coincidir las características de un par de imágenes, pueden presentarte problemas en el emparejamiento de imágenes en exteriores como:

- Cambios de iluminación. La solución a este problema se consigue mediante la elección de un robusto extractor de características.
- Presencia de distractores producto de oclusiones parciales. Tomando un número elevado de puntos característicos y con un filtrado adecuado pueden reducirse los emparejamientos erróneos mediante una estructura jerárquica de diversas escalas.
- Diversos puntos de vista en la escena. Resulta un problema complejo, dado que diversos elementos pueden presentarse en planos diferentes, dando lugar a confusión.
- La presencia repetitiva de estructuras en la escena proporciona emparejamientos erróneos. Siendo necesario considerar el análisis estructural de los emparejamientos, es decir, la interrelación de los puntos característicos extraídos de las imágenes.

Por lo tanto, podemos ver que este enfoque puede fallar fácilmente por varios factores y es aquí donde se centra este proyecto fin de master. En el que se propone, un nuevo método de filtrado de correspondencias entre puntos mediante triangulación basado en la orientación de los “keypoints” y análisis multirresolución.

Con este método se intenta solventar los problemas que pueden surgir en los emparejamientos propuestos anteriormente, en el que se tiene en cuenta no solo los puntos característicos, sino también su relación en el entorno de vecindad. Por otro lado, se propone eliminar los problemas de oclusiones que se presenten entre emparejamiento, por medio de un análisis multirresolución, tratando así un número menor de puntos y preservando la dispersión de los mismos, que a su vez reduce el coste computacional al verse tratados un número menor de puntos clave.

#### **3.1. Emparejamiento de puntos de interés por triangulación**

Como ya se ha mencionado anteriormente el emparejamiento de puntos característicos (descriptores) obtenidos del par de imágenes de estudio se implementa mediante “knn”-fuerza bruta.

Ahora bien, una vez se dispone del emparejamiento de la nube de puntos entre ambas imágenes se realiza una triangulación de los mismos. La triangulación en la imagen de referencia se implementa a través del método Delaunay [19], y se mantiene la disposición de la triangulación en ambos objetos, en correlación con el emparejamiento de “keypoints” proporcionado por “knn”-fuerza bruta como se puede apreciar en la imagen 11, en la que podemos ver de color magenta el triángulo invariante respecto a los puntos clave.

### 3. Filtrado de correspondencias a través de triangulación y análisis multirresolución.



Imagen 11. Triangulación "keypoints" a través de Delaunay a la derecha y proyección del triángulo en magenta en imagen proyectiva.

El desarrollo de la triangulación propuesta de la imagen de referencia, se implementara mediante la triangulación Delaunay, estando esta función presente en Python. La triangulación de Delaunay conforma una red de triángulos en la que los triángulos cumplen la condición Delaunay, que dice que los tres vértices que conforman cada triángulo del conjunto deben formar una circunferencia que no contenga ningún otro vértice. Además, las triangulaciones de Delaunay presentan las siguientes propiedades:

- Todos los puntos están conectados entre sí y forman el mayor número de triángulos posibles sin que se crucen sus aristas.
- Los triángulos se forman de la manera más regular posible, maximizando el ángulo mínimo de cada uno de ellos.
- Es unívoca si en ningún borde de la circunferencia hay más de tres vértices.

Esto nos permite crear una malla de triángulos en los "keypoints" emparejados con el propósito de trabajar sobre los nodos presentes en la triangulación Delaunay y en la triangulación correlacionada mediante los emparejamientos de puntos clave en la otra imagen.

#### 3.2. Extracción atributos de nodos

En la imagen siguiente (ver imagen 12), se encuentran representados con círculos los "keypoints", siendo proporcionados por un detector de características como los expuestos en el punto 2.2. Algunos de ellos proporcionan atributos como la dirección de los "keypoints" como puede ser SIFT o SURF, presentando estos métodos algunas restricciones de copyright. El problema es que ORB no presenta la dirección del "keypoints". Por ello se plantea determinar el ángulo de forma similar a como lo hace SIFT o SURF, pero teniendo en cuenta las triangulaciones propuestas en el apartado anterior y tal y como pueden apreciarse en la siguiente. imagen 12.

### 3. Filtrado de correspondencias a través de triangulación y análisis multirresolución.



**Imagen 12. Emparejamiento de características de “keypoints”, triangulación Delaunay en la imagen de la izquierda y correlación de triangulación en la imagen de la derecha por emparejamiento de puntos clave.**

La idea es obtener una dirección de cada uno de los vértices que componen a cada triángulo, respecto a su baricentro o incentro, siendo invariante a transformaciones proyectivas.

#### 3.2.1. Segregación de triangulaciones

Es importante diferenciar las distintas regiones que se presentan las triangulaciones, para ello se determinan los píxeles de la imagen que pertenecen a cada triángulo (ver imagen 13).



**Imagen 13. Píxeles presentes en cada región de la triangulación.**

La segregación entre triángulos permite el cálculo y la obtención de los atributos a cada una de las triangulaciones presentes en el mallado propuesto, teniendo en cuenta el entorno que rodea a cada punto clave a través del área que corresponde a la triangulación que representa. De esta manera, se considera a cada triangulación como un análisis estructural de emparejamientos, es decir, se permite interrelacionar los distintos puntos característicos extraídos de una imagen.

#### 3.2.2. Atributo de dirección de nodo

Partiendo de la propuesta de obtener una dirección de cada vértice (representada como una flecha verde en la imagen 14) que, respecto al baricentro o incentro del triángulo sea invariante a una transformación proyectiva.

### 3. Filtrado de correspondencias a través de triangulación y análisis multirresolución.

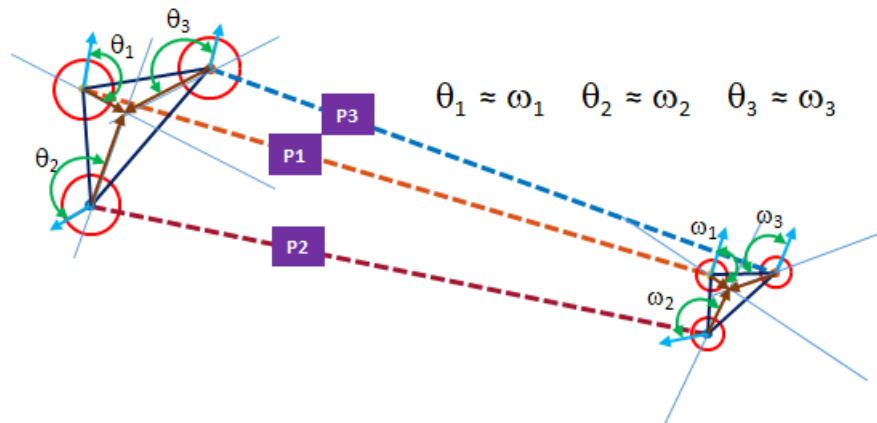


Imagen 14. Atributos de dirección respecto al baricentro/incentro y proyección

Es necesario por tanto, obtener en primera instancia las direcciones de los vértices de ambas triangulaciones (representadas como una flecha azul en la imagen 14), posteriormente calcular las direcciones de cada vértice al incentro o baricentro (marcadas con una flecha marrón) y con ello es posible obtener las direcciones invariantes de ambos triángulos marcadas como  $\theta$  y  $\omega$ , siendo estas, meros ángulos entre las direcciones de los vértices y las direcciones de estos al incentro/baricentro.

Por ello, para cada uno de los triángulos que completan la malla, se obtiene el módulo de gradiente y argumento (orientación) de los píxeles que lo conforman. Pudiendo de esta forma tener la dirección de los vértices que componen cada triángulo (representados mediante una flecha azul en la imagen 14) mediante el histograma de cada uno de los triángulos, siendo esta dirección en principio el valor máximo del histograma.

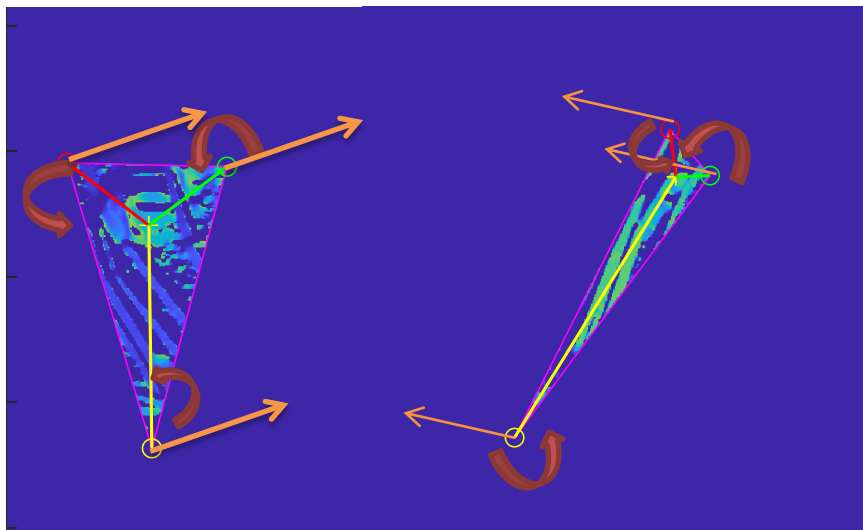


Imagen 15. Gradiente de un triángulo en un par de imágenes con direcciones de vértices y ángulos entre vértice y baricentro.

El histograma elaborado contiene todas las direcciones de los píxeles que conforman cada triangulación. Este se divide en 36 intervalos, de  $10^\circ$  cada intervalo, albergándose de esta forma los píxeles que recoge cada triángulo. El intervalo de máximo valor, corresponde a la dirección de los vértices que conforman cada triangulación, que posteriormente será empleado en la obtención del ángulo entre la dirección del vértice al incentro/baricentro.

### 3. Filtrado de correspondencias a través de triangulación y análisis multirresolución.

En el anexo C, se detalla un ejemplo de estudio de las direcciones invariantes calculadas a partir de las direcciones de los vértices, obtenidas por medio de los histogramas de cada triángulo y de los ángulos de estas con respecto al incentro/baricentro.

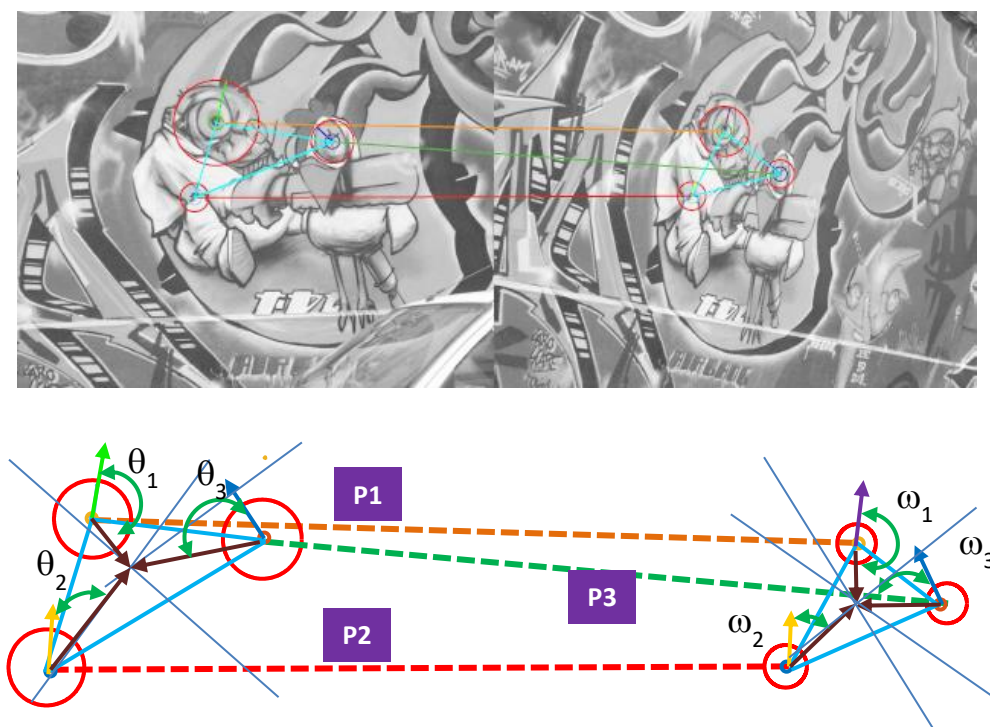
Como resultado del estudio, se ha visto que la obtención del ángulo invariante tiene resultados similares entre el cálculo con respecto al incentro que al baricentro, dándose validez a ambas formas de obtención.

#### 3.2.3. Proceso de filtrado de atributos de nodo

Una vez se dispone de los emparejamientos de los puntos clave, y el sistema de la triangulación de estos en cada par de imágenes como se ha descrito con anterioridad, se continúa con un proceso de inspección de los atributos de dirección obtenidos. Con ello se comprueba que, los atributos de cada nodo para cada emparejamiento sean análogos e invariantes, dicho de otra manera, que los ángulos  $\theta$  del triángulo de referencia sean similares a los  $\omega$  obtenidos en su triángulo análogo de la imagen evaluada.

Así pues, partiendo de los resultados presentes en la imagen 12, se comprueba para cada una de las triangulaciones que conforman el mallado de puntos clave, la equidad entre los ángulos  $\theta$  y  $\omega$ .

Un ejemplo de triangulación evaluada durante el proceso puede verse representada en la siguiente imagen 16. En ella se puede observar que los ángulos  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  y  $\theta_3$  correspondientes a la triangulación de la imagen de la izquierda son similares los ángulos  $\omega_1$ ,  $\omega_2$  y  $\omega_3$  obtenidos en el triángulo de la imagen de la derecha. Presentándose una cierta analogía entre los ángulos  $\theta$  y  $\omega$ , y por tanto, dando lugar a verdadera correspondencia.



$$\theta_1 \approx \omega_1 \quad \theta_2 \approx \omega_2 \quad \theta_3 \approx \omega_3$$

Imagen 16. Análisis de los ángulos de nodo de una triangulación de la imagen 11.

### 3. Filtrado de correspondencias a través de triangulación y análisis multirresolución.

Por otro lado, ante un emparejamiento erróneo de descriptores, como el que se muestra marcado por una línea discontinua azul en la imagen 12, el método implementado debe de ser capaz de eliminar el nodo inexacto. Para ellos se impone un valor máximo de variación (umbral) entre los ángulos  $\theta$  y  $\omega$ , con el principal objetivo de eliminar todos los nodos que superen ese parámetro.

En la siguiente imagen 17 se muestra una triangulación presente en la imagen 12 en la que se muestra el emparejamiento de descriptores erróneo. En este caso el método desarrollado debe de ser capaz de descartar el nodo correspondiente al vértice  $\theta_3$  y  $\omega_3$  en ambas imágenes.

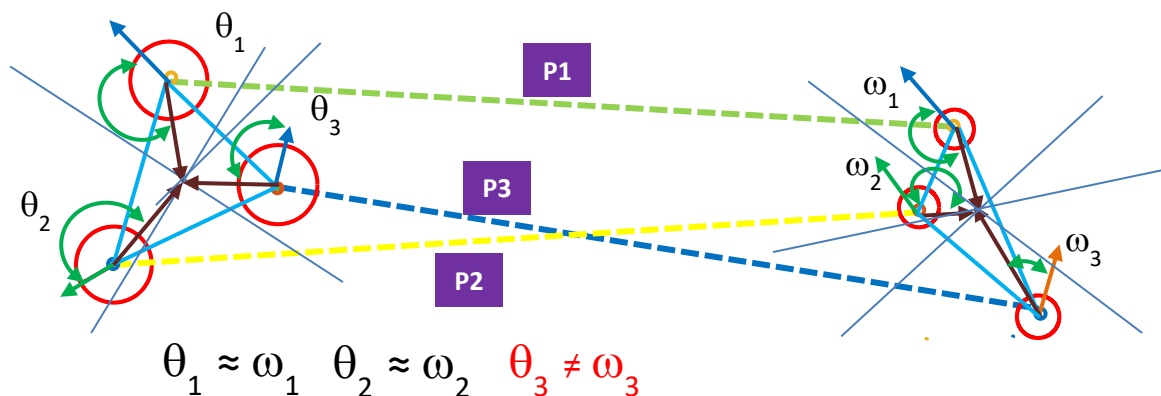
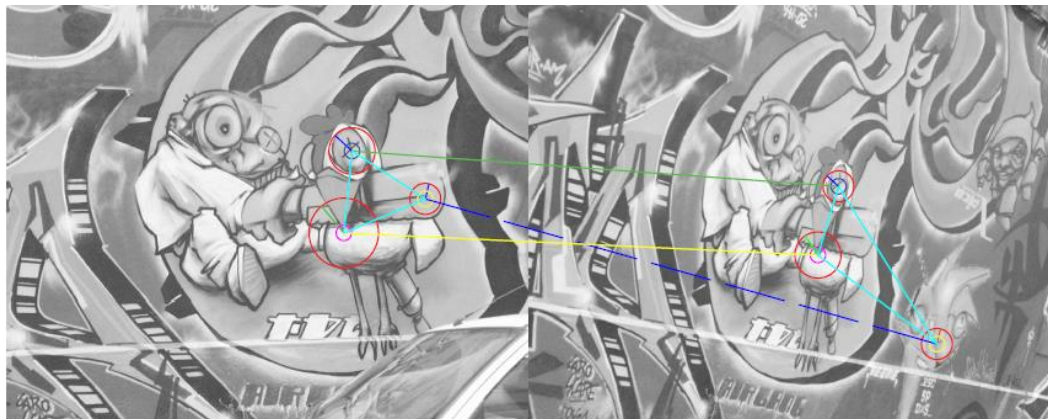


Imagen 17. Análisis de los ángulos de nodo de una triangulación de la imagen 11 con emparejamiento erróneo.

Una vez se han descartado los nodos que no cumplen la equidad entre los ángulos  $\theta$  y  $\omega$  del par de imágenes evaluadas, se reinicia de nuevo el proceso de comprobación de forma reiterativa hasta el momento que todos los nodos cumplan la condición, llegando este punto, se termina el proceso de filtrado.

En la siguiente imagen 18, puede verse el resultado tras el filtrado de la imagen 12, en ella se puede ver el nodo que no cumple la equidad impuesta y sus correspondientes aristas que lo conforman marcadas en azul oscuro (imagen superior A). Tras eliminar el nodo se conforma de nuevo el mallado (imagen inferior B), reiterándose el proceso sobre esta nueva estructura.



### 3. Filtrado de correspondencias a través de triangulación y análisis multirresolución.

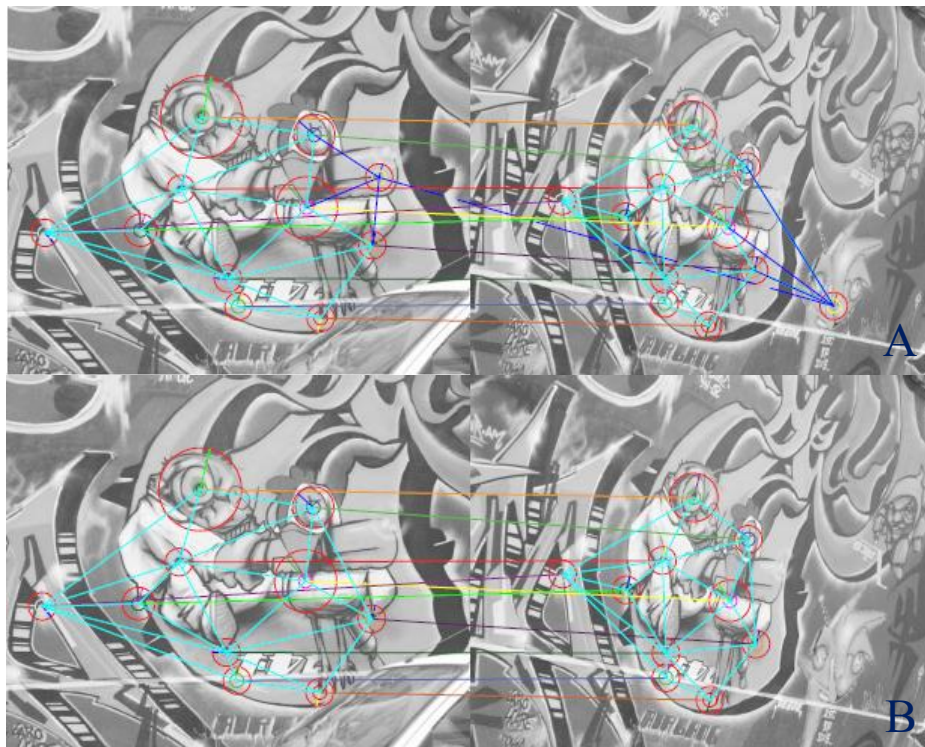


Imagen 18. Proceso de descarte de nodos emparejados erróneamente por el método de filtrado de ángulos.

### 3.3. Análisis multirresolución

Una representación jerárquica en la disposición de la triangulación de puntos característicos en imágenes a través de un grafo piramidal, de forma similar a una pirámide gráfica en la que subyace una colección de subgrafos, puede ser empleada con el principal objetivo de reducción en el coste computacional de la implementación y solventar problemas de oclusión entre par de imágenes.

De esta manera, se propone un análisis multirresolución tomando el grafo piramidal de partida e ir muestreando sucesivamente hasta llegar a la obtención de un único gráfico de solo tres vértices conformado por un triángulo.

#### 3.3.1. Atributos gráficos

La estructura piramidal propuesta para el análisis multirresolución, se encuentra formada por una gran cantidad de triángulos, pudiendo describir a través de estas entidades, disposiciones geométricas de diversos objetos planos llegando a formar entre ellos una malla triangular.

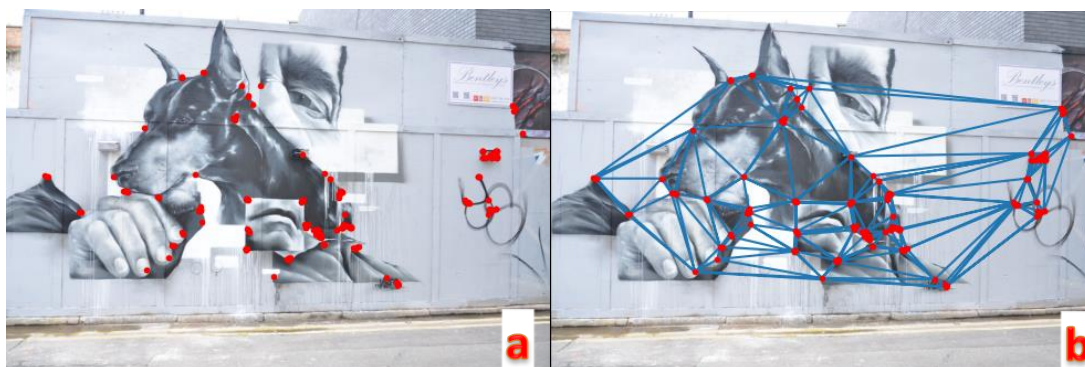


Imagen 19. (a) "Keypoints", (b) Triangulación Delaunay "keypoints".

### 3. Filtrado de correspondencias a través de triangulación y análisis multirresolución.

Los nodos que componen la red triangular estarán conformados por los “keypoints” y sus descriptores correspondientes como puede apreciarse en la imagen 19 (a) en la se genera un grafo piramidal por medio de la triangulación de Delaunay de diferentes niveles o escalas como el que se muestra a continuación.

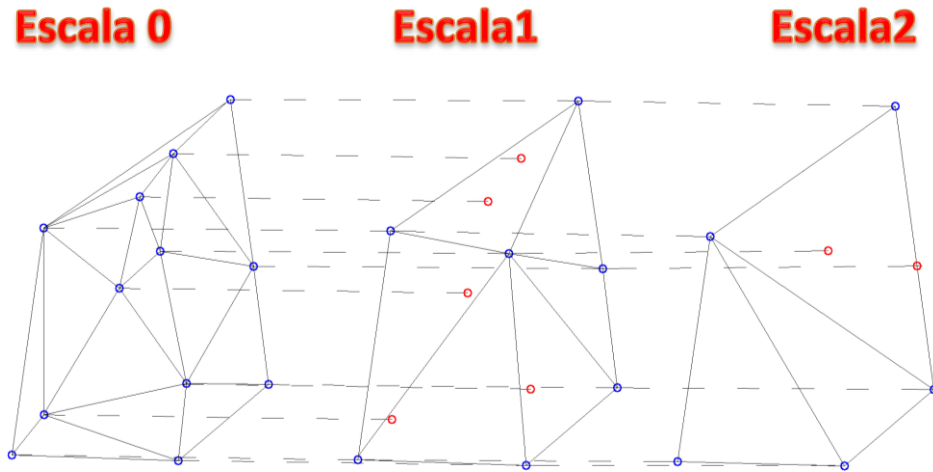


Imagen 20. Representación de grafo piramidal compuesto por diferentes niveles.

De esta forma cada atributo gráfico consta de un conjunto de vértices conectados mediante aristas. En el que la disposición física conforme a cada triangulación queda definida por medio de las reglas de Delaunay (ver imagen 19 (b)) y en el que cada nodo o vértice conformante de la malla almacena el atributo de la dirección de nodo.

#### 3.3.2. Grafo piramidal

Como hemos visto, el conjunto de triangulaciones Delaunay forma una estructura piramidal (ver imagen 20), de la que se generaran sucesivas subgrafos con un menor número de vértices. Por lo tanto, al partir de un grafo piramidal, se van eliminando los triángulos de menor área del grafo. Los criterios de reducción aplicados dependientes de la malla son los siguientes:

- Los triángulos más pequeños, en la que la suma de las longitudes de sus aristas comprende el valor más pequeño, se eliminan.
- Posteriormente, se generan nuevos bordes uniendo los vértices vecinos del área eliminada.
- Este proceso continua con el resto de nodos del grafo que no se han visto afectados.
- Este proceso termina en cada escala, cuando se han visitado todos los vértices.

Los resultados del proceso de reducción del grafo piramidal inicial pueden apreciarse en la siguiente imagen 21. En esta imagen se muestra el grafo piramidal de partida en la escala s0 y las sucesivas reducciones de escala hasta llegar al subgrafo base s6.

### 3. Filtrado de correspondencias a través de triangulación y análisis multirresolución.



Imagen 21. Diferentes escalas del grafo piramidal desde la escala s0 hasta la escala s6.

De esta forma, el coste computacional a la hora de calcular los atributos de nodos, los emparejamientos de los descriptores y el filtrado de coincidencias se ven drásticamente reducido, debido al decremento de número de “keypoints” a evaluar.

#### 4. Filtrado de coincidencias.

### 4. Filtrado de coincidencias

Como ya se ha mencionado anteriormente, las coincidencias se logran por emparejamientos de descriptores en cada par de imágenes, pudiendo presentarse fallos de emparejamientos o falsas coincidencias. Estos problemas se intentan subsanar por medio de filtrados, con el objetivo de eliminar las falsas coincidencias.

#### 4.1. Métodos de filtrado

Para mejorar las correspondencias tras el emparejamiento de descriptores se emplean diversos algoritmos de filtrado en visión artificial, siendo el más común RANSAC (Random sample consensus). Tratándose de un método iterativo que busca eliminar los valores atípicos de los datos que no encajan al modelo dado “outliers” y conformándose por “inliers”, es decir, datos cuya distribución se explica por un conjunto de parámetros del modelo.

En el proceso, RANSAC selecciona un subconjunto de puntos catalogados como “inliers”, con los que elabora un modelo hipotético en el que se prueban todos los datos contra el modelo. Los puntos que se ajusten al modelo se consideran válidos. Este algoritmo se repite un número de veces establecido, aproximando a un modelo más preciso. Este proceso puede apreciarse a la imagen 22.

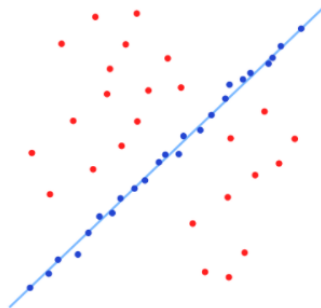


Imagen 22. Representación de “inliers” en azul y “outliers” en rojo del modelo Ransac.

Otros algoritmos son:

LMeds (Least Median of Squares) [20], tratándose de un estimador de parámetros para la resolución del problema de minimización no lineal. Es decir, el estimador debe producir el valor más pequeño para la mediana de los residuos cuadrados calculados para todo el conjunto de datos. Resultado de un método muy robusto, tanto para falsas coincidencias como para valores atípicos debido a una mala localización.

MSAC (M-estimator Sample and Consensus) [21], emplea una función de pérdida para evaluar una hipótesis (12).

$$\text{Pérdida (e)} = \begin{cases} e^2 & |e| < c \\ c^2, \text{ lo contrario} & \text{lo contrario} \end{cases} \quad (12)$$

LTS (Least Trimmed Squares) [22], es un método estadístico robusto que ajusta una función a un conjunto de datos, sin verse afectado por la presencia de valores atípicos.

#### 4. Filtrado de coincidencias.

### 4.2. Filtrado de coincidencias por atributo de nodos

Una vez se han establecido las correspondencias entre los descriptores de ambas imágenes por “knn”-fuerza bruta y se dispone de los atributos de nodo de las triangulaciones presentes en la escala del grafo piramidal establecida. Se propone realizar un filtrado de atributos de nodos en función de los ángulos de los vértices. Es decir, tal y como se establece en la imagen 14. Los atributos de nodos, calculados como los ángulos entre las direcciones de los vértices al incentro o baricentro (ambas opciones son válidas), son invariantes. Por lo tanto existe una correlación entre estos ángulos invariantes de ambas imágenes.

Estableciendo un umbral como parámetro de filtrado, en el que se eliminen los puntos cuya diferencia entre los ángulos de cada par de imágenes supere cierto parámetro establecido. Conseguimos filtrar los puntos, eliminando falsas coincidencias presentes tras los emparejamientos de descriptores.

### 4.3. Resultados entre algoritmos de filtrado

Los resultados entre los diversos algoritmos de filtrado anteriormente mencionados, se han probado sobre una base de datos de imágenes y pueden verse algunos ejemplos en el Anexo D.

Se ha evaluado el método de filtrado expuesto anteriormente con diferentes umbrales (máxima diferencia entre ángulos), tales como 30, 20 y 10 grados.

### 4.4. Pre-Filtrado puntos de interés

Antes de trabajar con los métodos de filtrado anteriormente descritos, en la que los descriptores nos dan una información de cada “keypoint” y permiten realizar un análisis exhaustivo en cada caso. Se propone establecer unos criterios previos a los métodos de filtrado.

El propósito de la implementación de un proceso de filtrado previo, es el de disminuir el número de correspondencias emparejadas de forma errónea y reducir el coste computacional del proceso de filtrado, ya que el algoritmo de filtrado previo es más rápido respecto al filtrado de coincidencias por atributo de nodos.

#### 4.4.1. Pre-filtrado ángulos

En este proceso, los ángulos de los descriptores emparejados son comparados, siendo eliminados aquellos emparejamientos cuya diferencia entre los ángulos del descriptor evaluado superen el siguiente criterio (13).

$$|\alpha_1 - \alpha_2| = M_E + Margen \quad (13)$$

Siendo  $\alpha_1$  y  $\alpha_2$  los ángulos proporcionados por los descriptores y  $M_E$  la mediana proporcionada por todos los ángulos de los descriptores.

#### 4.4.2. Pre-filtrado áreas

Para el filtrado previo de áreas de triangulaciones, se emplea un modelo similar al propuesto para el pre-filtrado de ángulo expuesto anteriormente.

#### 4. Filtrado de coincidencias.

Tras la disposición de triangulaciones Delaunay de los puntos característicos proporcionados por el detector, se comparan las áreas de las triangulaciones correspondidas entre el par de imágenes, aplicándose el siguiente criterio de filtrado (14).

$$\frac{|A_1 - A_2|}{A_1} \leq \text{Margen} \quad (14)$$

Siendo  $A_1$  y  $A_2$  las áreas de los triángulos correspondidos.

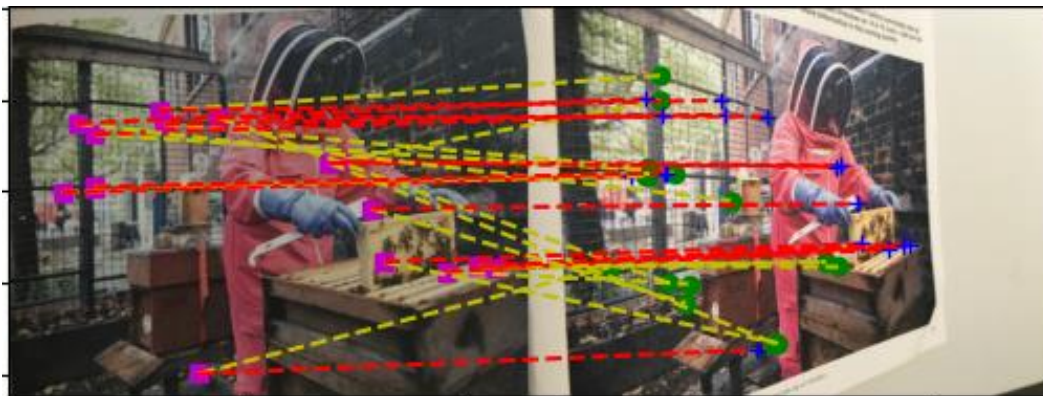
Y el valor del margen corresponde a un incremento o decremento del área del triángulo de la imagen emparejada con respecto al área del triángulo de referencia.

#### 4.4.3. Resultados de pre-filtrados

Los resultados de los algoritmos de pre-filtrado implementados quedan expuestos en el anexo E.

Los algoritmos de pre-filtrado se han evaluado sobre la secuencia de imágenes presente en la imagen 38. Obteniéndose para el pre-filtrado de ángulos los resultados presentes en la tabla 15 y en el pre-filtrado de áreas los resultados de la tabla 16.

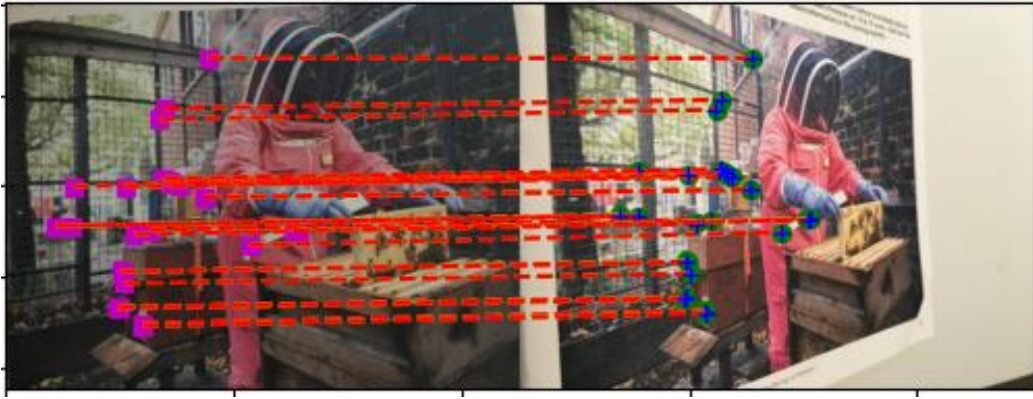
El pre-filtrado de ángulos presenta buenos resultados (ver gráfica 22) y proporciona una gran cantidad de “keypoints”, pero cuando se da una gran variación en el punto de vista entre imágenes, como la que se presenta entre la imagen de referencia 1 de la secuencia de imágenes presente en la imagen 38 y la imagen 6 de la misma, presenta un número elevado de falsas coincidencias (ver imagen 23) y por lo tanto un decremento en el ratio de coincidencias, haciendo que este método de filtrado no sea adecuado ante esta situación.



**Imagen 23. Correlación entre “keypoints” pre-filtrado de ángulos y correspondencias homográficas entre imágenes 1 y 5 de la secuencia presente en la imagen 38.**

Con respecto al pre-filtrado de áreas, el número de “keypoints” es considerablemente inferior al del pre-filtrado de ángulos. Pero el ratio proporcionado en toda la secuencia es mayor, por lo tanto, este método presenta una eficacia mayor y frente a grandes cambio de punto de vista entre pares de imágenes tal y como puede verse en la siguiente imagen 24.

#### 4. Filtrado de coincidencias.



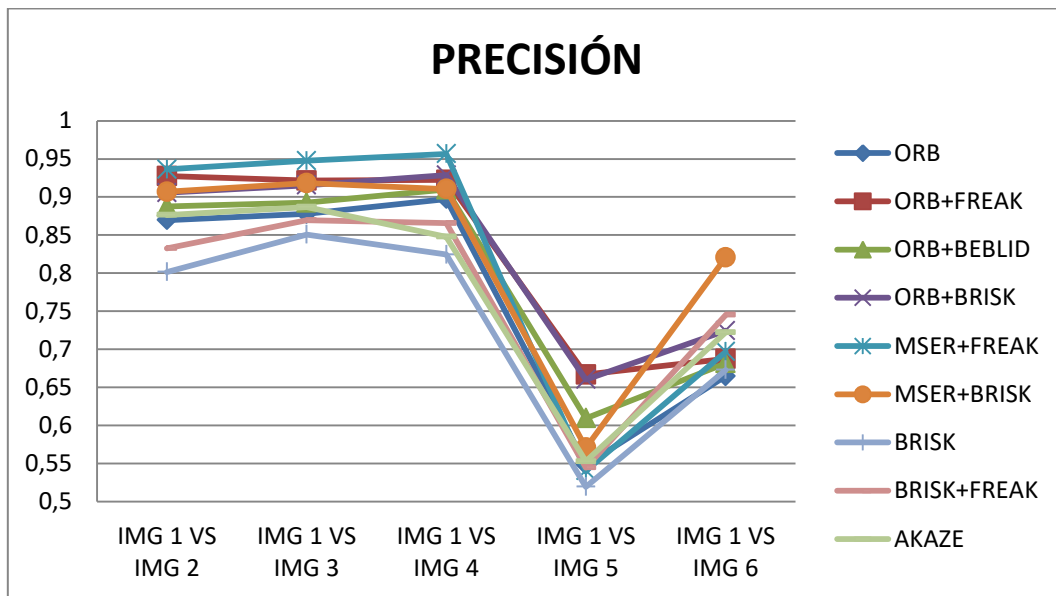
**Imagen 24. Correlación entre “keypoints” pre-filtrado de áreas y correspondencias homográficas entre imágenes 1 y 5 de la secuencia presente en la imagen 38.**

## 5. Resultados.

### 5. Resultados

En este proyecto, se han estudiado, evaluado y desarrollado diversos algoritmos de visión por ordenador, además de gran cantidad de literatura del estado de arte, con el objetivo de comprender y mejorar métodos en el filtrado de correspondencias aplicado en ambientes exteriores.

En primer lugar, se ha realizado una comparación entre los diversos algoritmos de detección y descripción de puntos característicos. Un ejemplo comparativo entre los métodos más destacados que se mencionan en el apartado 2.6, puede verse representado en la gráfica 1. En ella se compara la precisión (15) en los algoritmos de detección y extracción evaluados sobre la secuencia de imágenes presente en la imagen 38.



Gráfica 1. Precisión de los métodos de filtrado evaluados de la secuencia "BEES" de la base de datos HPatches.

En la tabla 2 se detallan los resultados, tales como, el número de emparejamientos "matches", los puntos correctamente emparejados, "TP" o verdaderos positivos, los puntos emparejados erróneamente o falsos positivos "FP" y la precisión del método empleado. Pueden consultarse más resultados del estudio en el anexo B.

Cabe mencionar que, también se han examinado los diversos métodos de emparejamiento mediante fuerza bruta recogidos en la librería OpenCV, como se ha presentado en el apartado 2.4. Siendo los algoritmos de HAMMING Y HAMMINGLUT, los que mejores rendimiento presentan. Pueden consultarse los resultados del estudio en el anexo A.

El problema de cambios de iluminación que se presenta en el emparejamiento de imágenes, puede ser solventado con un sistema robusto de detección y extracción de características.



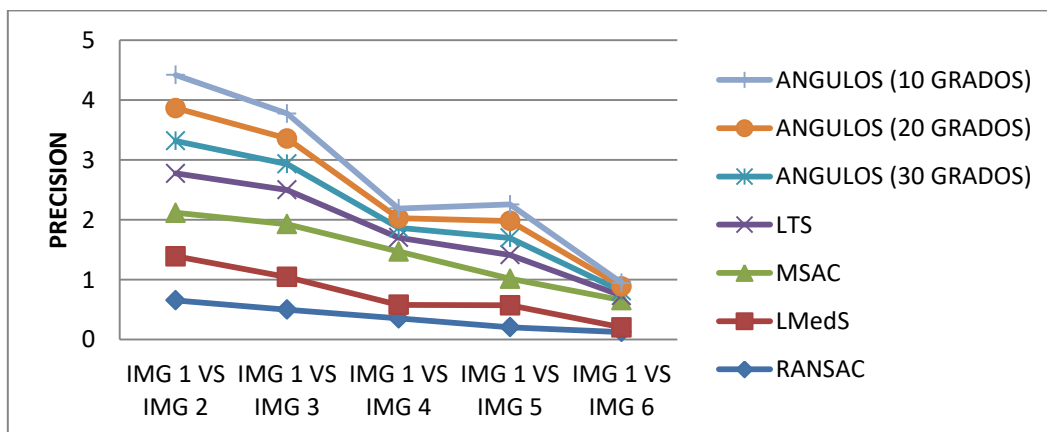
## 5. Resultados.

|                    |           | IMG 1 VS IMG 2 | IMG 1 VS IMG 3 | IMG 1 VS IMG 4 | IMG 1 VS IMG 5 | IMG 1 VS IMG 6 |
|--------------------|-----------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| <b>ORB</b>         |           |                |                |                |                |                |
| RESULTADOS         | Matches   | 414            | 409            | 409            | 323            | 328            |
|                    | TP        | 360            | 359            | 367            | 177            | 218            |
|                    | FP        | 54             | 50             | 42             | 146            | 110            |
|                    | Precision | 0,869565217    | 0,877750611    | 0,897310513    | 0,547987616    | 0,664634146    |
| <b>ORB+FREAK</b>   |           |                |                |                |                |                |
| RESULTADOS         | Matches   | 289            | 280            | 296            | 231            | 227            |
|                    | TP        | 268            | 258            | 273            | 154            | 156            |
|                    | FP        | 21             | 22             | 23             | 77             | 71             |
|                    | Precision | 0,92733564     | 0,921428571    | 0,922297297    | 0,666666667    | 0,68722467     |
| <b>ORB+BEBLID</b>  |           |                |                |                |                |                |
| RESULTADOS         | Matches   | 391            | 391            | 399            | 284            | 311            |
|                    | TP        | 347            | 349            | 363            | 173            | 212            |
|                    | FP        | 44             | 42             | 36             | 111            | 99             |
|                    | Precision | 0,887468031    | 0,89258312     | 0,909774436    | 0,60915493     | 0,681672026    |
| <b>ORB+BRISK</b>   |           |                |                |                |                |                |
| RESULTADOS         | Matches   | 381            | 402            | 393            | 259            | 283            |
|                    | TP        | 345            | 368            | 365            | 171            | 205            |
|                    | FP        | 36             | 34             | 28             | 88             | 78             |
|                    | Precision | 0,905511811    | 0,915422886    | 0,928753181    | 0,66023166     | 0,724381625    |
| <b>MSER+FREAK</b>  |           |                |                |                |                |                |
| RESULTADOS         | Matches   | 188            | 210            | 208            | 174            | 155            |
|                    | TP        | 176            | 199            | 199            | 94             | 108            |
|                    | FP        | 12             | 11             | 9              | 80             | 47             |
|                    | Precision | 0,936170213    | 0,947619048    | 0,956730769    | 0,540229885    | 0,696774194    |
| <b>MSER+BRISK</b>  |           |                |                |                |                |                |
| RESULTADOS         | Matches   | 204            | 232            | 201            | 156            | 145            |
|                    | TP        | 185            | 213            | 183            | 89             | 119            |
|                    | FP        | 19             | 19             | 18             | 67             | 26             |
|                    | Precision | 0,906862745    | 0,918103448    | 0,910447761    | 0,570512821    | 0,820689655    |
| <b>BRISK</b>       |           |                |                |                |                |                |
| RESULTADOS         | Matches   | 2020           | 2108           | 2078           | 1481           | 1650           |
|                    | TP        | 1619           | 1793           | 1713           | 769            | 1110           |
|                    | FP        | 401            | 315            | 365            | 712            | 540            |
|                    | Precision | 0,801485149    | 0,85056926     | 0,824350337    | 0,519243754    | 0,672727273    |
| <b>BRISK+FREAK</b> |           |                |                |                |                |                |
| RESULTADOS         | Matches   | 1906           | 1968           | 1948           | 1482           | 1632           |
|                    | TP        | 1587           | 1711           | 1686           | 807            | 1216           |
|                    | FP        | 319            | 257            | 262            | 675            | 416            |
|                    | Precision | 0,832633788    | 0,869410569    | 0,86550308     | 0,544534413    | 0,745098039    |
| <b>AKAZE</b>       |           |                |                |                |                |                |
| RESULTADOS         | Matches   | 2359           | 2412           | 2273           | 1735           | 1944           |
|                    | TP        | 2067           | 2139           | 1927           | 959            | 1404           |
|                    | FP        | 292            | 273            | 346            | 776            | 540            |
|                    | Precision | 0,876218737    | 0,88681592     | 0,847778267    | 0,552737752    | 0,722222222    |

**Tabla 2. Resultados detectores y descriptores evaluados en la secuencia de imágenes "BEES" de la base de datos HPaches.**

El estudio y evaluación de todas las combinaciones propuestas entre algoritmos de detección y descripción en ambientes exteriores, ha dado lugar al punto de partida en el desarrollo del método de filtrado por triangulaciones con una estructura jerarquizada, ya que ha sido posible disponer como partida de la mejor disposición de puntos clave en estos lugares de estudio.

En el algoritmo de filtrado implementado, se ha comparado con los métodos empleados en la actualidad y registrados en el estado del arte como son RANSAC, LMedS, MSAC y LTS. Una comparación en la precisión de los diversos métodos, junto al desarrollado de ángulos con diversos umbrales (10, 20 y 30°) puede verse en la siguiente gráfica 2.



**Gráfica 2. Precisión de los métodos de filtrado evaluados de la secuencia ABSTRACT.**

## 5. Resultados.

La secuencia de imágenes de la base de datos HPatches de la gráfica anterior, se muestra en la imagen 32, incluida en el anexo D, junto con más resultados del estudio. Como consecuencia de la evaluación y análisis de este método en comparación con los recogidos en la literatura, se aprecia que presenta buenas prestaciones. Con esto se mejora los problemas relacionados con el cambio de punto de vista entre imágenes y la presencia de estructuras repetitivas.

Para enfrentarnos al problema de la presencia de distractores, como consecuencia de oclusiones parciales, se ha desarrollado un análisis jerárquico en varias escalas o niveles. Que reduce los falsos emparejamientos al decrementar el número de puntos característicos y permite mantener la dispersión entre ellos. La representación jerárquica de un objeto a través de una pirámide gráfica también reduce proporcionalmente el coste computacional al verse reducir el número de puntos clave a tratar.

Con el objetivo de reducir los falsos emparejamientos antes del proceso de filtrado desarrollado, se han propuesto dos métodos de depurado de falsas coincidencias:

- Pre-filtrado por áreas de triangulaciones.
- Pre-filtrado por ángulos de descriptores.

Estos métodos presentan buenos resultados en su validación tal y como se recoge en el apartado 4.4.3., además de reducir el tiempo de procesamiento, ya que también reduce el número de puntos clave a evaluar en el filtrado de coincidencias posterior.

Cabe mencionar, que se ha estudiado la variación del parámetro de vecindad  $k$ , en el método de emparejamiento propuesto “knn”-fuerza bruta, con el principal objetivo de incrementar los emparejamientos. Tras el estudio de esta propuesta (ver anexo F), se ha podido comprobar que el mejor parámetro  $k$  es 2, ya que su incremento provoca una gran cantidad de falsos emparejamientos que hacen disminuir la eficiencia del método desarrollado de filtrado.

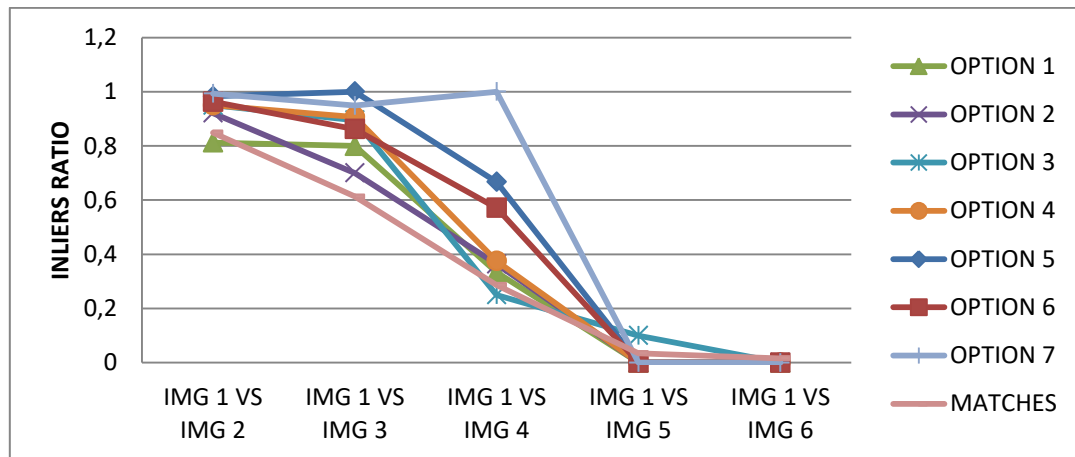
Los algoritmos desarrollados se han estudiado y validado de forma individual, pero pueden conformarse en una única estructura, esto puede dar lugar a varias combinaciones posibles entre los algoritmos de pre-filtrado, filtrado y análisis multirresolución, siendo estas combinaciones las presentadas en la tabla 3.

| OPTION | STRUCTURE                                       |
|--------|---|
| 1      | MULTIESCALE & PRE-FILTER ANGLES                 |
| 2      | MULTIESCALE & PRE-FILTER AREAS                  |
| 3      | MULTIESCALE & FILTER ANGLES (30°)               |
| 4      | MULTIESCALE & PRE-FILTER ANGLES & FILTER ANGLES |
| 5      | MULTIESCALE & PRE-FILTER AREAS & FILTER ANGLES  |
| 6      | PRE-FILTER ANGLES & MULTIESCALE & FILTER ANGLES |
| 7      | PRE-FILTER AREAS & MULTIESCALE & FILTER ANGLES  |

**Tabla 3. Combinaciones posibles entre los métodos desarrollados según se ordenen.**

## 5. Resultados.

Evaluando las diversas combinaciones anteriores sobre la secuencia de imágenes presentes en la imagen 26, y mostramos los ratio de emparejamientos correctos de las opciones junto con la del propio emparejamiento “knn” – fuerza bruta, tal y como se muestra en la siguiente gráfica 3, vemos que, las opciones 5 y 7 son las mejores propuestas. Pero, cuando se tiene un gran cambio de posición entre el par de imágenes (IMG 1 VS 5 e IMG 1 VS IMG 6), la eficiencia se ve drásticamente disminuida.



Gráfica 3. “Ratio inliers” de las combinaciones de algoritmos sobre la secuencia “GRAFFITI” de la base de datos.

En el anexo G, se muestra el estudio más detallado, junto con los resultados de todas las combinaciones y estructuras valoradas, siendo la estructura conformada por el análisis multirresolución, pre-filtrado de áreas y filtrado de ángulos, en este orden de implementación, la que mejores resultados presenta. Además, tras reducirse el número de puntos clave por la selección de una escala intermedia dentro del grafo piramidal propuesto, y eliminarse ciertas correspondencias mediante el pre-filtrado de áreas, el coste computacional del algoritmos de filtrado de ángulos se ve drásticamente reducido.

Por último, la estructura compuesta por los algoritmos de análisis jerárquico, pre-filtrado de áreas y filtrado de ángulos se ha evaluado en entornos exteriores. Un ejemplo de ello puede verse en la imagen 25, en ella se muestran las correspondencias entre pares de imágenes tras el aplicar el método propuesto.



Imagen 25. Ejemplo de correspondencias entre diversas imágenes de la fachada de La Seo del Salvador en su Epifanía en Zaragoza.

La detección de puntos clave se ha realizado por medio de ORB, la extracción de características a través de BEBLID, y se ha impuesto un margen de 10 en el pre-filtrado de áreas y de un umbral máximo de 30º para el filtrado por ángulos. En el anexo H se encuentran más pares de imágenes evaluados en diversas ubicaciones.

## 6. Conclusiones.

### **6. Conclusiones**

Como conclusión final, podemos decir que se ha validado e implementado el método propuesto de filtrado, asegurando robustez al sistema de filtrado y añadiendo mejoras a la propuesta inicial. Dando una solución al problema de la estimación de la posición mediante una cámara a través de una imagen. Pudiendo presentar una imagen virtual superpuesta a la real en aplicaciones de Realidad Aumentada.

Como crítica, se puede decir que no ha sido posible una implementación en tiempo real, por falta de tiempo, por lo que sería conveniente una depuración del código y una implementación robusta con análisis de tiempos de ejecución reales para complementar el proyecto.

Con este trabajo, he estudiado y comprendido técnicas de visión por computador, sobre todo relacionadas con el de detección y descripción de puntos clave en detección de objetos, además del emparejamiento de imágenes. También he aprendido a trabajar y programar en entornos desconocidos en principio para mí, como ha sido Python.

Como líneas futuras, se puede completar la implementación de dicha aplicación, dotándola de mayor fluidez depurando el código y dándole más robustez. Así como la verificación en otro tipo de entornos.

A nivel personal, puedo decir que me siento satisfecho con lo aprendido en este proyecto, de haber podido explorar una rama de conocimiento novedosa para mí, y de la forma en la que se ha realizado durante todo este tiempo.

## Referencias

- [1] Rosten, Edward; Tom Drummond (2006). "Machine learning for high-speed corner detection European Conference on Computer Vision". *Lecture Notes in Computer Science*. 1. Pp. 430-443.
- [2] Rublee, Ethan; Rabaud, Vincent; Konolige, Kurt; Bradski, Gary (2011). "ORB: an efficient alternative to SIFT or SURF". *IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*.
- [3] J. Shi and C. Tomasi. "Good features to track". *In Proceed. of IEEE Intern. Conf. on Comp. Vision and Pattern Rec. Seattle WA, USA, June 1994*.
- [4] Elmar Mair, Gregory D. Hager, Darius Burschka, Michael Suppa, and Gerhard Hirzinger. "Adaptive and generic corner detection based on the accelerated segment test". *In Proceedings of the European Conference on Computer Vision (ECCV'10). September 2010*.
- [5] J. Matas, O. Chum, M. Urban, and T. Pajdla. "Robust wide baseline stereo from maximally stable extremal regions". *Proc. Of British Machine Vision Conference*. Pg: 384-396. 2002.
- [6] Leutenegger, S., Chli, M., & Siegwart, R.Y. "BRISK: Binary Robust Invariant Scalable Keypoints." *Proc. International Conference on Computer Vision (ICCV) pp. 2548 - 2555. IEEE (2011)*.
- [7] *Pablo Fernández Alcantarilla, J. Nuevo, A. Bartoli. "Fast Explicit Diffusion for Accelerated Features in Nonlinear Scale Spaces". On British Machine Vision Conference, 2013.*
- [8] *David G. Lowe. "Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints". International Journal of Computer Vision. 2004.*
- [9] Herbert Bay, Tinne Tuytelaars, and Luc Van Gool. "Speeded Up Robust Features". *ETH Zurich, Katholieke Universiteit Leuven. 2006*.
- [10] M. Calonder, V. Lepetit, M. Özuysal, T. Trzcinski, C. Strecha. "BRIEF: Computing a Local Binary Descriptor Very Fast". *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2012. Vol. 34, num. 7, p. 1281-1298*.
- [11] Alahi, Alexandre, Raphael Ortiz, and Pierre Vandergheynst. "Freak: Fast retina keypoint." *Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2012 IEEE Conference on. IEEE, 2012*.
- [12] Iago Suárez, Ghesn Sfeir, José M. Buenaposada, Luis Baumela. "BEBLID: Boosted efficient binary local image descriptor". *Pattern Recognition Letters. Volume 133, May 2020, Pg 366-372*.

## Referencias.

- [13] Freund, Yoav; Schapire, Robert E. "A decision-theoretic generalization of on-line learning and an application to boosting". *Journal of Computer and System Sciences*. 55: 119–139. 1997.
- [14] M. Muja and D. G. Lowe. "Fast approximate nearest neighbors with automatic algorithm configuration". In *VISAPP International Conference on Computer Vision Theory and Applications*. Pg. 331-340. 2009.
- [15] David M. Mount and Sunil Arya. "ANN: A Library for. Approximate Nearest Neighbor Searching." (<http://www.cs.umd.edu/~mount/ANN/>). 27 Enero 2010.
- [16] Martin A. Fischler y Robert C. Bolles. "Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography". *Comm. ACM*. 24 (6): 381–395. Enero 1981.
- [17] P.F. Alcantarilla. "KAZE features". In *European Conference Computer Vision*. Berlín. ECCV. Pg. 214-227. 2012.
- [18] Shengren Li, Nina Amenta. "Brute-Force k-Nearest Neighbors Search on the GPU". *SISAP: Proceeding og the 8th International Conference on Similarity and Applications*. Volume 9371. Pg. 259-270. Octubre 2015. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-25087-8\\_25](https://doi.org/10.1007/978-3-319-25087-8_25).
- [19] B. Delaunay. "Sur la sphere vide. A la mémoire de Georges Voronoi. Izvestia Akademii Nauk SSSR, Otdelenie Matematicheskikh i Estestvennykh Nauk". *Bulletin of Academy of Sciences of the USSR*, 7, págs. 793-800, 1934.
- [20] P.J. Rousseeuw and A.M. Leroy, "Robust Regression and Outlier Detection", *John Wiley & Sons, New York, 1987*.
- [21] P. H. S. Torr and A. Zisserman, "MLE-SAC: A new robust estimator with application to estimating image geometry," *Computer Vision and Image Understanding*, vol. 78, 2000.
- [22] Rousseeuw, P. J. "Least Median of Squares Regression". *Journal of the American Statistical Association*. 79 (388): Pg. 871-880. 1984.
- [23] Vassileios Balntas, Karel Lenc, Andrea Vedaldi y Krystian Mikolajczyk. "HPatches: un punto de referencia y evaluación de descriptores locales aprendidos y hechos a mano". *CVPR 2017*. [arXiv pdf] (<https://arxiv.org/pdf/1704.05939.pdf>).
- [24] Open CV. <https://opencv.org/>
- [25] (04,05,2016). Presentación aplicación de realidad aumentada en entornos urbanos. Tama Unizar. <https://tama.unizar.es/presentacion-aplicacion-de-realidad-aumentada-en-entornos-urbanos/>

## Anexo A, Comparativa métodos emparejamiento por fuerza bruta

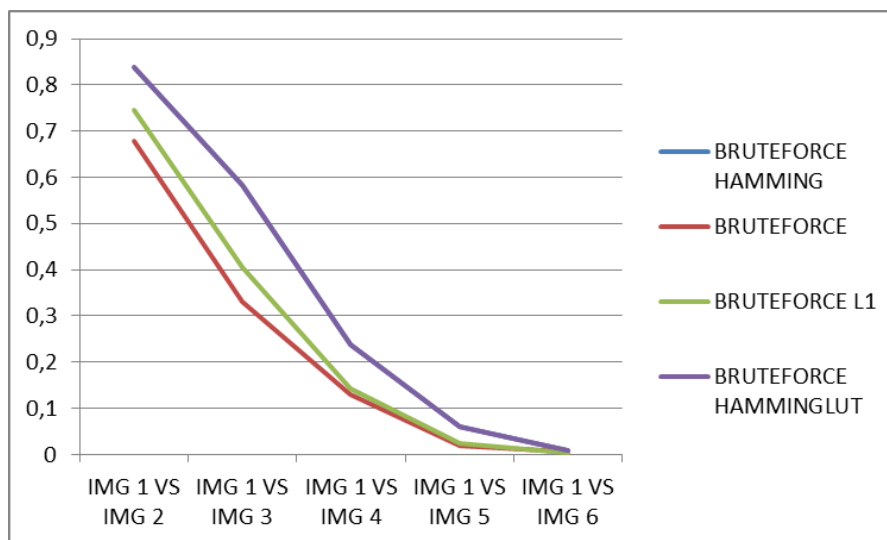
Gracias a OpenCV, es posible disponer de diversos algoritmos de emparejamiento por fuerza bruta implementados en Python. Realizando un estudio comparativo de los “keypoints” proporcionados por el detector descriptor ORB de varias imágenes entre los algoritmos de emparejamiento presente tales como BRUTEFORCE HAMMING, BRUTEFORCE, BRUTEFORCE L1 Y BRUTEFORCE HAMMINGLUT, obtenemos el número de emparejamientos “matches” y el número de correctos emparejamientos “inliers” (ver tabla 4).

La detección de correctos emparejamientos se realiza comparando los proporcionados por los algoritmos evaluados frente a los puntos proporcionados por la matriz homográfica. El umbral impuesto para la detección de verdaderos emparejamientos es de 10 píxeles, siendo este umbral la máxima distancia entre un punto proporcionado por emparejamiento de fuerza bruta y un punto homográfico.

La precisión de emparejamiento entre los algoritmos evaluados se puede visualizar en la gráfica 4, en ella se puede observar que BRUTEFORCE HAMMING y BRUTEFORCE HAMMINGLUT presentan en igualdad de condiciones los mismos resultados.

| PARAMETERS MATCHING  |                |                |                |                |                |     |
|--|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----|
| ORB  |                |                |                |                |                |     |
| inlier_threshold   | IMG 1 VS IMG 2 | IMG 1 VS IMG 3 | IMG 1 VS IMG 4 | IMG 1 VS IMG 5 | IMG 1 VS IMG 6 |     |
| <b>cv.DescriptorMatcher_create(cv.DescriptorMatcher_BRUTEFORCE_HAMMING)</b>    |                |                |                |                |                |     |
| nº KEYPOINTS   | 500            | 500            | 500            | 500            | 500            | 500 |
| MATCHES  | 387            | 291            | 240            | 230            | 236            |     |
| INLIERS  | 324            | 170            | 57             | 14             | 2              |     |
| INLIERS RATIO  | 0,837209302    | 0,58419244     | 0,2375         | 0,060869565    | 0,008474576    |     |
| <b>cv.DescriptorMatcher_create(cv.DescriptorMatcher_BRUTEFORCE)</b>            |                |                |                |                |                |     |
| nº KEYPOINTS   | 500            | 500            | 500            | 500            | 500            | 500 |
| MATCHES  | 317            | 235            | 209            | 215            | 200            |     |
| INLIERS  | 215            | 78             | 27             | 4              | 1              |     |
| INLIERS RATIO  | 0,678233438    | 0,331914894    | 0,129186603    | 0,018604651    | 0,005          |     |
| <b>cv.DescriptorMatcher_create(cv.DescriptorMatcher_BRUTEFORCE_L1)</b>         |                |                |                |                |                |     |
| nº KEYPOINTS   | 500            | 500            | 500            | 500            | 500            | 500 |
| MATCHES  | 368            | 294            | 267            | 250            | 244            |     |
| INLIERS  | 274            | 119            | 38             | 6              | 1              |     |
| INLIERS RATIO  | 0,744565217    | 0,404761905    | 0,142322097    | 0,024          | 0,004098361    |     |
| <b>cv.DescriptorMatcher_create(cv.DescriptorMatcher_BRUTEFORCE_HAMMINGLUT)</b> |                |                |                |                |                |     |
| nº KEYPOINTS   | 500            | 500            | 500            | 500            | 500            | 500 |
| MATCHES  | 387            | 291            | 240            | 230            | 236            |     |
| INLIERS  | 324            | 170            | 57             | 14             | 2              |     |
| INLIERS RATIO  | 0,837209302    | 0,58419244     | 0,2375         | 0,060869565    | 0,008474576    |     |

Tabla 4. Resultados comparativos por fuerza bruta.



Gráfica 4. Precisión de emparejamiento entre algoritmos de fuerza bruta.

## Anexo B, Evaluación de combinaciones de algoritmos de detección y descripción.

Las imágenes empleadas en el proceso comparativo de los detectores y descriptores pueden encontrarse en la base de datos Hpatches, siendo la siguiente imagen 26 un ejemplo de la secuencia de imágenes y estando numeradas del uno al seis.

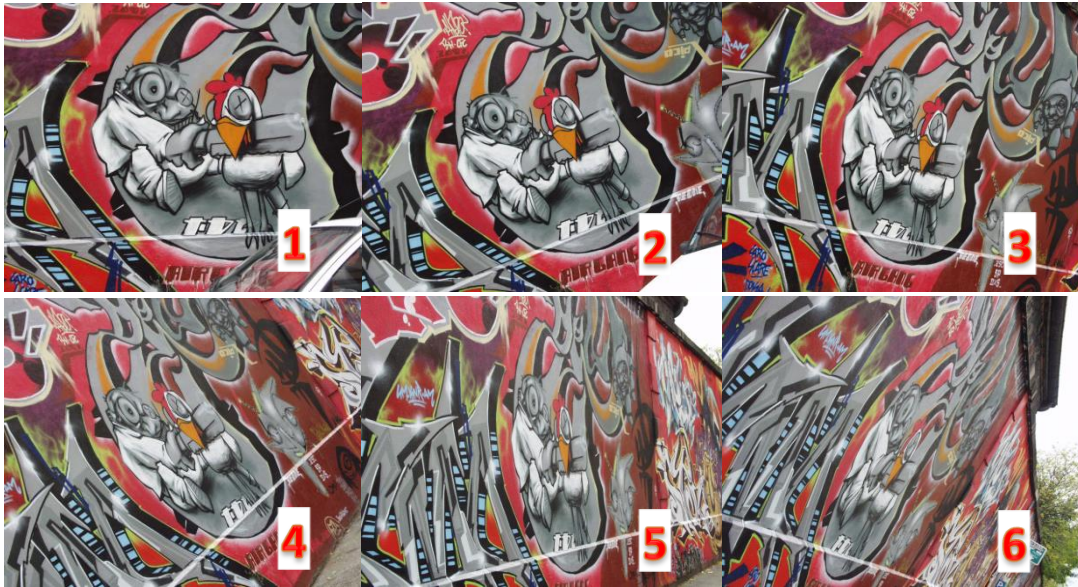


Imagen 26. Imágenes de la base de datos correspondiente a un grafiti.

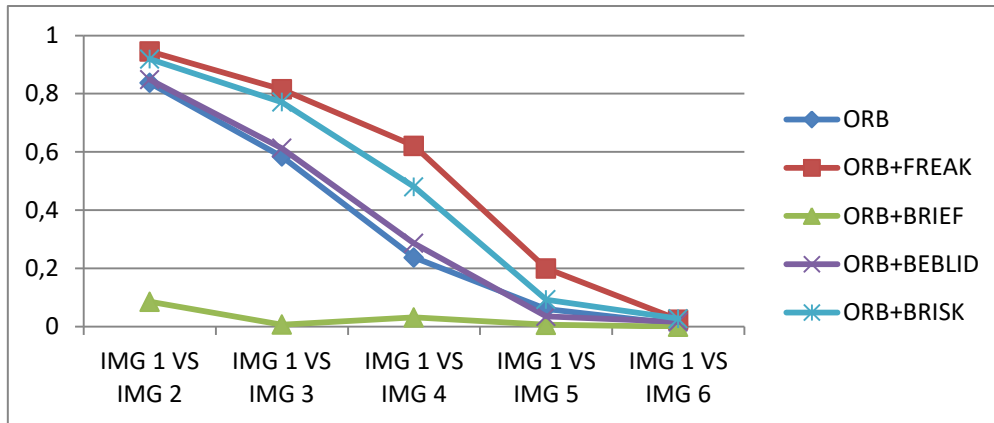
Los resultados obtenidos en el estudio de la combinaciones propuestas (ver tabla 1) a través de OpenCV, se encuentran en las siguientes tablas (tabla 6, tabla 7, tabla 8). En ellas se detallan muestran los emparejamientos “matches”, los puntos correctamente emparejados, “TP” o verdaderos positivos, los puntos emparejados erróneamente o falsos positivos “FP” y la precisión del método empleado, siendo la precisión (15)

$$\text{Precision} = \frac{TP}{TP + FP} \quad (15)$$

Estableciendo ORB como detector de las imágenes y como detector/descriptor, se realiza la comparación entre los descriptores propuestos, en las imágenes a evaluar (imagen 26), la precisión presentada en cada comparativa se presenta en la siguiente gráfica 5.

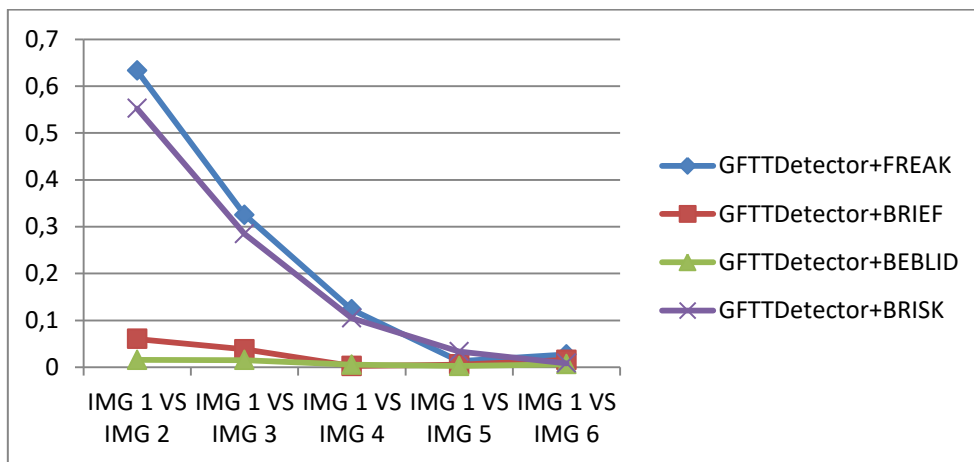


Anexo B, Evaluación de combinaciones de algoritmos de detección y descripción



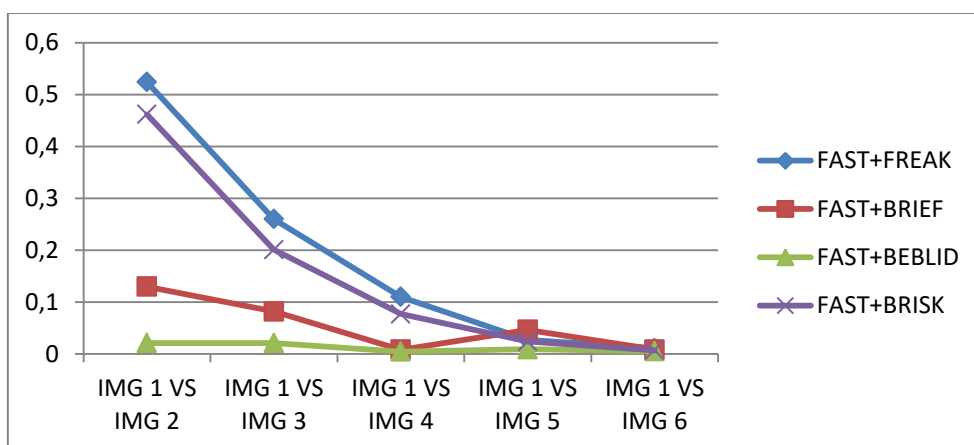
Gráfica 5: Precisión de los descriptores evaluados junto al detector ORB.

La precisión presente de los diversos descriptores para el detector GFTT se muestra en la gráfica 6.



Gráfica 6. Precisión de los descriptores evaluados junto al detector GFTT.

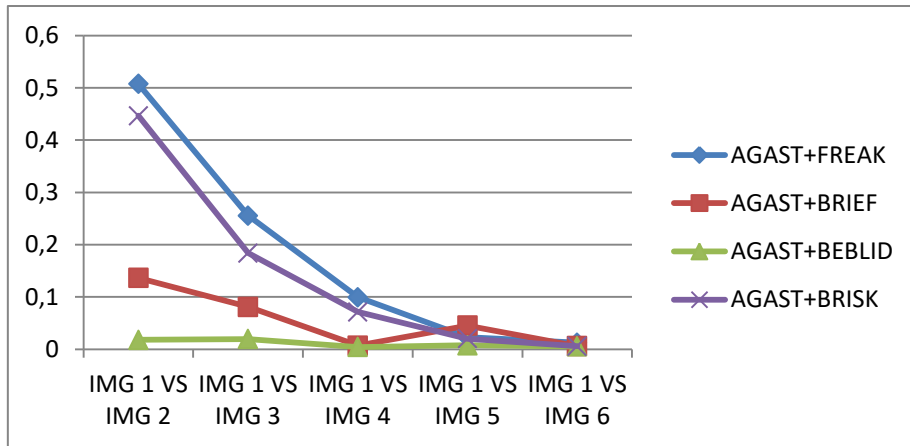
Para el detector FAST, la precisión se representa en la gráfica 7.



Gráfica 7. Precisión de los descriptores evaluados junto al detector FAST.

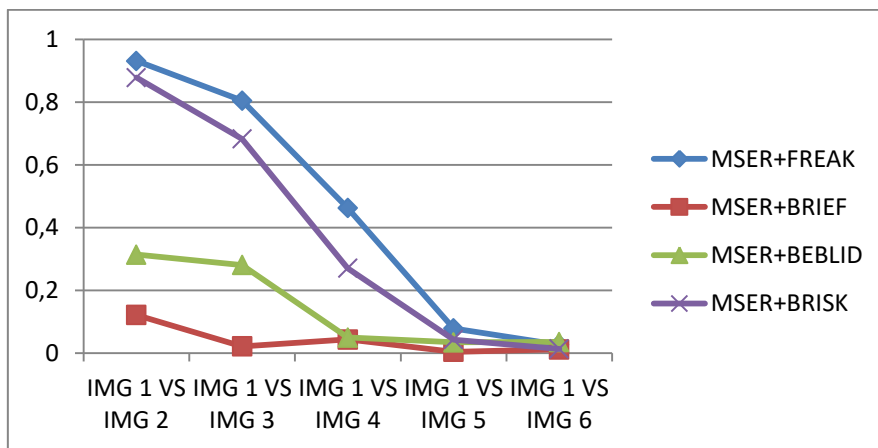
La precisión del detector AGAST, se puede observar en la gráfica 8.

Anexo B, Evaluación de combinaciones de algoritmos de detección y descripción



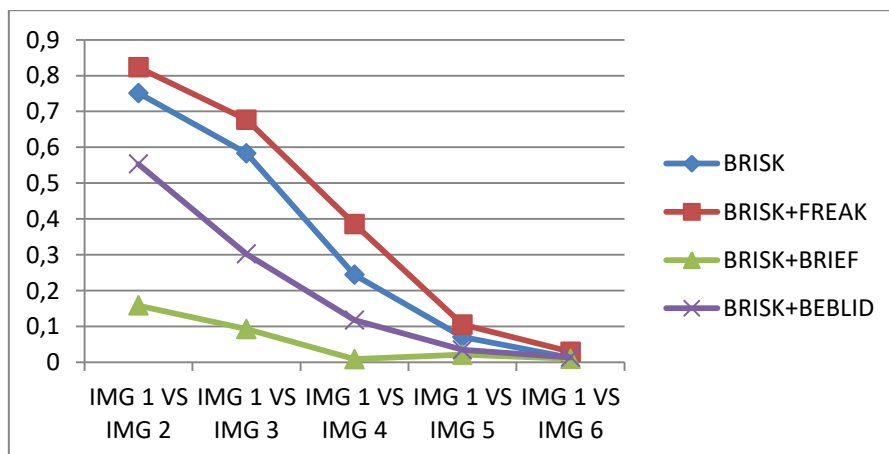
Gráfica 8. Precisión de los descriptores evaluados junto al detector AGAST.

Los resultados que presentan los descriptores junto al detector MSER están representados en la gráfica 9.



Gráfica 9. Precisión de los descriptores evaluados junto al detector MSER.

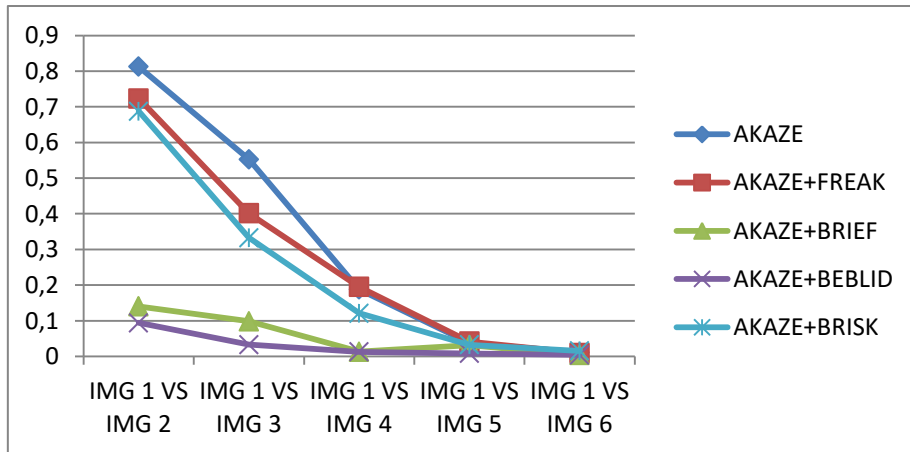
La gráfica 10 muestra los resultados del detector BRISK.



Gráfica 10. Precisión de los descriptores evaluados junto al detector BRISK.

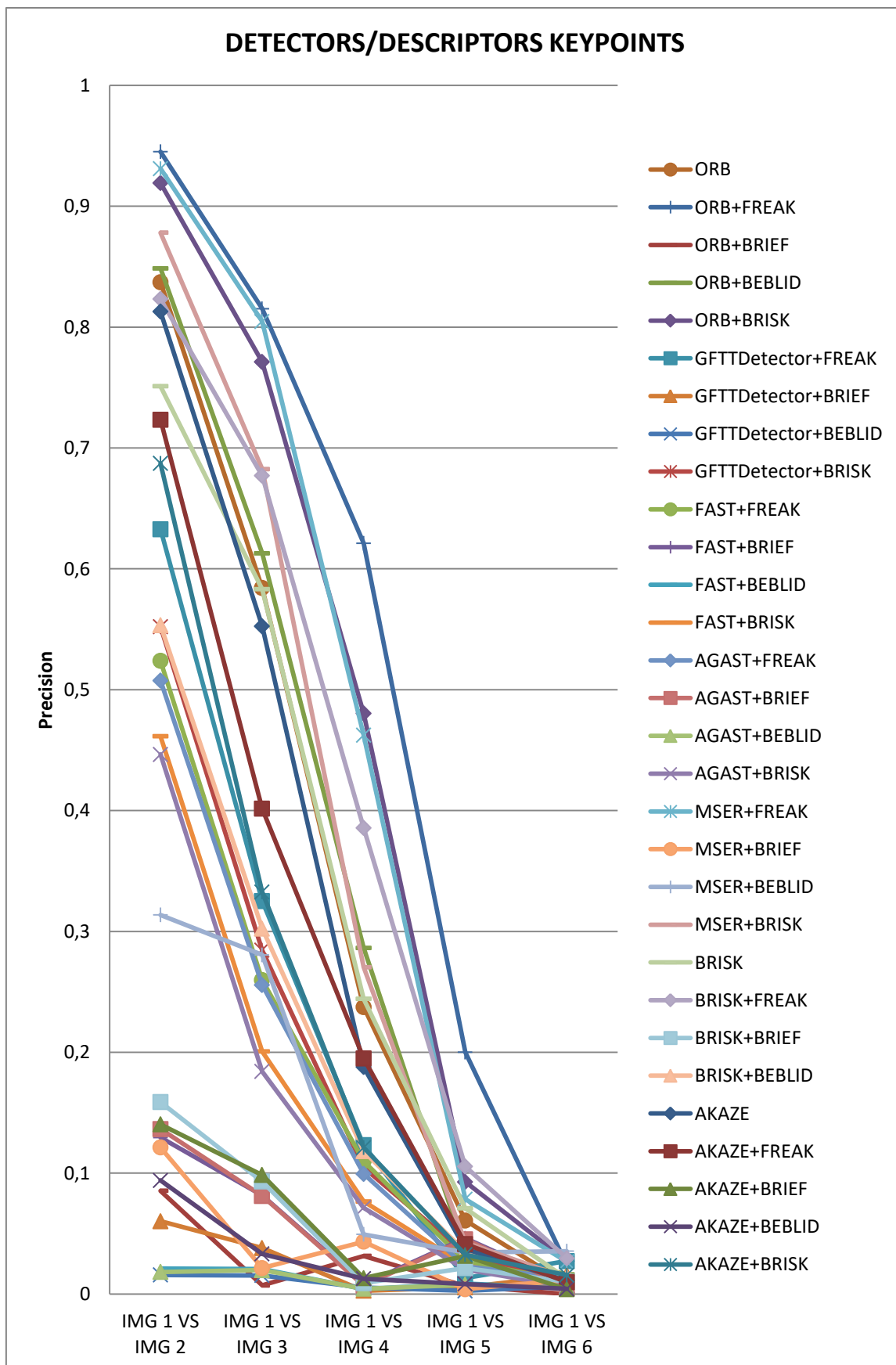
En cuanto a AKAZE ha sido usado tanto como detector como descriptor (ver gráfica 11).

Anexo B, Evaluación de combinaciones de algoritmos de detección y descripción



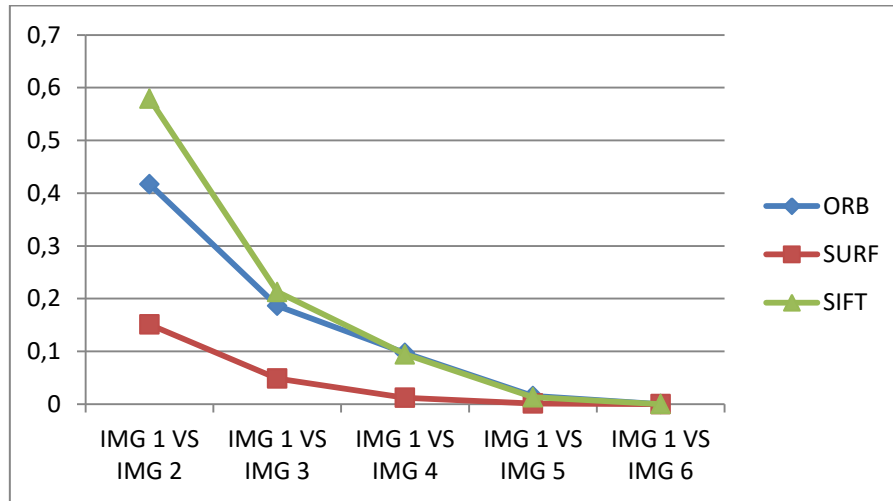
Gráfica 11. Precisión de los descriptores evaluados junto al detector AKAZE.

La comparativa grafica entre todos los métodos empleados puede apreciarse a continuación.



Gráfica 12. Precisión de los métodos de detección y extracción evaluados.

También se ha elaborado un estudio comparativo entre los métodos ORB, SIFT y SURF. Siendo estos algoritmos evaluados en Matlab, ya que por motivos de confidencialidad de patentes, no son de libre acceso a través de Python y OpenCV SIFT y SURF, los resultados obtenidos (ver tabla 5) pueden observarse a continuación.



Gráfica 13. Precisión de los detectores/descriptores ORB, SIFT y SURF.

|             |           | IMG 1 VS IMG 2 | IMG 1 VS IMG 3 | IMG 1 VS IMG 4 | IMG 1 VS IMG 5 | IMG 1 VS IMG 6 |
|-------------|-----------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| <b>ORB</b>  |           |                |                |                |                |                |
| RESULTADOS  | Matches   | 2597           | 590            | 247            | 130            | 92             |
|             | TP        | 1084           | 110            | 24             | 2              | 0              |
|             | FP        | 1513           | 480            | 223            | 128            | 92             |
|             | Precision | 0,417404698    | 0,186440678    | 0,097165992    | 0,015384615    | 0              |
| <b>SURF</b> |           |                |                |                |                |                |
| RESULTADOS  | Matches   | 1463           | 1463           | 1463           | 1463           | 1463           |
|             | TP        | 221            | 71             | 18             | 2              | 0              |
|             | FP        | 1242           | 1392           | 1445           | 1461           | 1463           |
|             | Precision | 0,151059467    | 0,048530417    | 0,012303486    | 0,001367054    | 0              |
| <b>SIFT</b> |           |                |                |                |                |                |
| RESULTADOS  | Matches   | 844            | 442            | 159            | 77             | 57             |
|             | TP        | 489            | 94             | 15             | 1              | 0              |
|             | FP        | 355            | 348            | 144            | 76             | 57             |
|             | Precision | 0,579383886    | 0,212669683    | 0,094339623    | 0,012987013    | 0              |

Tabla 5. Resultados detectores/descriptores SIFT, SURF y ORB.

Anexo B, Evaluación de combinaciones de algoritmos de detección y descripción

|                            | IMG 1 VS IMG 2 | IMG 1 VS IMG 3 | IMG 1 VS IMG 4 | IMG 1 VS IMG 5 | IMG 1 VS IMG 6 |             |
|----------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-------------|
| <b>ORB</b>                 |                |                |                |                |                |             |
| RESULTADOS                 | Matches        | 387            | 291            | 240            | 230            | 236         |
|                            | TP             | 324            | 170            | 57             | 14             | 2           |
|                            | FP             | 63             | 121            | 183            | 216            | 234         |
|                            | Precision      | 0,837209302    | 0,58419244     | 0,2375         | 0,060869565    | 0,008474576 |
| <b>ORB+FREAK</b>           |                |                |                |                |                |             |
| RESULTADOS                 | Matches        | 237            | 184            | 132            | 130            | 125         |
|                            | TP             | 224            | 150            | 82             | 26             | 3           |
|                            | FP             | 13             | 34             | 50             | 104            | 122         |
|                            | Precision      | 0,945147679    | 0,815217391    | 0,621212121    | 0,2            | 0,024       |
| <b>ORB+BRISK</b>           |                |                |                |                |                |             |
| RESULTADOS                 | Matches        | 164            | 140            | 127            | 151            | 154         |
|                            | TP             | 14             | 1              | 4              | 1              | 0           |
|                            | FP             | 150            | 139            | 123            | 150            | 154         |
|                            | Precision      | 0,085365854    | 0,007142857    | 0,031496063    | 0,006622517    | 0           |
| <b>ORB+BEBLID</b>          |                |                |                |                |                |             |
| RESULTADOS                 | Matches        | 370            | 279            | 206            | 172            | 185         |
|                            | TP             | 314            | 171            | 59             | 6              | 3           |
|                            | FP             | 56             | 108            | 147            | 166            | 182         |
|                            | Precision      | 0,848648649    | 0,612903226    | 0,286407767    | 0,034883721    | 0,016216216 |
| <b>ORB+BRISK</b>           |                |                |                |                |                |             |
| RESULTADOS                 | Matches        | 371            | 271            | 179            | 151            | 147         |
|                            | TP             | 341            | 209            | 86             | 14             | 4           |
|                            | FP             | 30             | 62             | 93             | 137            | 143         |
|                            | Precision      | 0,919137466    | 0,771217712    | 0,480446927    | 0,092715232    | 0,027210884 |
| <b>GFTTDetector+FREAK</b>  |                |                |                |                |                |             |
| RESULTADOS                 | Matches        | 640            | 529            | 463            | 455            | 147         |
|                            | TP             | 405            | 172            | 57             | 6              | 4           |
|                            | FP             | 235            | 357            | 406            | 449            | 143         |
|                            | Precision      | 0,6328125      | 0,325141777    | 0,123110151    | 0,013186813    | 0,027210884 |
| <b>GFTTDetector+BRISK</b>  |                |                |                |                |                |             |
| RESULTADOS                 | Matches        | 382            | 421            | 374            | 363            | 387         |
|                            | TP             | 23             | 16             | 1              | 2              | 6           |
|                            | FP             | 359            | 405            | 373            | 361            | 381         |
|                            | Precision      | 0,060209424    | 0,038004751    | 0,002673797    | 0,005509642    | 0,015503876 |
| <b>GFTTDetector+BEBLID</b> |                |                |                |                |                |             |
| RESULTADOS                 | Matches        | 763            | 716            | 743            | 767            | 788         |
|                            | TP             | 12             | 11             | 4              | 2              | 5           |
|                            | FP             | 751            | 705            | 739            | 765            | 783         |
|                            | Precision      | 0,015727392    | 0,015363128    | 0,00538358     | 0,002607562    | 0,006345178 |
| <b>GFTTDetector+BRISK</b>  |                |                |                |                |                |             |
| RESULTADOS                 | Matches        | 652            | 531            | 487            | 482            | 473         |
|                            | TP             | 360            | 151            | 51             | 16             | 4           |
|                            | FP             | 292            | 380            | 436            | 466            | 469         |
|                            | Precision      | 0,552147239    | 0,284369115    | 0,104722793    | 0,033195021    | 0,00845666  |

Tabla 6. Resultados detectores y descriptores evaluados parte 1.

## Anexo B, Evaluación de combinaciones de algoritmos de detección y descripción

|            |           | IMG 1 VS IMG 2      | IMG 1 VS IMG 3 | IMG 1 VS IMG 4 | IMG 1 VS IMG 5 | IMG 1 VS IMG 6 |
|------------|-----------|---------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|            |           | <b>FAST+FREAK</b>   |                |                |                |                |
| RESULTADOS | Matches   | 4085                | 3446           | 3241           | 3178           | 3055           |
|            | TP        | 2140                | 895            | 356            | 86             | 33             |
|            | FP        | 1945                | 2551           | 2885           | 3092           | 3022           |
|            | Precision | 0,523867809         | 0,259721416    | 0,109842641    | 0,027061045    | 0,010801964    |
|            |           | <b>FAST+BRIEF</b>   |                |                |                |                |
| RESULTADOS | Matches   | 2858                | 2792           | 2746           | 2689           | 2650           |
|            | TP        | 370                 | 228            | 22             | 124            | 22             |
|            | FP        | 2488                | 2564           | 2724           | 2565           | 2628           |
|            | Precision | 0,129461162         | 0,081661891    | 0,008011653    | 0,046113797    | 0,008301887    |
|            |           | <b>FAST+BEBLID</b>  |                |                |                |                |
| RESULTADOS | Matches   | 4430                | 4391           | 4384           | 4384           | 4351           |
|            | TP        | 93                  | 91             | 18             | 38             | 21             |
|            | FP        | 4337                | 4300           | 4366           | 4346           | 4330           |
|            | Precision | 0,020993228         | 0,020724209    | 0,004105839    | 0,008667883    | 0,004826477    |
|            |           | <b>FAST+BRISK</b>   |                |                |                |                |
| RESULTADOS | Matches   | 4022                | 3443           | 3210           | 3203           | 3118           |
|            | TP        | 1856                | 691            | 246            | 76             | 21             |
|            | FP        | 2166                | 2752           | 2964           | 3127           | 3097           |
|            | Precision | 0,461461959         | 0,200697067    | 0,076635514    | 0,023727755    | 0,006735087    |
|            |           | <b>AGAST+FREAK</b>  |                |                |                |                |
| RESULTADOS | Matches   | 4232                | 3547           | 3349           | 3311           | 3144           |
|            | TP        | 2148                | 907            | 333            | 76             | 40             |
|            | FP        | 2084                | 2640           | 3016           | 3235           | 3104           |
|            | Precision | 0,507561437         | 0,25570905     | 0,099432666    | 0,02295379     | 0,012722646    |
|            |           | <b>AGAST+BRIEF</b>  |                |                |                |                |
| RESULTADOS | Matches   | 2997                | 2873           | 2865           | 2849           | 2776           |
|            | TP        | 409                 | 233            | 20             | 129            | 17             |
|            | FP        | 2588                | 2640           | 2845           | 2720           | 2759           |
|            | Precision | 0,136469803         | 0,081099896    | 0,006980803    | 0,045279045    | 0,006123919    |
|            |           | <b>AGAST+BEBLID</b> |                |                |                |                |
| RESULTADOS | Matches   | 4651                | 4657           | 4629           | 4686           | 4582           |
|            | TP        | 85                  | 92             | 20             | 36             | 26             |
|            | FP        | 4566                | 4565           | 4609           | 4650           | 4556           |
|            | Precision | 0,01827564          | 0,019755207    | 0,004320588    | 0,007682458    | 0,005674378    |
|            |           | <b>AGAST+BRISK</b>  |                |                |                |                |
| RESULTADOS | Matches   | 4175                | 3574           | 3323           | 3358           | 3183           |
|            | TP        | 1864                | 658            | 237            | 68             | 19             |
|            | FP        | 2311                | 2916           | 3086           | 3290           | 3164           |
|            | Precision | 0,446467066         | 0,184107443    | 0,071321095    | 0,020250149    | 0,005969211    |
|            |           | <b>MSER+FREAK</b>   |                |                |                |                |
| RESULTADOS | Matches   | 581                 | 430            | 346            | 344            | 300            |
|            | TP        | 541                 | 346            | 160            | 27             | 8              |
|            | FP        | 40                  | 84             | 186            | 317            | 292            |
|            | Precision | 0,931153184         | 0,804651163    | 0,462427746    | 0,078488372    | 0,026666667    |
|            |           | <b>MSER+BRIEF</b>   |                |                |                |                |
| RESULTADOS | Matches   | 305                 | 373            | 300            | 247            | 258            |
|            | TP        | 37                  | 8              | 13             | 1              | 3              |
|            | FP        | 268                 | 365            | 287            | 246            | 255            |
|            | Precision | 0,121311475         | 0,021447721    | 0,043333333    | 0,004048583    | 0,011627907    |
|            |           | <b>MSER+BEBLID</b>  |                |                |                |                |
| RESULTADOS | Matches   | 373                 | 360            | 385            | 378            | 339            |
|            | TP        | 117                 | 101            | 19             | 13             | 12             |
|            | FP        | 256                 | 259            | 366            | 365            | 327            |
|            | Precision | 0,313672922         | 0,280555556    | 0,049350649    | 0,034391534    | 0,03539823     |
|            |           | <b>MSER+BRISK</b>   |                |                |                |                |
| RESULTADOS | Matches   | 484                 | 252            | 281            | 281            | 298            |
|            | TP        | 425                 | 172            | 76             | 12             | 4              |
|            | FP        | 59                  | 80             | 205            | 269            | 294            |
|            | Precision | 0,878099174         | 0,682539683    | 0,270462633    | 0,042704626    | 0,013422819    |

Tabla 7. Resultados detectores y descriptores evaluados parte 2.

Anexo B, Evaluación de combinaciones de algoritmos de detección y descripción

|                     |           | IMG 1 VS IMG 2 | IMG 1 VS IMG 3 | IMG 1 VS IMG 4 | IMG 1 VS IMG 5 | IMG 1 VS IMG 6 |
|---------------------|-----------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| <b>BRISK</b>        |           |                |                |                |                |                |
| RESULTADOS          | Matches   | 2386           | 1936           | 1503           | 1327           | 1277           |
|                     | TP        | 1792           | 1129           | 367            | 94             | 16             |
|                     | FP        | 594            | 807            | 1136           | 1233           | 1261           |
|                     | Precision | 0,751047779    | 0,583161157    | 0,24417831     | 0,070836473    | 0,012529366    |
| <b>BRISK+FREAK</b>  |           |                |                |                |                |                |
| RESULTADOS          | Matches   | 2121           | 1793           | 1400           | 1270           | 1220           |
|                     | TP        | 1746           | 1214           | 540            | 134            | 36             |
|                     | FP        | 375            | 579            | 860            | 1136           | 1184           |
|                     | Precision | 0,823196605    | 0,677077524    | 0,385714286    | 0,105511811    | 0,029508197    |
| <b>BRISK+BRIEF</b>  |           |                |                |                |                |                |
| RESULTADOS          | Matches   | 1354           | 1354           | 1337           | 1260           | 1287           |
|                     | TP        | 215            | 126            | 12             | 27             | 13             |
|                     | FP        | 1139           | 1228           | 1325           | 1233           | 1274           |
|                     | Precision | 0,158788774    | 0,093057607    | 0,008975318    | 0,021428571    | 0,01010101     |
| <b>BRISK+BEBLID</b> |           |                |                |                |                |                |
| RESULTADOS          | Matches   | 1621           | 1323           | 1176           | 1092           | 1076           |
|                     | TP        | 897            | 400            | 139            | 38             | 15             |
|                     | FP        | 724            | 923            | 1037           | 1054           | 1061           |
|                     | Precision | 0,553362122    | 0,302343159    | 0,118197279    | 0,034798535    | 0,01394052     |
| <b>AKAZE</b>        |           |                |                |                |                |                |
| RESULTADOS          | Matches   | 1849           | 1359           | 1113           | 1021           | 1000           |
|                     | TP        | 1503           | 751            | 209            | 38             | 11             |
|                     | FP        | 346            | 608            | 904            | 983            | 989            |
|                     | Precision | 0,812871823    | 0,552612215    | 0,187780773    | 0,037218413    | 0,011          |
| <b>AKAZE+FREAK</b>  |           |                |                |                |                |                |
| RESULTADOS          | Matches   | 1833           | 1472           | 1267           | 1235           | 1223           |
|                     | TP        | 1326           | 591            | 247            | 51             | 12             |
|                     | FP        | 507            | 881            | 1020           | 1184           | 1211           |
|                     | Precision | 0,723404255    | 0,401494565    | 0,194948698    | 0,041295547    | 0,009811938    |
| <b>AKAZE+BRIEF</b>  |           |                |                |                |                |                |
| RESULTADOS          | Matches   | 1112           | 1168           | 1063           | 1110           | 1031           |
|                     | TP        | 156            | 115            | 14             | 35             | 4              |
|                     | FP        | 956            | 1053           | 1049           | 1075           | 1027           |
|                     | Precision | 0,14028777     | 0,098458904    | 0,013170273    | 0,031531532    | 0,003879728    |
| <b>AKAZE+BEBLID</b> |           |                |                |                |                |                |
| RESULTADOS          | Matches   | 787            | 724            | 714            | 729            | 714            |
|                     | TP        | 74             | 24             | 9              | 6              | 3              |
|                     | FP        | 713            | 700            | 705            | 723            | 711            |
|                     | Precision | 0,094027954    | 0,033149171    | 0,012605042    | 0,008230453    | 0,004201681    |
| <b>AKAZE+BRISK</b>  |           |                |                |                |                |                |
| RESULTADOS          | Matches   | 1717           | 1374           | 1230           | 1197           | 1150           |
|                     | TP        | 1180           | 457            | 149            | 39             | 18             |
|                     | FP        | 537            | 917            | 1081           | 1158           | 1132           |
|                     | Precision | 0,687245195    | 0,332605531    | 0,121138211    | 0,032581454    | 0,015652174    |

Tabla 8. Resultados detectores y descriptores evaluados parte 3.



## Anexo B, Evaluación de combinaciones de algoritmos de detección y descripción

Las combinaciones de detectores y descriptores con mayor precisión sobre la secuencia de imágenes presente en la imagen 26 han sido:

- ORB
- ORB Y FREAK
- ORB Y BEBLID
- ORB Y BRISK
- MSER Y FREAK
- MSER Y BRISK
- BRISK
- BRISK Y FREAK
- AKAZE

Estas combinaciones se han evaluado sobre las secuencias de imágenes presentes en la imagen 27 e imagen 28. Los resultados obtenidos sobre ambas secuencias se encuentran presentes en la tabla 9 y la tabla 10.

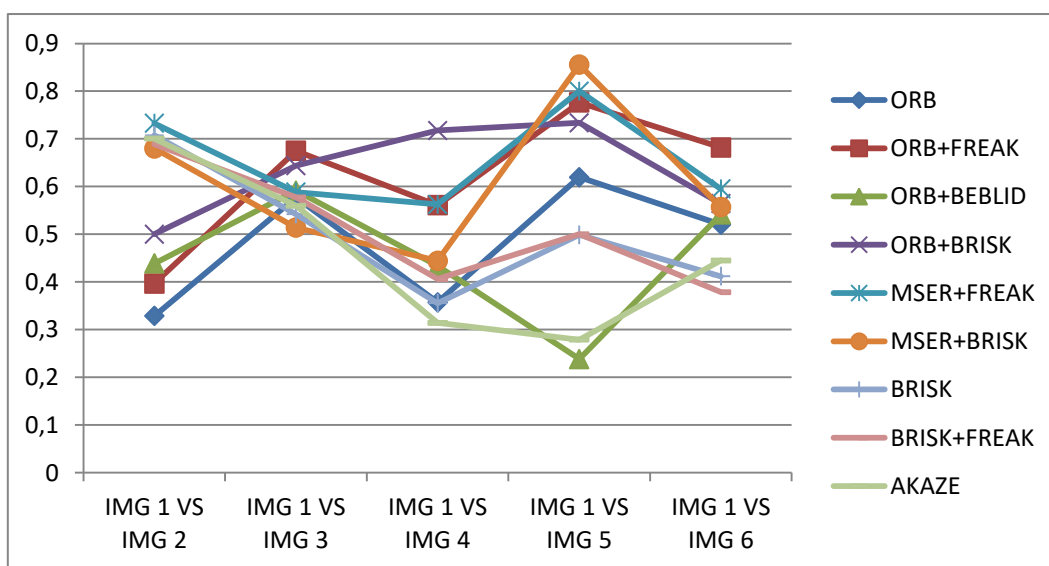


Imagen 27. Secuencia de imágenes YURI del repositorio HPatches.

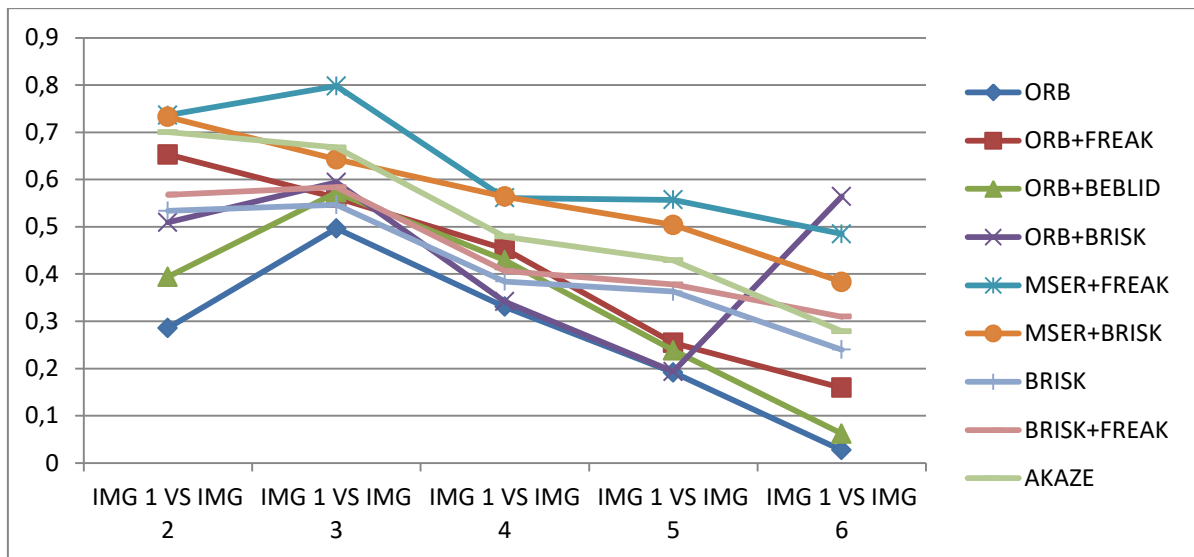


Imagen 28. Secuencia de imágenes WOMAN del repositorio HPatches.

La precisión (15) sobre la secuencia de la imagen 27 puede observarse en la siguiente gráfica 14, mientras que la de la secuencia de la imagen 28 se encuentra en la gráfica 15.



Gráfica 14. Precisión de los métodos de detección y extracción de "keypoints" evaluados sobre la secuencia de imágenes YURI de HPatches.



Gráfica 15. Precisión de los métodos de detección y extracción de "keypoints" evaluados sobre la secuencia de imágenes WOMAN de HPatches.

## Anexo B, Evaluación de combinaciones de algoritmos de detección y descripción

|                    |           | IMG 1 VS IMG 2 | IMG 1 VS IMG 3 | IMG 1 VS IMG 4 | IMG 1 VS IMG 5 | IMG 1 VS IMG 6 |
|--------------------|-----------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| <b>ORB</b>         |           |                |                |                |                |                |
| RESULTADOS         | Matches   | 277            | 272            | 266            | 326            | 296            |
|                    | TP        | 91             | 157            | 95             | 202            | 154            |
|                    | FP        | 186            | 115            | 171            | 124            | 142            |
|                    | Precision | 0,328519856    | 0,577205882    | 0,357142857    | 0,619631902    | 0,52027027     |
| <b>ORB+FREAK</b>   |           |                |                |                |                |                |
| RESULTADOS         | Matches   | 184            | 197            | 164            | 219            | 173            |
|                    | TP        | 73             | 133            | 92             | 170            | 118            |
|                    | FP        | 111            | 64             | 72             | 49             | 55             |
|                    | Precision | 0,39673913     | 0,675126904    | 0,56097561     | 0,776255708    | 0,682080925    |
| <b>ORB+BEBLID</b>  |           |                |                |                |                |                |
| RESULTADOS         | Matches   | 212            | 257            | 219            | 193            | 242            |
|                    | TP        | 93             | 152            | 95             | 46             | 131            |
|                    | FP        | 119            | 105            | 124            | 147            | 111            |
|                    | Precision | 0,438679245    | 0,591439689    | 0,433789954    | 0,238341969    | 0,541322314    |
| <b>ORB+BRISK</b>   |           |                |                |                |                |                |
| RESULTADOS         | Matches   | 206            | 233            | 262            | 259            | 234            |
|                    | TP        | 103            | 150            | 188            | 190            | 132            |
|                    | FP        | 103            | 83             | 74             | 69             | 102            |
|                    | Precision | 0,5            | 0,643776824    | 0,717557252    | 0,733590734    | 0,564102564    |
| <b>MSER+FREAK</b>  |           |                |                |                |                |                |
| RESULTADOS         | Matches   | 86             | 68             | 64             | 95             | 79             |
|                    | TP        | 63             | 40             | 36             | 76             | 47             |
|                    | FP        | 23             | 28             | 28             | 19             | 32             |
|                    | Precision | 0,73255814     | 0,588235294    | 0,5625         | 0,8            | 0,594936709    |
| <b>MSER+BRISK</b>  |           |                |                |                |                |                |
| RESULTADOS         | Matches   | 100            | 72             | 45             | 97             | 88             |
|                    | TP        | 68             | 37             | 20             | 83             | 49             |
|                    | FP        | 32             | 35             | 25             | 14             | 39             |
|                    | Precision | 0,68           | 0,513888889    | 0,444444444    | 0,855670103    | 0,556818182    |
| <b>BRISK</b>       |           |                |                |                |                |                |
| RESULTADOS         | Matches   | 482            | 452            | 391            | 459            | 408            |
|                    | TP        | 341            | 245            | 139            | 229            | 168            |
|                    | FP        | 141            | 207            | 252            | 230            | 240            |
|                    | Precision | 0,70746888     | 0,542035398    | 0,355498721    | 0,498910675    | 0,411764706    |
| <b>BRISK+FREAK</b> |           |                |                |                |                |                |
| RESULTADOS         | Matches   | 450            | 421            | 394            | 396            | 391            |
|                    | TP        | 310            | 243            | 160            | 198            | 148            |
|                    | FP        | 140            | 178            | 234            | 198            | 243            |
|                    | Precision | 0,688888889    | 0,57719715     | 0,406091371    | 0,5            | 0,378516624    |
| <b>AKAZE</b>       |           |                |                |                |                |                |
| RESULTADOS         | Matches   | 888            | 675            | 522            | 638            | 627            |
|                    | TP        | 622            | 378            | 164            | 178            | 279            |
|                    | FP        | 266            | 297            | 358            | 460            | 348            |
|                    | Precision | 0,70045045     | 0,56           | 0,314176245    | 0,278996865    | 0,444976077    |

**Tabla 9. Resultados detectores y descriptores evaluados en la secuencia de imágenes YURI de la base de datos HPaches.**

Anexo B, Evaluación de combinaciones de algoritmos de detección y descripción

|                    |           | IMG 1 VS IMG 2 | IMG 1 VS IMG 3 | IMG 1 VS IMG 4 | IMG 1 VS IMG 5 | IMG 1 VS IMG 6 |
|--------------------|-----------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| <b>ORB</b>         |           |                |                |                |                |                |
| RESULTADOS         | Matches   | 245            | 276            | 242            | 214            | 221            |
|                    | TP        | 70             | 137            | 80             | 41             | 6              |
|                    | FP        | 175            | 139            | 162            | 173            | 215            |
|                    | Precision | 0,285714286    | 0,496376812    | 0,330578512    | 0,191588785    | 0,027149321    |
| <b>ORB+FREAK</b>   |           |                |                |                |                |                |
| RESULTADOS         | Matches   | 72             | 57             | 53             | 59             | 44             |
|                    | TP        | 47             | 32             | 24             | 15             | 7              |
|                    | FP        | 25             | 25             | 29             | 44             | 37             |
|                    | Precision | 0,652777778    | 0,561403509    | 0,452830189    | 0,254237288    | 0,159090909    |
| <b>ORB+BEBLID</b>  |           |                |                |                |                |                |
| RESULTADOS         | Matches   | 198            | 255            | 205            | 193            | 145            |
|                    | TP        | 78             | 146            | 88             | 46             | 9              |
|                    | FP        | 120            | 109            | 117            | 147            | 136            |
|                    | Precision | 0,393939394    | 0,57254902     | 0,429268293    | 0,238341969    | 0,062068966    |
| <b>ORB+BRISK</b>   |           |                |                |                |                |                |
| RESULTADOS         | Matches   | 110            | 133            | 123            | 93             | 234            |
|                    | TP        | 56             | 79             | 42             | 18             | 132            |
|                    | FP        | 54             | 54             | 81             | 75             | 102            |
|                    | Precision | 0,509090909    | 0,593984962    | 0,341463415    | 0,193548387    | 0,564102564    |
| <b>MSER+FREAK</b>  |           |                |                |                |                |                |
| RESULTADOS         | Matches   | 182            | 178            | 164            | 149            | 163            |
|                    | TP        | 134            | 142            | 92             | 83             | 79             |
|                    | FP        | 48             | 36             | 72             | 66             | 84             |
|                    | Precision | 0,736263736    | 0,797752809    | 0,56097561     | 0,55704698     | 0,484662577    |
| <b>MSER+BRISK</b>  |           |                |                |                |                |                |
| RESULTADOS         | Matches   | 213            | 154            | 133            | 133            | 120            |
|                    | TP        | 156            | 99             | 75             | 67             | 46             |
|                    | FP        | 57             | 55             | 58             | 66             | 74             |
|                    | Precision | 0,732394366    | 0,642857143    | 0,563909774    | 0,503759398    | 0,383333333    |
| <b>BRISK</b>       |           |                |                |                |                |                |
| RESULTADOS         | Matches   | 1203           | 1162           | 1075           | 1011           | 959            |
|                    | TP        | 642            | 635            | 413            | 367            | 230            |
|                    | FP        | 561            | 527            | 662            | 644            | 729            |
|                    | Precision | 0,533665835    | 0,546471601    | 0,384186047    | 0,363006924    | 0,23983316     |
| <b>BRISK+FREAK</b> |           |                |                |                |                |                |
| RESULTADOS         | Matches   | 1034           | 1007           | 394            | 860            | 856            |
|                    | TP        | 587            | 588            | 160            | 325            | 265            |
|                    | FP        | 447            | 419            | 234            | 535            | 591            |
|                    | Precision | 0,567698259    | 0,583912612    | 0,406091371    | 0,377906977    | 0,309579439    |
| <b>AKAZE</b>       |           |                |                |                |                |                |
| RESULTADOS         | Matches   | 888            | 843            | 741            | 709            | 638            |
|                    | TP        | 622            | 563            | 355            | 304            | 178            |
|                    | FP        | 266            | 280            | 386            | 405            | 460            |
|                    | Precision | 0,70045045     | 0,667852906    | 0,479082321    | 0,42877292     | 0,278996865    |

Tabla 10. Resultados detectores y descriptores evaluados en la secuencia de imágenes WOMAN de la base de datos HPaches.

## Anexo C, Direcciones invariantes.

En este anexo se detalla el estudio realizado entre las direcciones de los vértices al incentro o baricentro.

Como partida, se han tomado secuencias de imágenes similares a las representadas en la imagen 26, con una imagen de partida y varias imágenes con cambios de enfoque, iluminación, intensidad, etc.

Cada triangulación en la imagen de partida se proyecta de forma homográfica en el resto de imágenes, obteniéndose la proyección más precisa. Se obtienen los gradientes de cada uno, y con ello las direcciones de cada pixel que conforman cada triangulación. Tras ellos se elaboran histogramas de las orientaciones, con intervalos de 10°. Una vez se dispone de los histogramas, se impone el valor máximo como la dirección de los vértices de cada triangulo. Con esta dirección de cada vértice se obtiene el ángulo que se conforma con el incentro y el baricentro. Este proceso puede apreciarse en la imagen 29 y en la imagen 30.

En la siguiente tabla 11, podemos encontrar un ejemplo de los ángulos invariantes que se conforman en los triángulos de las imágenes anteriormente mencionadas (ver imagen 29 e imagen 30). Como resultado del cálculo entre el ángulo de cada vértice y el incentro o baricentro de cada triangulo.

|         |         | DIFERENCIAS |       |        |        |        |            |        |        |        |        |
|---------|---------|-------------|-------|--------|--------|--------|------------|--------|--------|--------|--------|
|         |         | INCENTRO    |       |        |        |        | BARICENTRO |        |        |        |        |
| MUESTRA | VERTICE | 6           | 5     | 4      | 3      | 2      | 6          | 5      | 4      | 3      | 2      |
| 1       | 1       | 21,34       | 21,24 | 2,6    | -2,29  | -14,23 | 24,29      | 24,72  | 6,35   | 0,73   | -12,93 |
|         | 2       | -8,05       | -3,36 | -15,05 | -13,98 | -18,76 | -5,18      | -0,97  | -13,31 | -12,96 | -18,59 |
|         | 3       | 2,22        | 4,42  | -10,6  | -11,57 | -17,93 | -31,09     | -19,45 | -24,88 | -18,88 | -19,63 |

**Tabla 11. Ángulo entre dirección de vértice e incentro/baricentro.**

Anexo C, Direcciones invariantes.

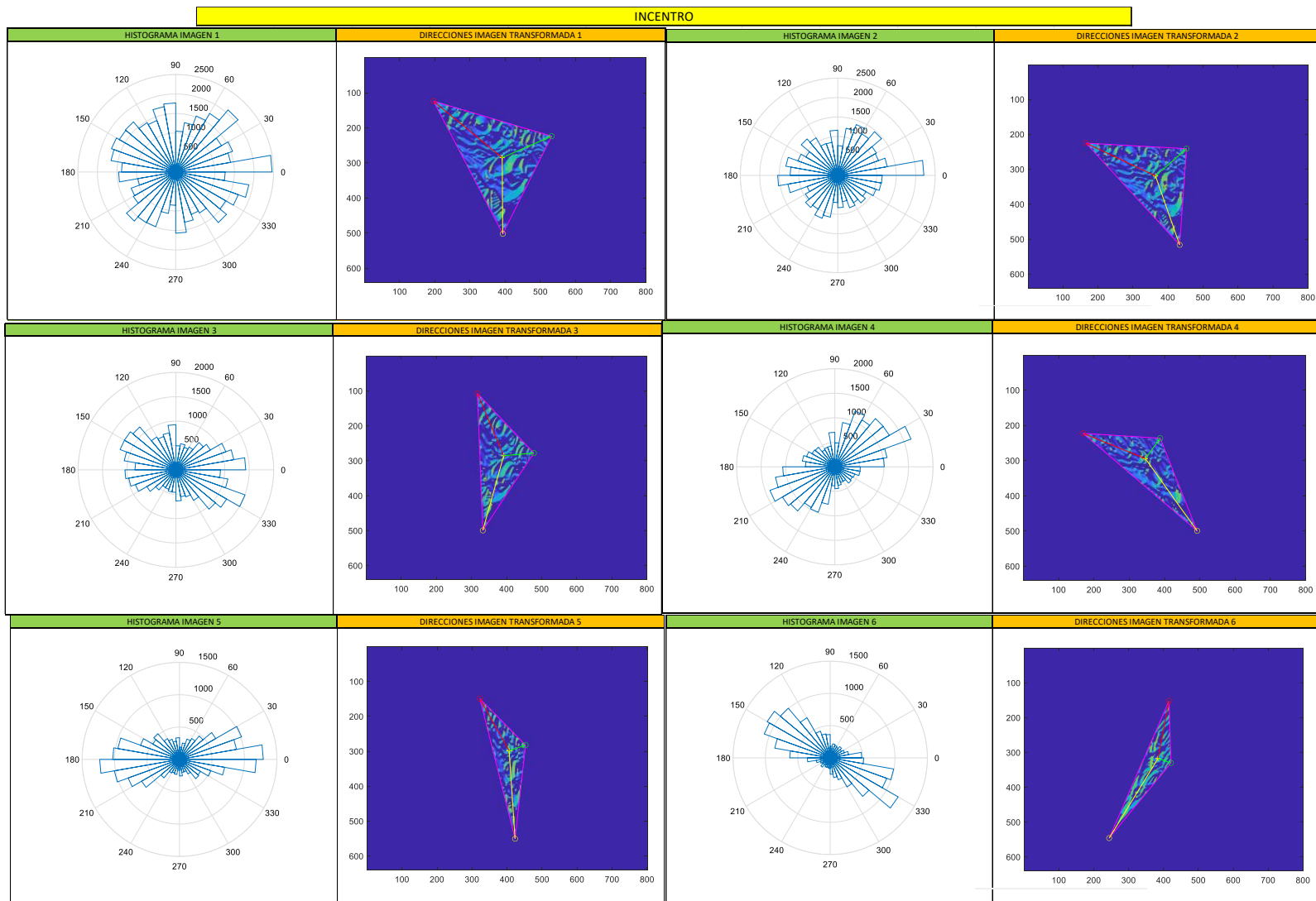


Imagen 29. Histogramas y triángulos homográficos con incentros correspondientes.

Anexo C, Direcciones invariantes.

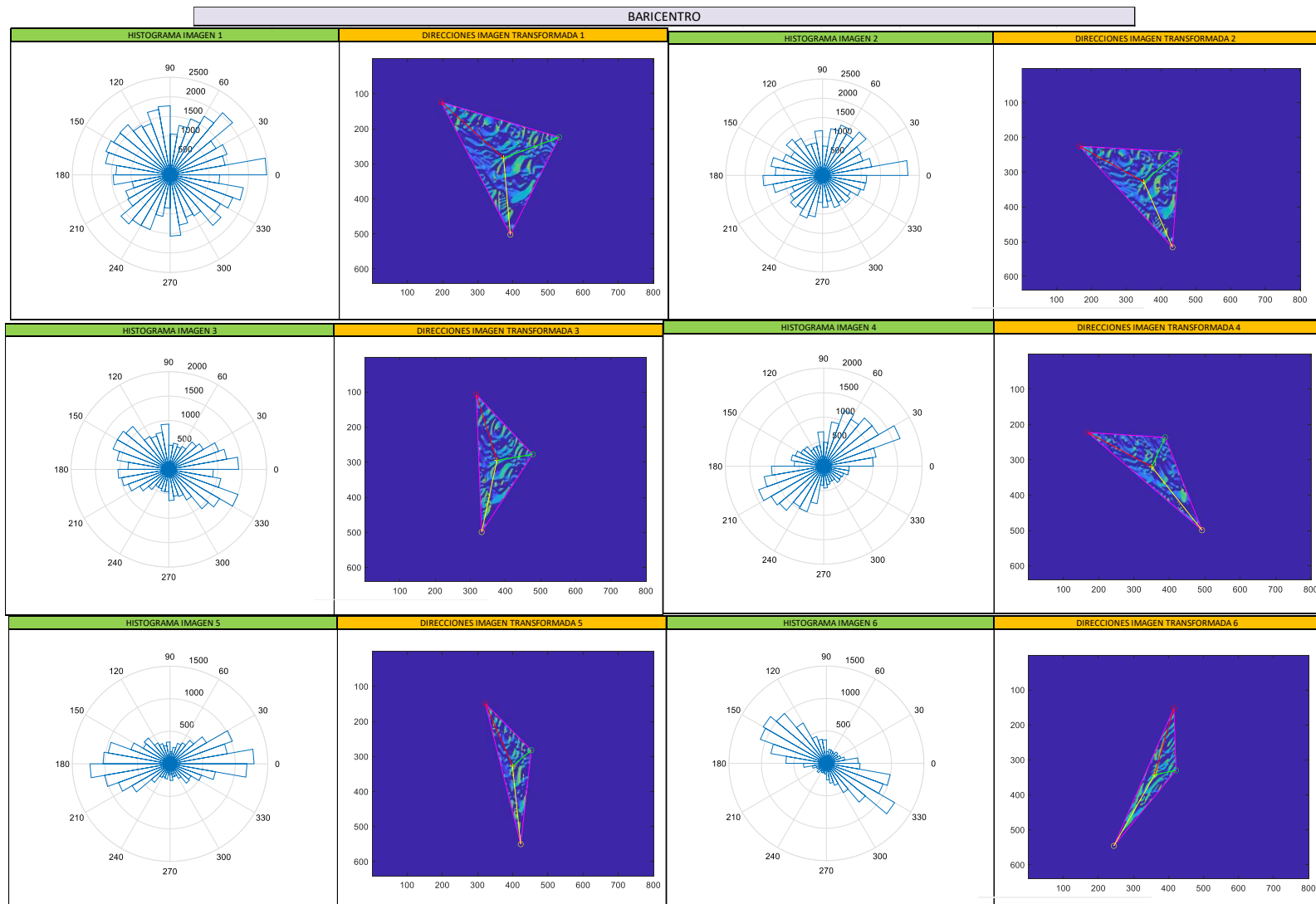


Imagen 30. Histogramas y triángulos homográficos con baricentros correspondientes



## Anexo D, Resultados entre algoritmos de filtrado.

En este anexo se detalla el proceso de estudio y validación entre los diversos filtrados existentes tales como Ransac, LMeds, MSAC, LTS y el algoritmo implementado de ángulos, descrito en el apartado 3.2.3. Proceso de filtrado de atributos de nodo.

Los pasos establecidos en el proceso son detallados a continuación:

- El número de punto de interés se ha fijado en cada imagen en 1.500.
- Se establecen las correspondencias entre ambas imágenes por “knn” – fuerza bruta.
- Una vez se dispone de las correspondencias, se ejecutan los filtrados Ransac, LMeds, MSAC, LTS y el de ángulos.
- Para cada uno de los procesos de filtrado se obtienen los siguientes valores:
  - TP: Puntos emparejados correctamente como positivos.
  - TN: Puntos emparejados correctamente como negativos.
  - FP: Puntos emparejados como positivos cuando realmente no lo son.
  - FN: Puntos emparejados como negativos cuando realmente son positivos.
  - Precisión (11).
  - Recall (15).

$$\text{Recall} = \frac{TP}{TP + FN} \quad (16)$$

Los anteriores valores se han obtenido con respecto a la matriz homografica de cada par de imágenes. Esta matriz proyecta los “keypoints” de la imagen de partida en cada una de las imágenes de estudio, pudiendo obtenerse de esta forma su correcta disposición y poderse comparar con los emparejamientos obtenidos.

- Se ha impuesto como umbral entre los puntos emparejados y los proyectados por la matriz “homográfica” de un pixel. A continuación se muestra una imagen 31 en la que los puntos han sido calificados como negativos debido a que la distancia es mayor que un pixel.

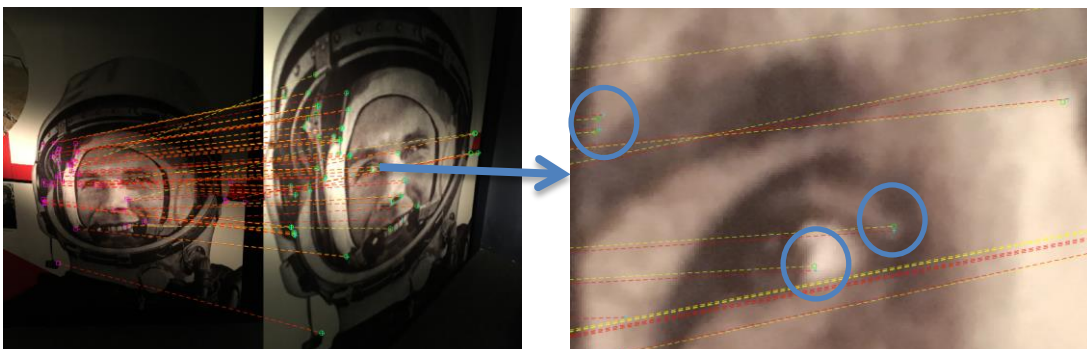


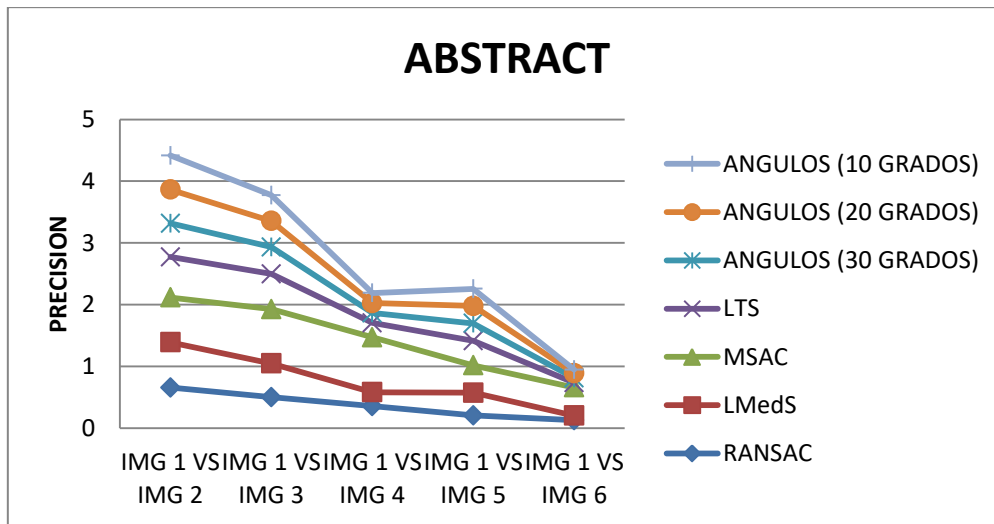
Imagen 31. Representación de puntos homográficos marcados con una cruz azul proyectados en la imagen de la derecha y “keypoints” emparejados por “knn” - fuerza bruta entre ambas imágenes representados con un círculo verde.

- Los valores de umbral impuestos en el filtrado por ángulos son, 30, 20 y 10.

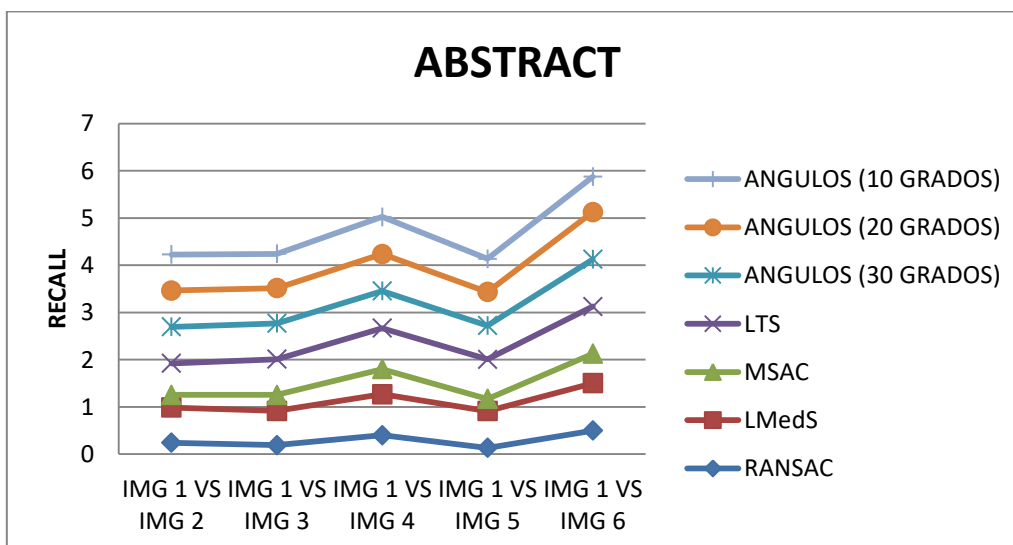
Algunos resultados de la base de datos HPatches empleada pueden verse a continuación.



Imagen 32. Secuencia de imágenes ABSTRACT del repositorio HPatches.



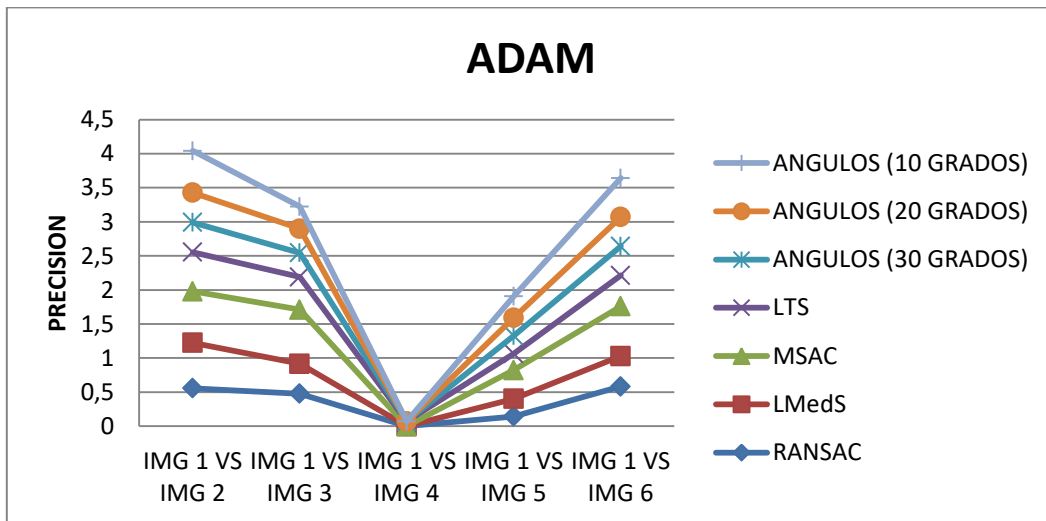
Gráfica 16. Precisión de los métodos de filtrado evaluados de la secuencia ABSTRACT.



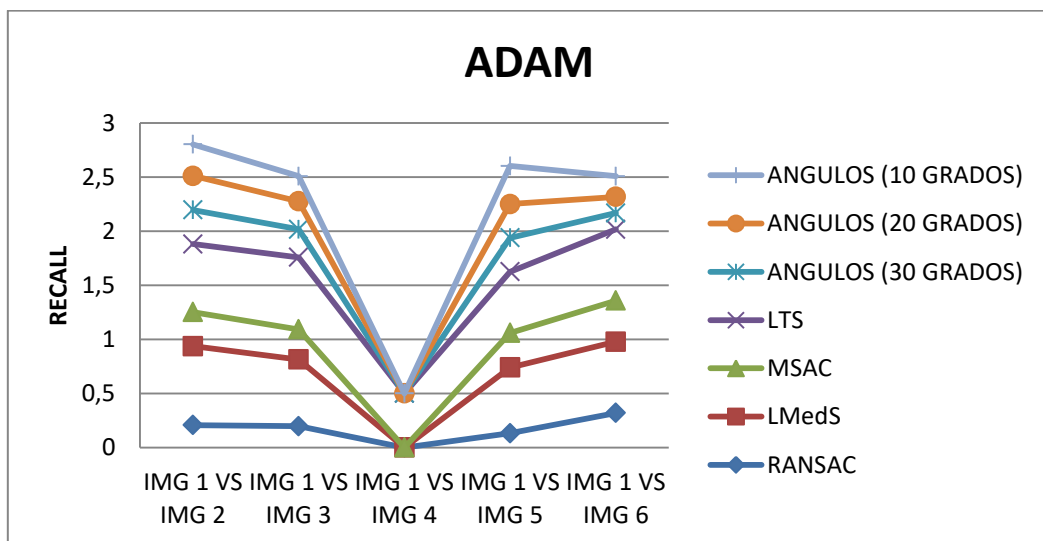
Gráfica 17. Recall de los métodos de filtrado evaluados de la secuencia ABSTRACT.



Imagen 33. Secuencia de imágenes ADAM del repositorio HPatches.



Gráfica 18. Precisión de los métodos de filtrado evaluados de la secuencia ADAM.



Gráfica 19. Recall de los métodos de filtrado evaluados de la secuencia ADAM.

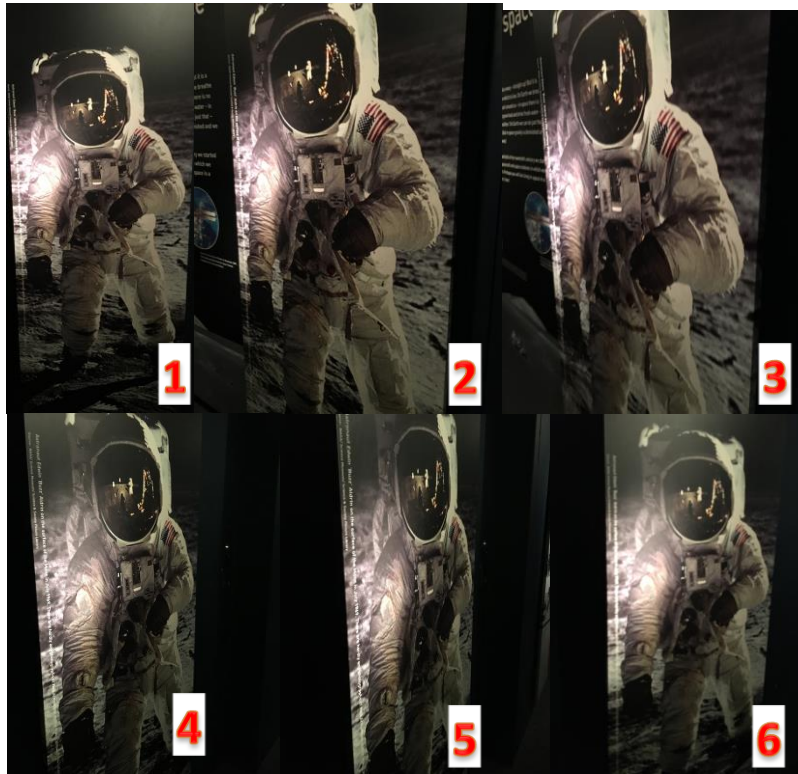
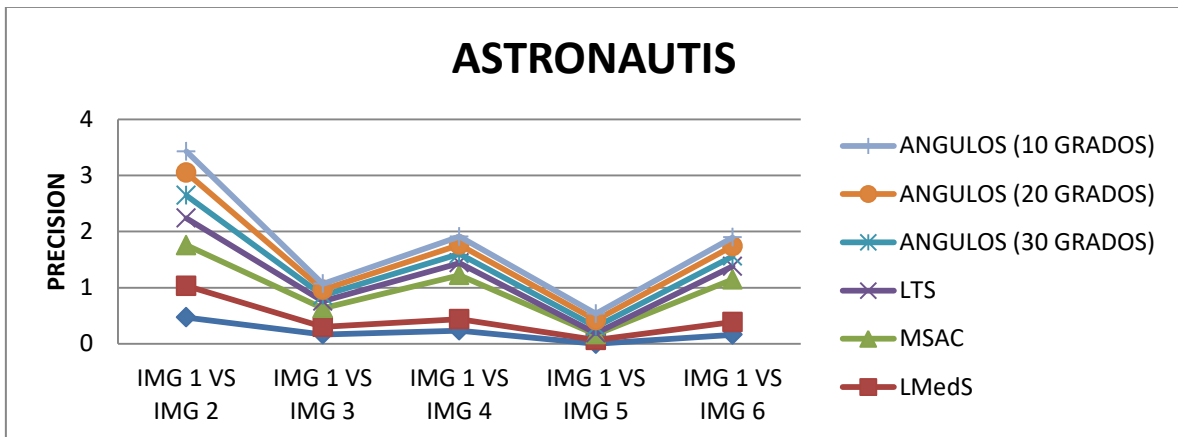
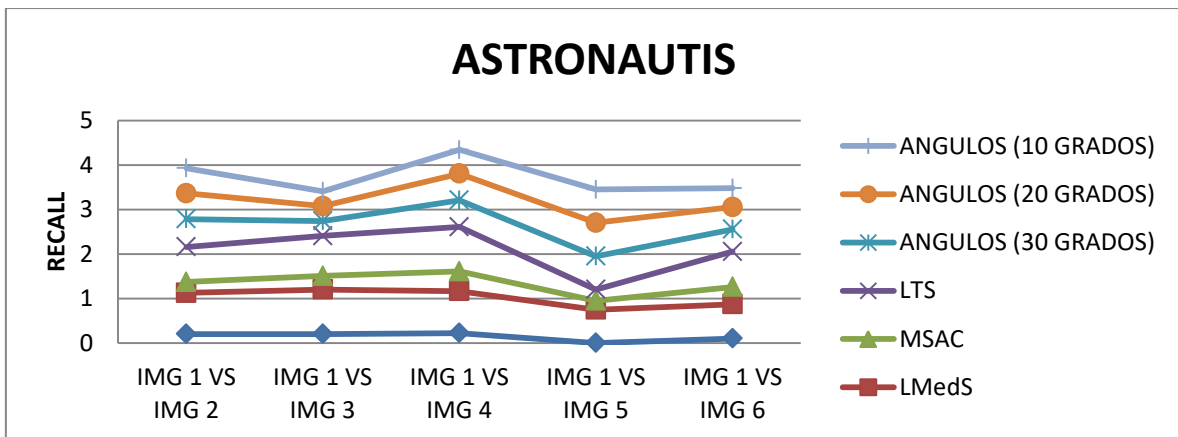


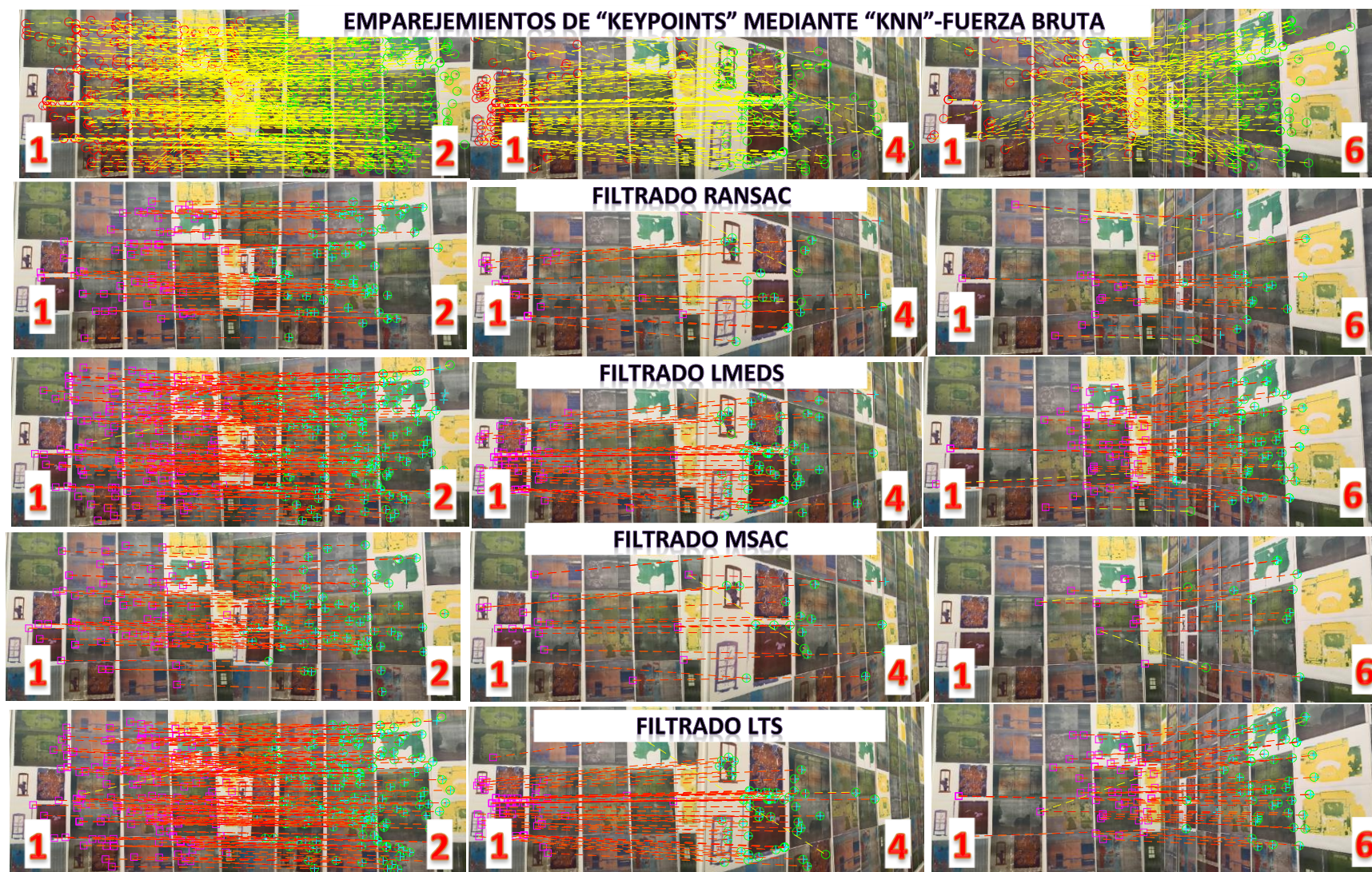
Imagen 34. Secuencia de imágenes ASTRONAUTIS del repositorio HPatches.



Gráfica 20. Precisión de los métodos de filtrado evaluados de la secuencia ASTRONAUTIS.



Gráfica 21. Recall de los métodos de filtrado evaluados de la secuencia ASTRONAUTIS.



Anexo D, Resultados entre algoritmos de filtrado.

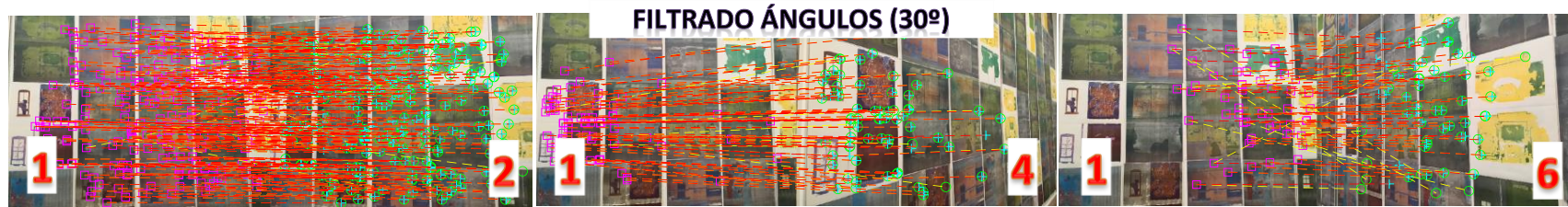


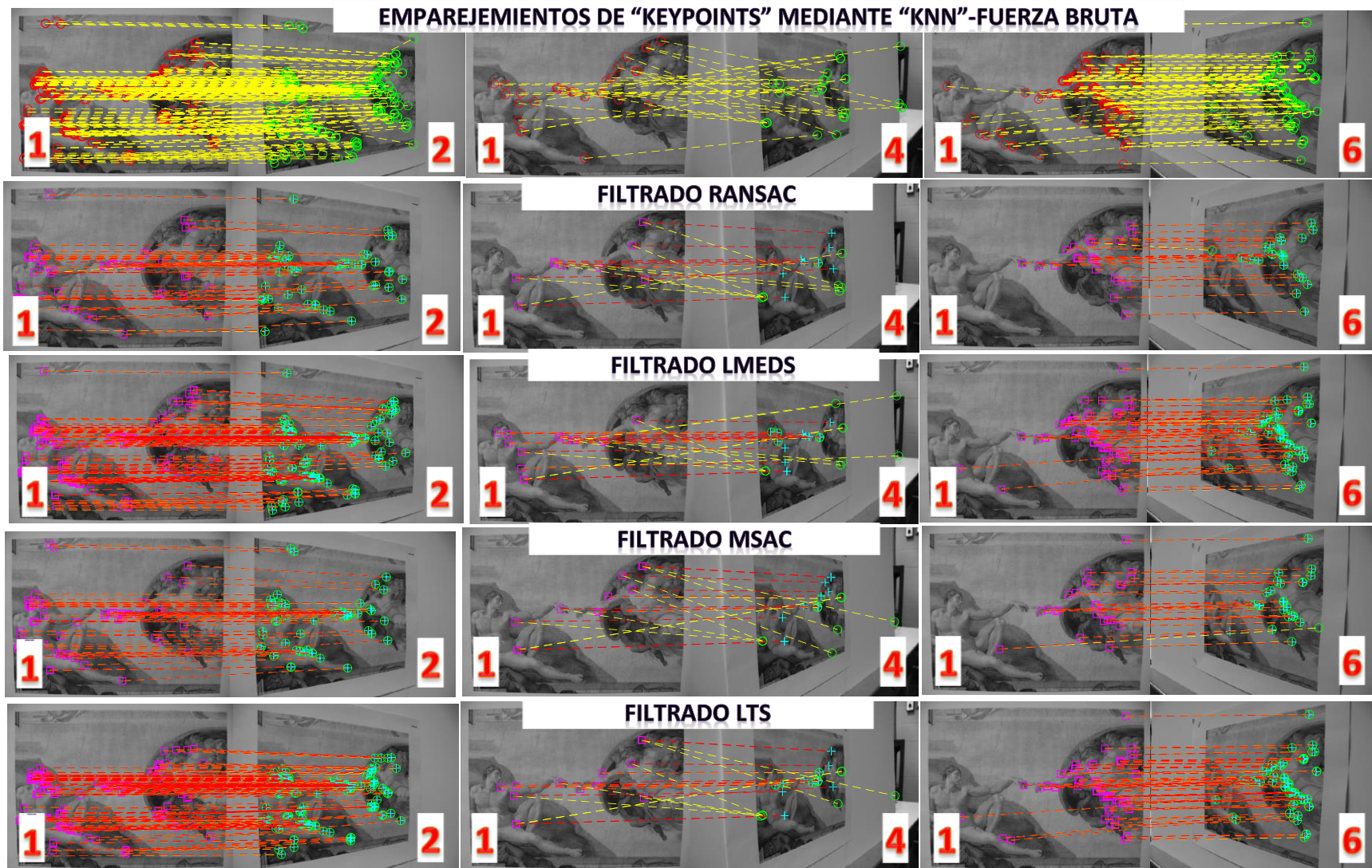
Imagen 35. "Inliers" entre pares de imágenes y falsas correspondencias mediante matriz homográfica de la secuencia de imágenes de la imagen 32 de varios procesos de filtrado.

Los resultados del estudio entre los diversos métodos de filtrado evaluados pueden verse en la siguiente tabla 12.

|                 | IMG 1 VS IMG 2 | IMG 1 VS IMG 3 | IMG 1 VS IMG 4 | IMG 1 VS IMG 5 | IMG 1 VS IMG 6 | IMG 1 VS IMG 2 | IMG 1 VS IMG 3 | IMG 1 VS IMG 4 | IMG 1 VS IMG 5 | IMG 1 VS IMG 6 |
|-----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| FILTRADO RANSAC |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |
| TP              | 40             | 25             | 6              | 9              | 2              | 125            | 95             | 11             | 45             | 4              |
| TN              | 151            | 191            | 87             | 184            | 86             | 71             | 98             | 42             | 110            | 52             |
| FP              | 21             | 25             | 11             | 35             | 14             | 105            | 124            | 57             | 114            | 48             |
| FN              | 126            | 106            | 9              | 59             | 2              | 37             | 30             | 3              | 18             | 0              |
| PRECISION       | 0,655737705    | 0,5            | 0,352941176    | 0,204545455    | 0,125          | 0,543478261    | 0,433789954    | 0,161764706    | 0,283018868    | 0,076923077    |
| RECALL          | 0,240963855    | 0,190839695    | 0,4            | 0,132352941    | 0,5            | 0,771604938    | 0,76           | 0,785714286    | 0,714285714    | 1              |
| FILTRADO LMedS  |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |
| TP              | 124            | 95             | 13             | 53             | 4              | 126            | 93             | 11             | 45             | 4              |
| TN              | 127            | 137            | 54             | 128            | 52             | 70             | 96             | 42             | 110            | 52             |
| FP              | 45             | 79             | 44             | 91             | 48             | 104            | 126            | 57             | 114            | 48             |
| FN              | 42             | 36             | 2              | 15             | 0              | 38             | 32             | 3              | 18             | 0              |
| PRECISION       | 0,733727811    | 0,545977011    | 0,228070175    | 0,368055556    | 0,076923077    | 0,547826087    | 0,424657534    | 0,161764706    | 0,283018868    | 0,076923077    |
| RECALL          | 0,746987952    | 0,72519084     | 0,866666667    | 0,779411765    | 1              | 0,768292683    | 0,744          | 0,785714286    | 0,714285714    | 1              |
| FILTRADO MSAC   |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |
| TP              | 45             | 51             | 16             | 19             | 5              | 127            | 91             | 11             | 44             | 3              |
| TN              | 152            | 189            | 81             | 189            | 90             | 69             | 94             | 42             | 109            | 51             |
| FP              | 17             | 7              | 2              | 24             | 6              | 103            | 128            | 57             | 115            | 49             |
| FN              | 124            | 100            | 14             | 55             | 3              | 39             | 34             | 3              | 19             | 1              |
| PRECISION       | 0,725806452    | 0,879310345    | 0,888888889    | 0,441860465    | 0,454545455    | 0,552173913    | 0,415525114    | 0,161764706    | 0,27672956     | 0,057692308    |
| RECALL          | 0,266272189    | 0,337748344    | 0,533333333    | 0,256756757    | 0,625          | 0,765060241    | 0,728          | 0,785714286    | 0,698412698    | 0,75           |
| FILTRADO LTS    |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |
| TP              | 111            | 99             | 13             | 57             | 4              |                |                |                |                |                |
| TN              | 114            | 142            | 55             | 133            | 52             |                |                |                |                |                |
| FP              | 58             | 74             | 43             | 86             | 48             |                |                |                |                |                |
| FN              | 55             | 32             | 2              | 11             | 0              |                |                |                |                |                |
| PRECISION       | 0,656804734    | 0,572254335    | 0,232142857    | 0,398601399    | 0,076923077    |                |                |                |                |                |
| RECALL          | 0,668674699    | 0,755725191    | 0,866666667    | 0,838235294    | 1              |                |                |                |                |                |

Tabla 12. Estudio comparativo entre métodos de filtrado para la secuencia de imágenes presente en la imagen 32.

Anexo D, Resultados entre algoritmos de filtrado.



Anexo D, Resultados entre algoritmos de filtrado.

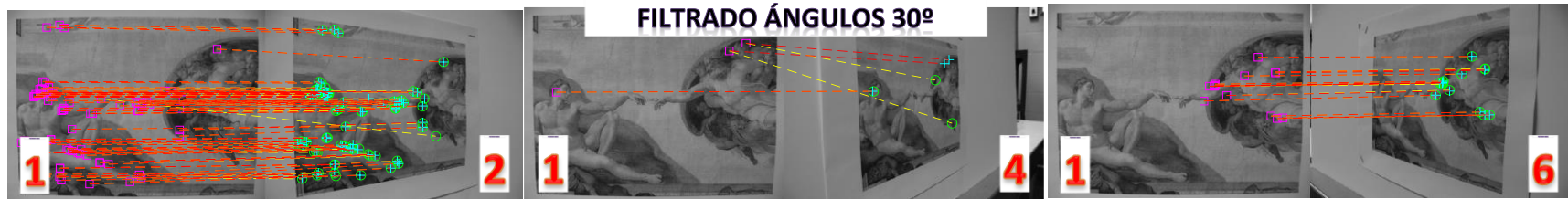


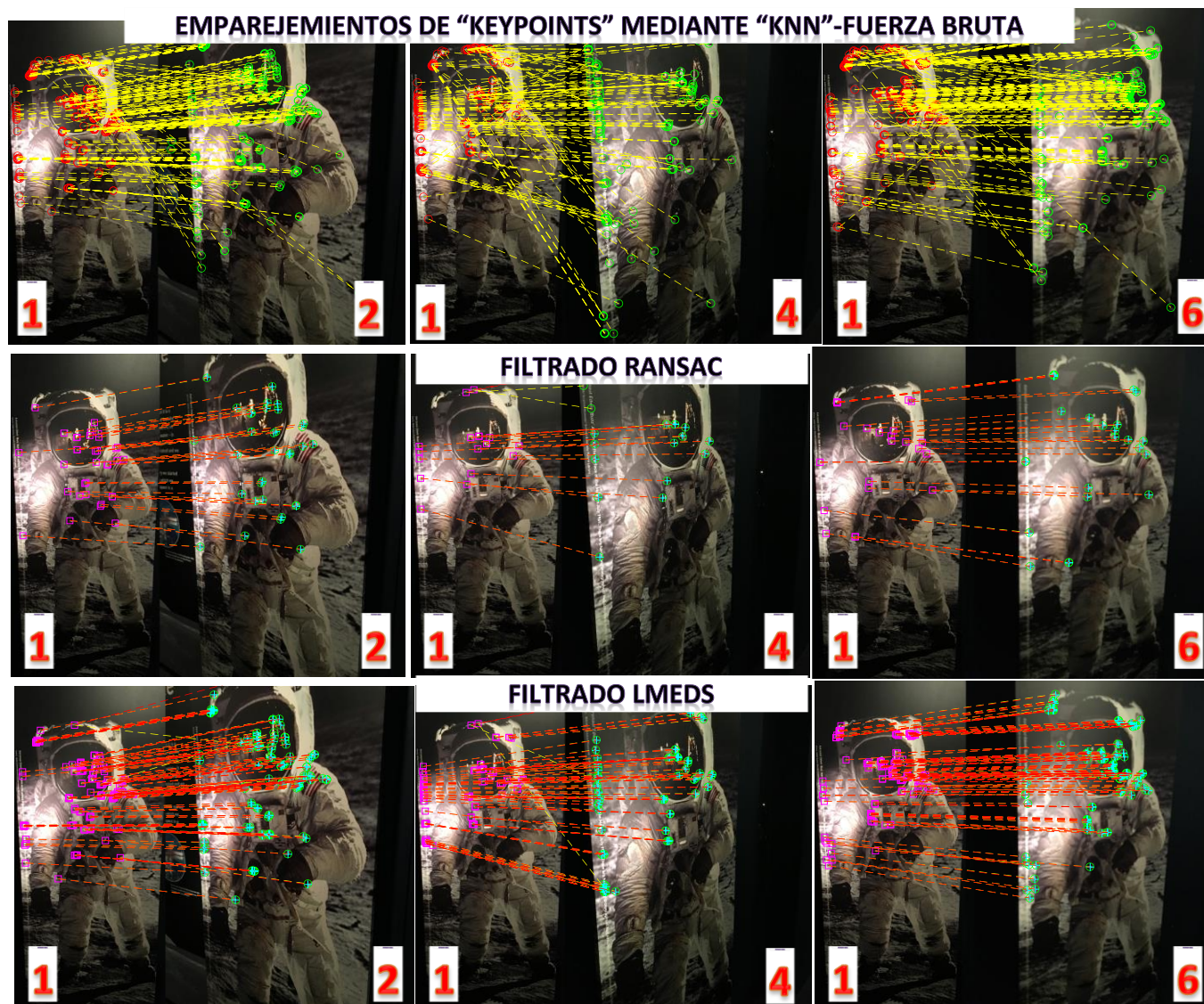
Imagen 36. "Inliers" entre pares de imágenes y falsas correspondencias mediante matriz homográfica de la secuencia de imágenes de la imagen 33 de varios procesos de filtrado.

Los resultados del estudio entre los diversos métodos de filtrado evaluados pueden verse en la siguiente tabla 13.

|                 | IMG 1 VS IMG 2 | IMG 1 VS IMG 3 | IMG 1 VS IMG 4 | IMG 1 VS IMG 5 | IMG 1 VS IMG 6 | IMG 1 VS IMG 2               | IMG 1 VS IMG 3 | IMG 1 VS IMG 4 | IMG 1 VS IMG 5 | IMG 1 VS IMG 6 |
|-----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| FILTRADO RANSAC |                |                |                |                |                | FILTRADO ANGULOS (30 GRADOS) |                |                |                |                |
| TP              | 29             | 20             | 0              | 3              | 14             | 35                           | 22             | 0              | 5              | 6              |
| TN              | 143            | 161            | 18             | 67             | 75             | 150                          | 160            | 78             | 24             | 81             |
| FP              | 23             | 22             | 9              | 18             | 10             | 45                           | 40             | 3              | 14             | 8              |
| FN              | 111            | 82             | 2              | 20             | 30             | 76                           | 63             | 2              | 11             | 34             |
| PRECISION       | 0,557692308    | 0,476190476    | 0              | 0,142857143    | 0,583333333    | 0,4375                       | 0,35483871     | 0              | 0,263157895    | 0,428571429    |
| RECALL          | 0,207142857    | 0,196078431    | 0              | 0,130434783    | 0,318181818    | 0,315315315                  | 0,258823529    | 0              | 0,3125         | 0,15           |
| FILTRADO LMedS  |                |                |                |                |                | FILTRADO ANGULOS (20 GRADOS) |                |                |                |                |
| TP              | 102            | 63             | 0              | 14             | 29             | 46                           | 20             | 0              | 6              | 7              |
| TN              | 115            | 103            | 12             | 45             | 49             | 146                          | 157            | 24             | 78             | 81             |
| FP              | 51             | 80             | 15             | 40             | 36             | 29                           | 42             | 3              | 13             | 7              |
| FN              | 38             | 39             | 2              | 9              | 15             | 109                          | 66             | 2              | 11             | 34             |
| PRECISION       | 0,666666667    | 0,440559441    | 0              | 0,259259259    | 0,446153846    | 0,613333333                  | 0,322580645    | 0              | 0,315789474    | 0,5            |
| RECALL          | 0,728571429    | 0,617647059    | 0              | 0,608695652    | 0,659090909    | 0,296774194                  | 0,23255814     | 0              | 0,352941176    | 0,170731707    |
| FILTRADO MSAC   |                |                |                |                |                | FILTRADO ANGULOS (10 GRADOS) |                |                |                |                |
| TP              | 46             | 31             | 0              | 8              | 19             | 46                           | 20             | 0              | 6              | 8              |
| TN              | 145            | 165            | 16             | 72             | 72             | 143                          | 157            | 24             | 78             | 81             |
| FP              | 15             | 8              | 11             | 11             | 7              | 29                           | 42             | 3              | 13             | 6              |
| FN              | 100            | 81             | 2              | 17             | 31             | 112                          | 66             | 2              | 11             | 34             |
| PRECISION       | 0,754098361    | 0,794871795    | 0              | 0,421052632    | 0,730769231    | 0,613333333                  | 0,322580645    | 0              | 0,315789474    | 0,571428571    |
| RECALL          | 0,315068493    | 0,276785714    | 0              | 0,32           | 0,38           | 0,291139241                  | 0,23255814     | 0              | 0,352941176    | 0,19047619     |
| FILTRADO LTS    |                |                |                |                |                |                              |                |                |                |                |
| TP              | 88             | 68             | 1              | 13             | 29             |                              |                |                |                |                |
| TN              | 101            | 109            | 14             | 44             | 50             |                              |                |                |                |                |
| FP              | 65             | 74             | 13             | 41             | 35             |                              |                |                |                |                |
| FN              | 52             | 34             | 1              | 10             | 15             |                              |                |                |                |                |
| PRECISION       | 0,575163399    | 0,478873239    | 0,071428571    | 0,240740741    | 0,453125       |                              |                |                |                |                |
| RECALL          | 0,628571429    | 0,666666667    | 0,5            | 0,565217391    | 0,659090909    |                              |                |                |                |                |

Tabla 13. Estudio comparativo entre métodos de filtrado para la secuencia de imágenes presente en la imagen 33.





Anexo D, Resultados entre algoritmos de filtrado.

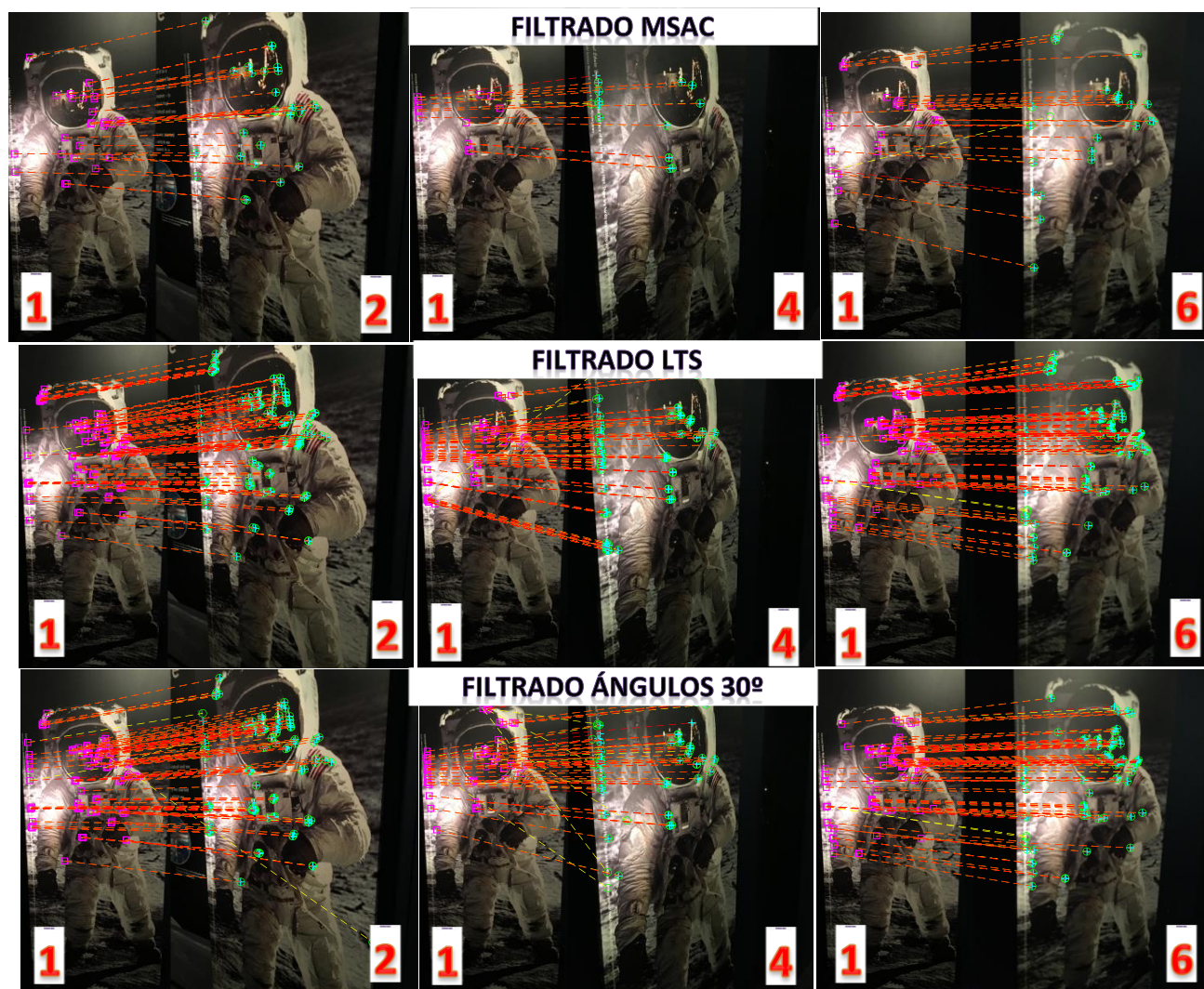


Imagen 37. "Inliers" entre pares de imágenes y falsas correspondencias mediante matriz homográfica de la secuencia de imágenes de la imagen 34 de varios procesos de filtrado.

Anexo D, Resultados entre algoritmos de filtrado.

Los resultados del estudio entre los diversos métodos de filtrado evaluados pueden verse en la siguiente tabla 14.

|                 | IMG 1 VS IMG 2 | IMG 1 VS IMG 3 | IMG 1 VS IMG 4 | IMG 1 VS IMG 5 | IMG 1 VS IMG 6 | IMG 1 VS IMG 2 | IMG 1 VS IMG 3 | IMG 1 VS IMG 4 | IMG 1 VS IMG 5 | IMG 1 VS IMG 6 |
|-----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| FILTRADO RANSAC |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |
| TP              | 16             | 2              | 4              | 0              | 4              | 43             | 3              | 9              | 3              | 16             |
| TN              | 165            | 128            | 137            | 74             | 206            | 131            | 113            | 107            | 62             | 161            |
| FP              | 18             | 10             | 13             | 11             | 21             | 63             | 26             | 46             | 23             | 73             |
| FN              | 64             | 8              | 14             | 4              | 35             | 26             | 6              | 6              | 1              | 16             |
| PRECISION       | 0,470588235    | 0,166666667    | 0,235294118    | 0              | 0,16           | 0,405660377    | 0,103448276    | 0,163636364    | 0,115384615    | 0,179775281    |
| RECALL          | 0,2            | 0,2            | 0,222222222    | 0              | 0,102564103    | 0,623188406    | 0,333333333    | 0,6            | 0,75           | 0,5            |
| FILTRADO LMedS  |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |
| TP              | 74             | 10             | 17             | 3              | 30             | 40             | 3              | 9              | 3              | 16             |
| TN              | 125            | 74             | 83             | 43             | 124            | 128            | 113            | 107            | 62             | 161            |
| FP              | 58             | 64             | 67             | 42             | 103            | 66             | 26             | 46             | 23             | 73             |
| FN              | 6              | 0              | 1              | 1              | 9              | 29             | 6              | 6              | 1              | 16             |
| PRECISION       | 0,560606061    | 0,135135135    | 0,202380952    | 0,066666667    | 0,22556391     | 0,377358491    | 0,103448276    | 0,163636364    | 0,115384615    | 0,179775281    |
| RECALL          | 0,925          | 1              | 0,944444444    | 0,75           | 0,769230769    | 0,579710145    | 0,333333333    | 0,6            | 0,75           | 0,5            |
| FILTRADO MSAC   |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |
| TP              | 21             | 4              | 11             | 1              | 19             | 40             | 3              | 8              | 3              | 14             |
| TN              | 170            | 127            | 140            | 75             | 211            | 126            | 113            | 106            | 62             | 158            |
| FP              | 8              | 8              | 3              | 9              | 6              | 66             | 26             | 47             | 23             | 75             |
| FN              | 64             | 9              | 14             | 4              | 30             | 31             | 6              | 7              | 1              | 19             |
| PRECISION       | 0,724137931    | 0,333333333    | 0,785714286    | 0,1            | 0,76           | 0,377358491    | 0,103448276    | 0,145454545    | 0,115384615    | 0,157303371    |
| RECALL          | 0,247058824    | 0,307692308    | 0,44           | 0,2            | 0,387755102    | 0,563380282    | 0,333333333    | 0,533333333    | 0,75           | 0,424242424    |
| FILTRADO LTS    |                |                |                |                |                |                |                |                |                |                |
| TP              | 63             | 9              | 18             | 1              | 31             |                |                |                |                |                |
| TN              | 115            | 73             | 84             | 42             | 125            |                |                |                |                |                |
| FP              | 68             | 65             | 66             | 43             | 102            |                |                |                |                |                |
| FN              | 17             | 1              | 0              | 3              | 8              |                |                |                |                |                |
| PRECISION       | 0,480916031    | 0,121621622    | 0,214285714    | 0,022727273    | 0,233082707    |                |                |                |                |                |
| RECALL          | 0,7875         | 0,9            | 1              | 0,25           | 0,794871795    |                |                |                |                |                |

Tabla 14. Estudio comparativo entre métodos de filtrado para la secuencia de imágenes presente en la imagen 34.

## Anexo E, Pre-filtrados implementados.

Los resultados de los algoritmos de pre-filtrado de ángulos y áreas implementados son expuestos a continuación.

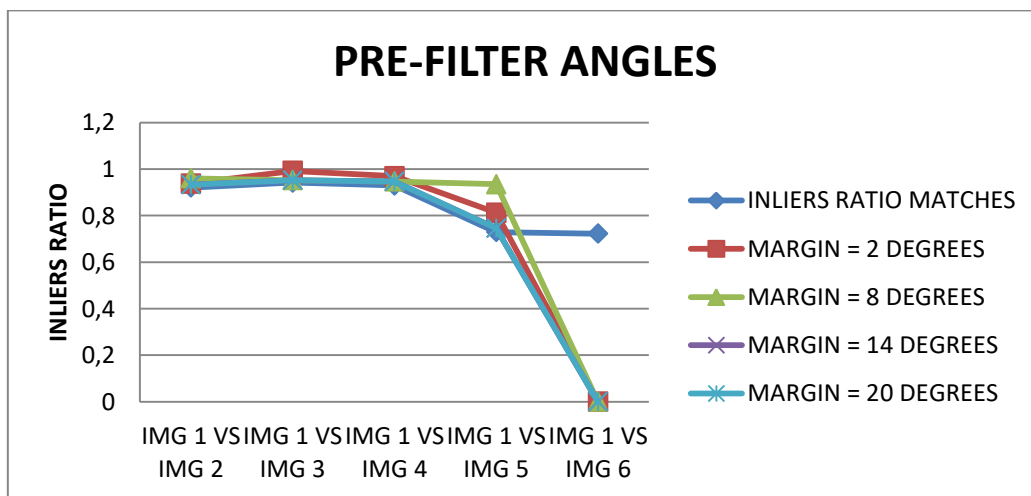
Se han implementado ambos algoritmos contando con ORB como detector y BRISK como descriptor de puntos característicos tomándose como base de estudio las imágenes presentes en la base de datos HPatches mostradas a continuación en la imagen 38.



Imagen 38. Secuencia de imágenes BEES del repositorio HPatches.

En el estudio de los algoritmos de pre filtrado implementados se ha impuesto un número fijo de “keypoints” como partida, siendo este de 2.000. Tras ello se emparejan los descriptores mediante “knn”-fuerza bruta, obteniéndose los emparejamientos.

En cuanto al pre-filtrado de ángulos los resultados del estudio sobre la secuencia de imágenes presente en la imagen 38 se encuentran en la tabla 15.



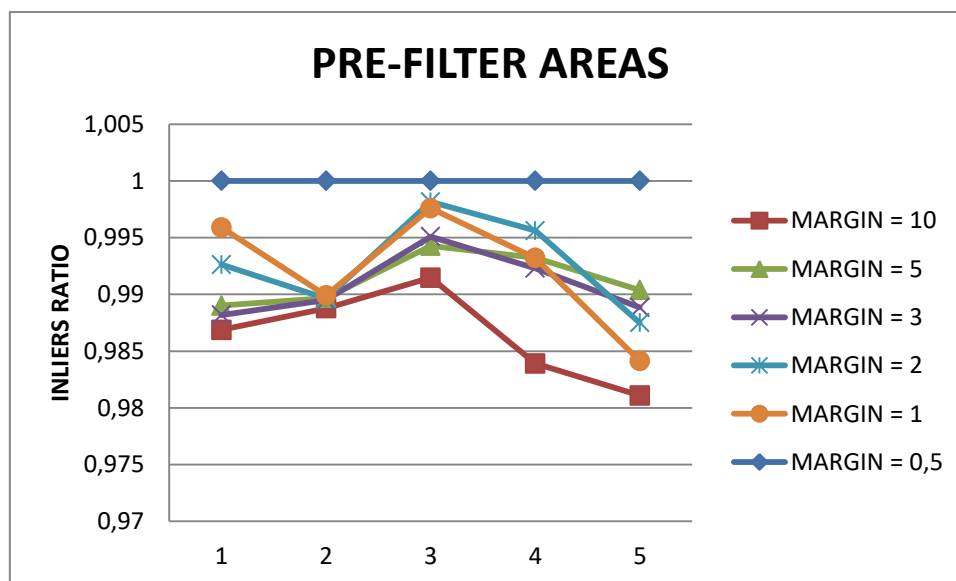
Gráfica 22. “Ratio inliers” del algoritmos pre-filtrado de ángulos de los emparejamientos y de los puntos obtenidos tras filtrado por márgenes de grados impuestos.

Anexo E, Pre-filtrados implementados.

|                          | IMG 1 VS IMG 2 | IMG 1 VS IMG 3 | IMG 1 VS IMG 4 | IMG 1 VS IMG 5 | IMG 1 VS IMG 6 |
|--------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Matches                  | 1554           | 1603           | 1568           | 1109           | 1117           |
| INLIERS MATCHES          | 1431           | 1510           | 1457           | 809            | 807            |
| RATIO                    | 0,920849421    | 0,94198378     | 0,929209184    | 0,729486023    | 0,722470904    |
| MARGIN = 2 DEGREES       |                |                |                |                |                |
| PRE-FILTER ANGLES POINTS | 112            | 248            | 262            | 48             | 6              |
| INLIERS                  | 105            | 246            | 254            | 39             | 0              |
| INLIERS RATIO            | 0,9375         | 0,991935484    | 0,969465649    | 0,8125         | 0              |
| MARGIN = 8 DEGREES       |                |                |                |                |                |
| PRE-FILTER ANGLES POINTS | 578            | 1226           | 1168           | 232            | 17             |
| INLIERS                  | 555            | 1167           | 1106           | 217            | 0              |
| INLIERS RATIO            | 0,960207612    | 0,95187602     | 0,946917808    | 0,935344828    | 0              |
| MARGIN = 14 DEGREES      |                |                |                |                |                |
| PRE-FILTER ANGLES POINTS | 1146           | 1226           | 1168           | 783            | 25             |
| INLIERS                  | 1069           | 1167           | 1106           | 584            | 0              |
| INLIERS RATIO            | 0,932809773    | 0,95187602     | 0,946917808    | 0,745849298    | 0              |
| MARGIN = 20 DEGREES      |                |                |                |                |                |
| PRE-FILTER ANGLES POINTS | 1146           | 1226           | 1168           | 783            | 29             |
| INLIERS                  | 1069           | 1167           | 1106           | 584            | 0              |
| INLIERS RATIO            | 0,932809773    | 0,95187602     | 0,946917808    | 0,745849298    | 0              |

Tabla 15. Resultados de "inliers" de emparejamientos y de puntos tras el pre-filtrado de ángulos.

Con respecto al filtrado de áreas implementado y evaluado sobre la secuencia de imágenes de la imagen 38, obteniendo los resultados mostrados en la tabla 16, y representados en la gráfica 23.



Gráfica 23. "Ratio inliers" del algoritmos pre-filtrado de áreas de los emparejamientos y de los puntos obtenidos tras filtrado por márgenes de grados impuestos.

Anexo E, Pre-filtrados implementados.

|                         | IMG 1 VS IMG 2 | IMG 1 VS IMG 3 | IMG 1 VS IMG 4 | IMG 1 VS IMG 5 | IMG 1 VS IMG 6 |
|-------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Matches                 | 1554           | 1603           | 1568           | 1109           | 1117           |
| INLIERS MATCHES         | 1431           | 1510           | 1457           | 809            | 807            |
| INLIERS RATIO MATCHES   | 0,920849421    | 0,94198378     | 0,929209184    | 0,729486023    | 0,722470904    |
| MARGIN = 10             |                |                |                |                |                |
| PRE-FILTER AREAS POINTS | 762            | 891            | 820            | 373            | 370            |
| INLIERS                 | 752            | 881            | 813            | 367            | 363            |
| INLIERS RATIO           | 0,98687664     | 0,988776655    | 0,991463415    | 0,983914209    | 0,981081081    |
| MARGIN = 5              |                |                |                |                |                |
| PRE-FILTER AREAS POINTS | 637            | 775            | 698            | 295            | 312            |
| INLIERS                 | 630            | 767            | 694            | 293            | 309            |
| INLIERS RATIO           | 0,989010989    | 0,989677419    | 0,994269341    | 0,993220339    | 0,990384615    |
| MARGIN = 3              |                |                |                |                |                |
| PRE-FILTER AREAS POINTS | 508            | 666            | 611            | 260            | 269            |
| INLIERS                 | 502            | 659            | 608            | 258            | 266            |
| INLIERS RATIO           | 0,988188976    | 0,989489489    | 0,995090016    | 0,992307692    | 0,988847584    |
| MARGIN = 2,5            |                |                |                |                |                |
| PRE-FILTER AREAS POINTS | 452            | 623            | 575            | 250            | 257            |
| INLIERS                 | 446            | 617            | 573            | 248            | 254            |
| INLIERS RATIO           | 0,986725664    | 0,990369181    | 0,996521739    | 0,992          | 0,988326848    |
| MARGIN = 2              |                |                |                |                |                |
| PRE-FILTER AREAS POINTS | 407            | 580            | 543            | 228            | 240            |
| INLIERS                 | 404            | 574            | 542            | 227            | 237            |
| INLIERS RATIO           | 0,992628993    | 0,989655172    | 0,998158379    | 0,995614035    | 0,9875         |
| MARGIN = 1,5            |                |                |                |                |                |
| PRE-FILTER AREAS POINTS | 343            | 512            | 499            | 180            | 209            |
| INLIERS                 | 342            | 508            | 498            | 179            | 206            |
| INLIERS RATIO           | 0,997084548    | 0,9921875      | 0,997995992    | 0,994444444    | 0,985645933    |
| MARGIN = 1              |                |                |                |                |                |
| PRE-FILTER AREAS POINTS | 244            | 396            | 416            | 147            | 189            |
| INLIERS                 | 243            | 392            | 415            | 146            | 186            |
| INLIERS RATIO           | 0,995901639    | 0,98989899     | 0,997596154    | 0,993197279    | 0,984126984    |
| MARGIN = 0,5            |                |                |                |                |                |
| PRE-FILTER AREAS POINTS | 16             | 33             | 24             | 9              | 13             |
| INLIERS                 | 16             | 33             | 24             | 9              | 13             |
| INLIERS RATIO           | 1              | 1              | 1              | 1              | 1              |

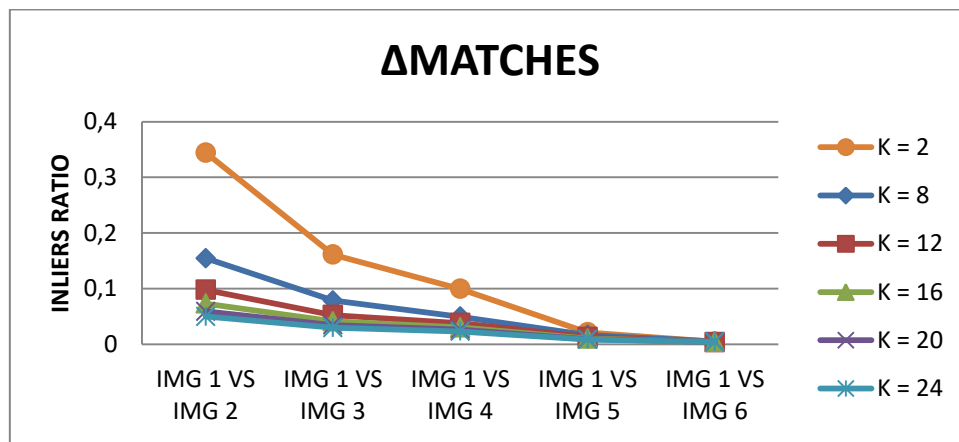
Tabla 16. Resultados de "inliers" de emparejamientos y de puntos tras el pre-filtrado de áreas.

## Anexo F, Incremento número emparejamientos

Con el objetivo de incrementar el número de emparejamientos en el algoritmo de “knn”-fuerza bruta empleado, se propone incrementar el parámetro de vecindad k y estudiar su variación dentro de la metodología desarrollada de filtrado.

En el estudio realizado se han empleado la secuencia de imágenes presentes en la imagen 26 y se ha evaluado el incremento del parámetro k de forma progresiva desde 2 hasta 24, los datos de emparejamientos, “inliers”, y ratio de coincidencias se puede observar en la tabla 17.

Ciertamente se observa un claro incremento del número de emparejamientos directamente proporcional respecto al incremento del parámetro k, pero esto conlleva a un gran incremento de falsas coincidencias, tal y como se puede observar en la siguiente gráfica 24, que muestra el ratio de coincidencias.



Gráfica 24. Ratio de coincidencias de la variación del parámetro k en emparejamientos “knn”-fuerza bruta.

| PARAMETERS MATCHING                   |                |                |                |                |                |             |
|---------------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-------------|
| ORB + BEBLID                          |                |                |                |                |                |             |
| K                                     | IMG 1 VS IMG 2 | IMG 1 VS IMG 3 | IMG 1 VS IMG 4 | IMG 1 VS IMG 5 | IMG 1 VS IMG 6 |             |
| <b>K = 2; inlier_threshold = 2,5</b>  |                |                |                |                |                |             |
| nº KEYPOINTS                          | 1000           | 1000           | 1000           | 1000           | 1000           | 1000        |
| MATCHES                               | 1603           | 1254           | 1015           | 896            | 906            | 906         |
| INLIERS                               | 552            | 202            | 101            | 19             | 4              | 4           |
| INLIERS RATIO                         | 0,344354336    | 0,16108453     | 0,099507389    | 0,021205357    | 0,004415011    | 0,004415011 |
| ΔMATCHES (%)                          | 60,3           | 25,4           | 1,5            | -10,4          | -9,4           | -9,4        |
| <b>K = 8; inlier_threshold = 2,5</b>  |                |                |                |                |                |             |
| nº KEYPOINTS                          | 1000           | 1000           | 1000           | 1000           | 1000           | 1000        |
| MATCHES                               | 5427           | 4897           | 4553           | 4304           | 4287           | 4287        |
| INLIERS                               | 838            | 385            | 226            | 72             | 21             | 21          |
| INLIERS RATIO                         | 0,15441312     | 0,078619563    | 0,049637602    | 0,016728625    | 0,00489853     | 0,00489853  |
| ΔMATCHES (%)                          | 442,7          | 389,7          | 355,3          | 330,4          | 328,7          | 328,7       |
| <b>K = 12; inlier_threshold = 2,5</b> |                |                |                |                |                |             |
| nº KEYPOINTS                          | 1000           | 1000           | 1000           | 1000           | 1000           | 1000        |
| MATCHES                               | 9396           | 8844           | 8480           | 8219           | 8185           | 8185        |
| INLIERS                               | 919            | 463            | 321            | 106            | 28             | 28          |
| INLIERS RATIO                         | 0,097807578    | 0,052351877    | 0,037853774    | 0,012896946    | 0,003420892    | 0,003420892 |
| ΔMATCHES (%)                          | 839,6          | 784,4          | 748            | 721,9          | 718,5          | 718,5       |
| <b>K = 16; inlier_threshold = 2,5</b> |                |                |                |                |                |             |
| nº KEYPOINTS                          | 1000           | 1000           | 1000           | 1000           | 1000           | 1000        |
| MATCHES                               | 13389          | 12839          | 12462          | 12205          | 12167          | 12167       |
| INLIERS                               | 979            | 530            | 376            | 124            | 51             | 51          |
| INLIERS RATIO                         | 0,073119725    | 0,041280474    | 0,030171722    | 0,010159771    | 0,004191666    | 0,004191666 |
| ΔMATCHES (%)                          | 1238,9         | 1183,9         | 1146,2         | 1120,5         | 1116,7         | 1116,7      |
| <b>K = 20; inlier_threshold = 2,5</b> |                |                |                |                |                |             |
| nº KEYPOINTS                          | 1000           | 1000           | 1000           | 1000           | 1000           | 1000        |
| MATCHES                               | 17385          | 16835          | 16457          | 16201          | 16163          | 16163       |
| INLIERS                               | 1027           | 581            | 432            | 149            | 69             | 69          |
| INLIERS RATIO                         | 0,059073914    | 0,034511435    | 0,026250228    | 0,009196963    | 0,004269009    | 0,004269009 |
| ΔMATCHES (%)                          | 1638,5         | 1583,5         | 1545,7         | 1520,1         | 1516,3         | 1516,3      |
| <b>K = 24; inlier_threshold = 2,5</b> |                |                |                |                |                |             |
| nº KEYPOINTS                          | 1000           | 1000           | 1000           | 1000           | 1000           | 1000        |
| MATCHES                               | 21381          | 20831          | 20453          | 20197          | 20159          | 20159       |
| INLIERS                               | 1065           | 615            | 471            | 172            | 82             | 82          |
| INLIERS RATIO                         | 0,049810579    | 0,029523307    | 0,023028407    | 0,008516116    | 0,004067662    | 0,004067662 |
| ΔMATCHES (%)                          | 2038,1         | 1983,1         | 1945,3         | 1919,7         | 1915,9         | 1915,9      |

Tabla 17. Resultados del estudio de incremento de emparejamientos en el método “knn”-fuerza bruta propuesto.

## Anexo G, Estudio y estructuración de la implementación de metodologías desarrolladas.

Una vez estudiados y evaluados todas las algoritmos de forma individual se procede a examinar cual es la estructura óptima que se puede conformar con ellas y que resultados presentan.

El objeto de este estudio se centra en presentar todas las posibles estructuras y evaluarse en las mismas condiciones.

Para ello, como punto de partida se estable un número finito de puntos clave que son obtenidos por un detector de características, y sus características extraídas por un descriptor. Tras ellos se emparejan los descriptores con el método “knn”-fuerza bruta, estos criterios de partida quedan definidos en la siguiente tabla 18.

| DETECTOR + DESCRIPTOR | ORB+BEBLID |
|-----------------------|------------|
| nº KEYPOINTS          | 500        |
| knn                   | 2          |
| INLIER THRESHOLD      | 10         |

Tabla 18. Parámetros de partida en el estudio de implementación de metodologías desarrolladas.

Una vez se dispone de los emparejamientos, se estudian las diversas propuestas, estas se dividen en dos grupos, las que se implementan con multirresolución y las que se no, estas se presentan en la tabla 19. En la que se encuentran todas las estructuras evaluadas en este anexo y como se presentan los algoritmos implementados en cada una de las opciones.

Así pues, en la opción 1 y 2 con multirresolución, tras el emparejamiento de puntos característicos, se escoge una escala de la pirámide gráfica, con un número inferior de puntos al presente en el emparejamiento y posteriormente se aplica el pre-filtrado. En la opción 4 y 5 tras la disminución de puntos por multirresolución, se aplica el pre-filtrado de ángulos y posteriormente el filtrado de ángulos desarrollado. Mientras que en la opción 6 y 7 la disminución de puntos por multirresolución se aplica posterior a los pre-filtrados propuestos.

| OPTION | WITH MULTISCALE                                | WITHOUT MULTISCALE                      |
|--------|--|---|
| 1      | MULTISCALE & PRE-FILTER ANGLES                 | PRE-FILTER ANGLES                       |
| 2      | MULTISCALE & PRE-FILTER AREAS                  | PRE-FILTER AREAS                        |
| 3      | MULTISCALE & FILTER ANGLES (30º)               | FILTER ANGLES (30º)                     |
| 4      | MULTISCALE & PRE-FILTER ANGLES & FILTER ANGLES | PRE-FILTER ANGLES & FILTER ANGLES (30º) |
| 5      | MULTISCALE & PRE-FILTER AREAS & FILTER ANGLES  | PRE-FILTER AREAS & FILTER ANGLES (30º)  |
| 6      | PRE-FILTER ANGLES & MULTISCALE & FILTER ANGLES |   |
| 7      | PRE-FILTER AREAS & MULTISCALE & FILTER ANGLES  |   |

Tabla 19. Implementaciones de estructuras propuestas a estudio.



A continuación se presentan los resultados evaluados sobre la secuencia de imágenes presente en la imagen 26 “Graffiti” y seguidamente los resultados de la secuencia de imágenes de la imagen 38 “Bees”.

### **GRAFFITI**

Los resultados tras el emparejamiento por “knn” – fuerza bruta se muestran a continuación, en esta tabla 20, se presentan los resultados de los emparejamientos, verdaderas correspondencias y ratio de estas sobre el número de emparejamientos presentes.

| K = 2; inlier_threshold = 10 |                |                |                |                |                |
|------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|                              | IMG 1 VS IMG 2 | IMG 1 VS IMG 3 | IMG 1 VS IMG 4 | IMG 1 VS IMG 5 | IMG 1 VS IMG 6 |
| nº KEYPOINTS                 | 500            | 500            | 500            | 500            | 500            |
| MATCHES                      | 370            | 279            | 206            | 172            | 185            |
| INLIERS                      | 314            | 171            | 59             | 6              | 3              |
| INLIERS RATIO                | 0,848648649    | 0,612903226    | 0,286407767    | 0,034883721    | 0,016216216    |

**Tabla 20. Resultados “inliers” de emparejamientos sobre la secuencia de imágenes de la imagen 24.**

La escala 0 del grafo piramidal de la estructura multirresolución se puede ver en la siguiente imagen 39, en la que se encuentran los 500 “keypoints” que proporciona el detector ORB.



**Imagen 39. Escala 0 del grafo piramidal para 500 puntos clave proporcionados por el detector ORB.**

Los resultados sobre las estructuras implementadas con análisis multirresolución se exponen a continuación (presentes en la tabla 21). Para estas, se escoge la escala de la estructura que contenga el número de puntos más próximo a 100, pero sin ser este menor de esta cantidad, exceptuando las opciones 6 y 7. En estos casos si se da un número de emparejamientos menor a 100, se impone la escala 0 (escala con mayor número de puntos) como escala de análisis.

La comparativa visual entre los resultados homográficos y los obtenidos en la propuesta de opción 1 con análisis multirresolución están presentes en la imagen 40.

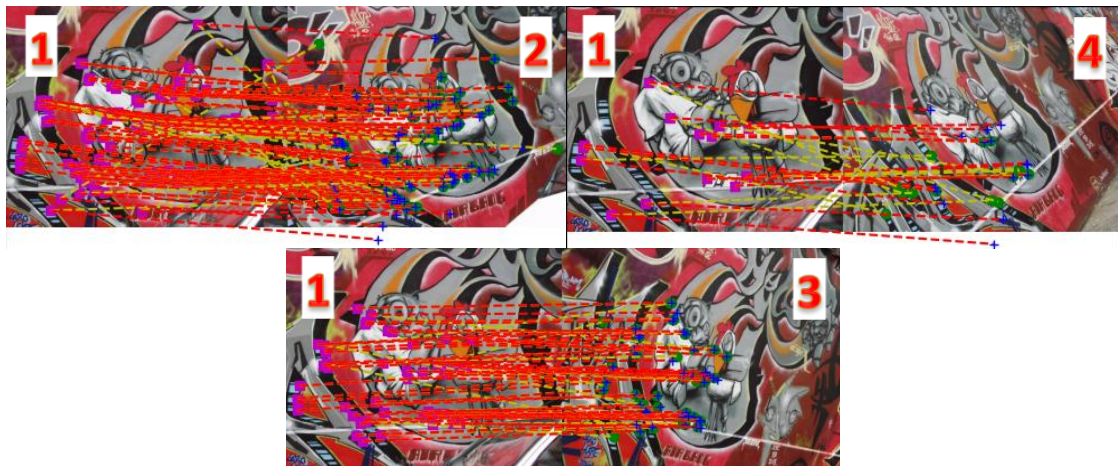


Imagen 40. Resultados de la opción 1 entre la secuencia de imágenes presentes en la imagen 26.

En la imagen 41 se encuentran los resultados comparativos entre los resultados homográficos y los obtenidos en la propuesta de opción 2 con análisis multirresolución.



Imagen 41. Resultados de la opción 2 entre la secuencia de imágenes presentes en la imagen 26.

En la siguiente imagen 42, se representan los resultados obtenidos de la propuesta 3 junto con las homografías de los mismos en la que se ha aplicado un análisis jerárquico.

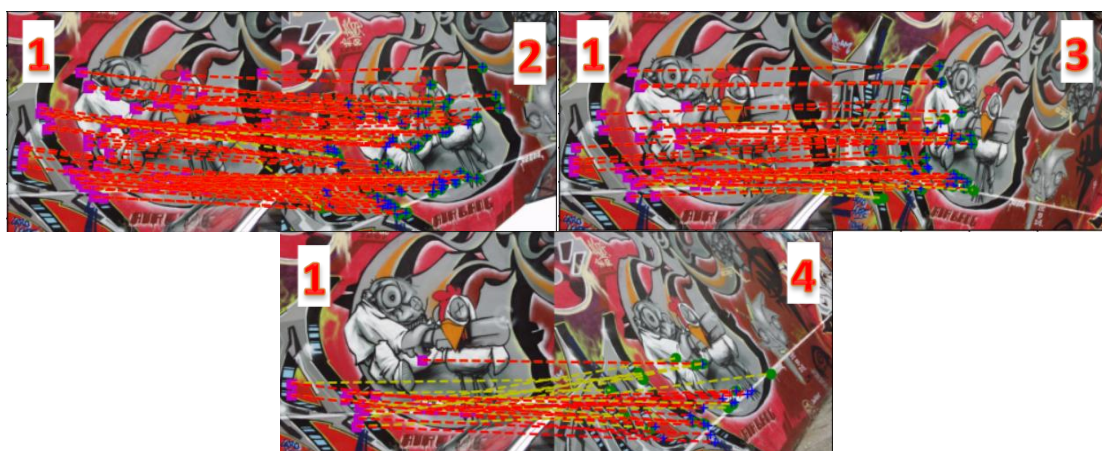
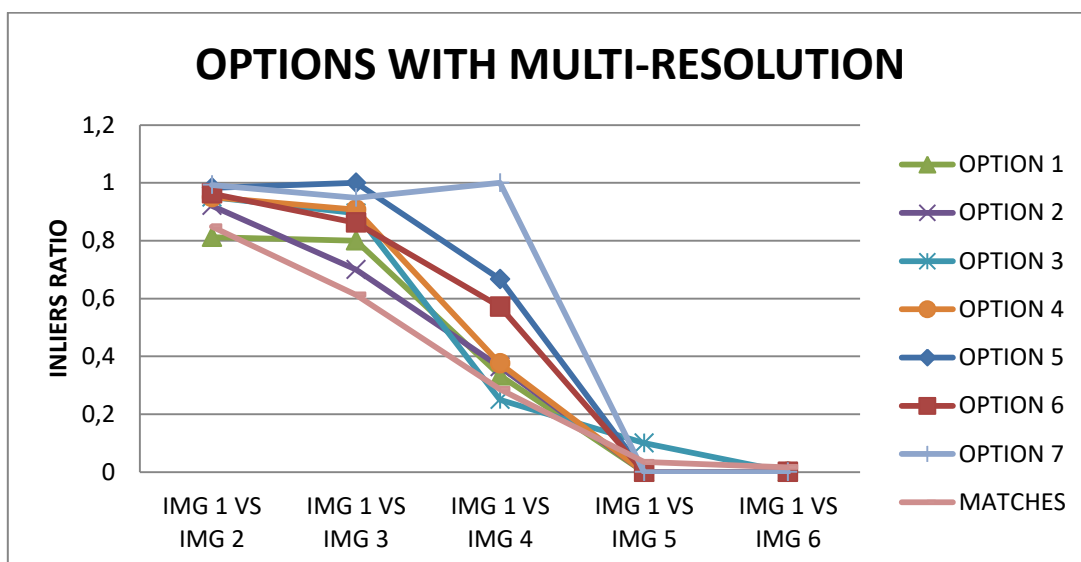


Imagen 42. Resultados de la opción 3 entre la secuencia de imágenes presentes en la imagen 26.

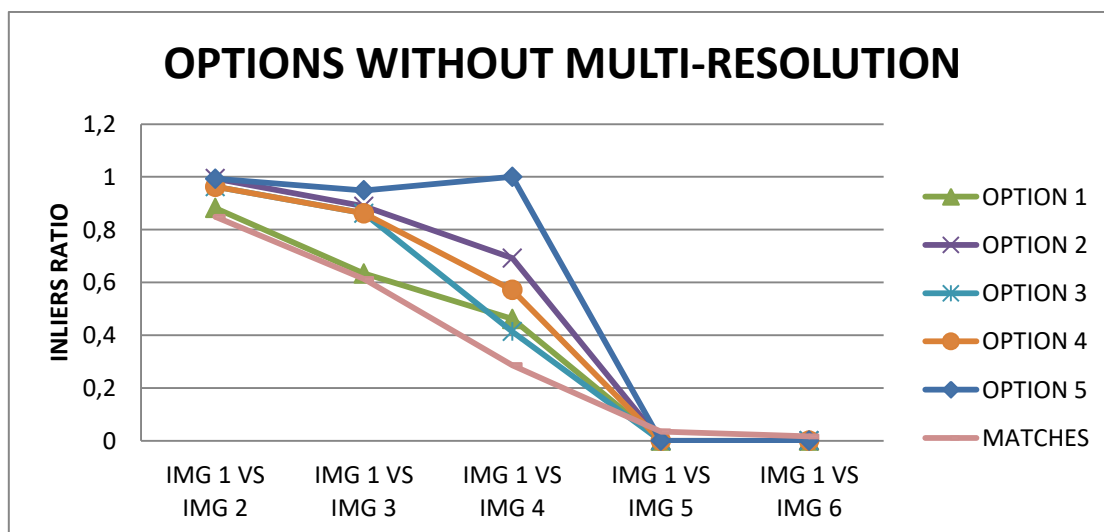
En relación a los resultados presentados en las gráficas 25 y 26, vemos que el ratio es menor en las opciones 1, 2 y 3, siendo estas las de pre-filtrado o filtrado sin incluir ninguna combinación entre ellas.

Las opciones 6 y 7, al incluir el análisis multiresolución entre las etapas de pre-filtrado y filtrado, hace que el coste computacional sea más elevado que en las opciones 4 y 5. Esto se debe, que en las propuestas 4 y 5 se parte de una propuesta de grafo piramidal inicial en la imagen de referencia con todos los puntos proporcionados por el detector de puntos clave. Estando este grafo piramidal calculado antes del inicio del proceso, sin embargo en las opciones 6 y 7 esta obtención de grafo piramidal en diferentes escalas tiene que darse entre los procesos de cálculo siendo independiente para cada par de imágenes de la secuencia a analizar.

Por todo ello se puede decir, que las opciones 4 y 5 son las más eficientes y menos costosas en coste computacional, presentando la opción 5 mejores resultados frente a la opción 4 o 3.



Gráfica 25. "Ratio inliers" de las diversas combinaciones de algoritmos que si incluyen análisis multi escala.



Gráfica 26. "Ratio inliers" de las diversas combinaciones de algoritmos que no incluyen análisis multi escala.

Anexo G, Estudio y estructuración de la implementación de metodologías desarrolladas.

| WITH MULTISCALE            |                |                |                |                |                |     |
|----------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----|
|                            | IMG 1 VS IMG 2 | IMG 1 VS IMG 3 | IMG 1 VS IMG 4 | IMG 1 VS IMG 5 | IMG 1 VS IMG 6 |     |
| <b>OPTION 1</b>            |                |                |                |                |                |     |
| nº KEYPOINTS               | 500            | 500            | 500            | 500            | 500            | 500 |
| nº POINTS MULTISCALE       | 153            |                |                |                |                |     |
| MATCHES knn                | 102            | 88             | 58             | 50             | 51             |     |
| PRE-FILTER ROT. ANGLE (30) | 96             | 50             | 15             | 8              | 11             |     |
| INLIERS                    | 78             | 40             | 5              | 0              | 0              |     |
| INLIERS RATIO              | 0,8125         | 0,8            | 0,333333333    | 0              | 0              |     |
| <b>OPTION 2</b>            |                |                |                |                |                |     |
| nº KEYPOINTS               | 500            | 500            | 500            | 500            | 500            | 500 |
| nº POINTS MULTISCALE       | 153            |                |                |                |                |     |
| MATCHES knn                | 102            | 88             | 58             | 50             | 51             |     |
| PRE-FILTER SIZE AREA (10)  | 63             | 30             | 11             | 11             | 9              |     |
| INLIERS                    | 58             | 21             | 4              | 0              | 0              |     |
| INLIERS RATIO              | 0,920634921    | 0,7            | 0,363636364    | 0              | 0              |     |
| <b>OPTION 3</b>            |                |                |                |                |                |     |
| nº KEYPOINTS               | 500            | 500            | 500            | 500            | 500            | 500 |
| nº POINTS MULTISCALE       | 153            |                |                |                |                |     |
| MATCHES knn                | 102            | 88             | 58             | 50             | 51             |     |
| FILTER ANGLES (30)         | 80             | 38             | 16             | 10             | 6              |     |
| INLIERS                    | 76             | 34             | 4              | 1              | 0              |     |
| INLIERS RATIO              | 0,95           | 0,894736842    | 0,25           | 0,1            | 0              |     |
| <b>OPTION 4</b>            |                |                |                |                |                |     |
| nº KEYPOINTS               | 500            | 500            | 500            | 500            | 500            | 500 |
| nº POINTS MULTISCALE       | 153            |                |                |                |                |     |
| MATCHES knn                | 102            | 88             | 58             | 50             | 51             |     |
| PRE-FILTER ROT. ANGLE (30) | 96             | 50             | 15             | 8              | 11             |     |
| FILTER ANGLES (30)         | 80             | 43             | 8              | 0              | 0              |     |
| INLIERS                    | 76             | 39             | 3              | 0              | 0              |     |
| INLIERS RATIO              | 0,95           | 0,906976744    | 0,375          | -              | -              |     |
| <b>OPTION 5</b>            |                |                |                |                |                |     |
| nº KEYPOINTS               | 500            | 500            | 500            | 500            | 500            | 500 |
| nº POINTS MULTISCALE       | 153            |                |                |                |                |     |
| MATCHES knn                | 102            | 88             | 58             | 50             | 51             |     |
| PRE-FILTER SIZE AREA (10)  | 63             | 30             | 11             | 11             | 9              |     |
| FILTER ANGLES (30)         | 58             | 20             | 6              | 0              | 0              |     |
| INLIERS                    | 57             | 20             | 4              | 0              | 0              |     |
| INLIERS RATIO              | 0,982758621    | 1              | 0,666666667    | -              | -              |     |
| <b>OPTION 6</b>            |                |                |                |                |                |     |
| nº KEYPOINTS               | 500            | 500            | 500            | 500            | 500            | 500 |
| MATCHES knn                | 370            | 279            | 206            | 172            | 185            |     |
| PRE-FILTER ROT. ANGLE (30) | 262            | 183            | 52             | 22             | 29             |     |
| nº POINTS MULTISCALE       | 262            | 183            | 52             | 22             | 29             |     |
| FILTER ANGLES (30)         | 215            | 116            | 7              | 6              | 3              |     |
| INLIERS                    | 207            | 100            | 4              | 0              | 0              |     |
| INLIERS RATIO              | 0,962790698    | 0,862068966    | 0,571428571    | 0              | 0              |     |
| <b>OPTION 7</b>            |                |                |                |                |                |     |
| nº KEYPOINTS               | 500            | 500            | 500            | 500            | 500            | 500 |
| MATCHES knn                | 370            | 279            | 206            | 172            | 185            |     |
| PRE-FILTER SIZE AREA (10)  | 151            | 45             | 13             | 5              | 3              |     |
| nº POINTS MULTISCALE       | 151            | 45             | 13             | 5              | 3              |     |
| FILTER ANGLES (30)         | 141            | 39             | 3              | 0              | 0              |     |
| INLIERS                    | 140            | 37             | 3              | 0              | 0              |     |
| INLIERS RATIO              | 0,992907801    | 0,948717949    | 1              | -              | -              |     |

Tabla 21. Resultados de las configuraciones con multirresolución.

Anexo G, Estudio y estructuración de la implementación de metodologías desarrolladas.

Los resultados obtenidos en las estructuras a las que no se ha propuesto un análisis jerárquico están presentes en la tabla 22. Cabe mencionar que al aplicarse reducción de escala a través de un método multirresolución, el número de puntos a tratar es mayor es estas propuestas, por lo tanto el coste computacional es superior a las propuestas en las que si se incluye.

| WITHOUT MULTISCALE         |                |                |                |                |                |     |
|----------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----|
|                            | IMG 1 VS IMG 2 | IMG 1 VS IMG 3 | IMG 1 VS IMG 4 | IMG 1 VS IMG 5 | IMG 1 VS IMG 6 |     |
| OPTION 1                   |                |                |                |                |                |     |
| nº KEYPOINTS               | 500            | 500            | 500            | 500            | 500            | 500 |
| nº POINTS MIN.-LIM.-SCALE  | 500            |                |                |                |                |     |
| MATCHES knn                | 370            | 279            | 206            | 172            | 185            |     |
| PRE-FILTER ROT. ANGLE (30) | 262            | 183            | 52             | 22             | 29             |     |
| INLIERS                    | 231            | 116            | 24             | 0              | 0              |     |
| INLIERS RATIO              | 0,881679389    | 0,633879781    | 0,461538462    | 0              | 0              |     |
| OPTION 2                   |                |                |                |                |                |     |
| nº KEYPOINTS               | 500            | 500            | 500            | 500            | 500            | 500 |
| nº POINTS MIN.-LIM.-SCALE  | 500            |                |                |                |                |     |
| MATCHES knn                | 370            | 279            | 206            | 172            | 185            |     |
| PRE-FILTER SIZE AREA (10)  | 151            | 45             | 13             | 5              | 3              |     |
| INLIERS                    | 150            | 40             | 9              | 0              | 0              |     |
| INLIERS RATIO              | 0,993377483    | 0,888888889    | 0,692307692    | 0              | 0              |     |
| OPTION 3                   |                |                |                |                |                |     |
| nº KEYPOINTS               | 500            | 500            | 500            | 500            | 500            | 500 |
| nº POINTS MIN.-LIM.-SCALE  | 500            |                |                |                |                |     |
| MATCHES knn                | 370            | 279            | 206            | 172            | 185            |     |
| FILTER ANGLES (30)         | 215            | 116            | 29             | 15             | 14             |     |
| INLIERS                    | 207            | 100            | 12             | 0              | 0              |     |
| INLIERS RATIO              | 0,962790698    | 0,862068966    | 0,413793103    | 0              | 0              |     |
| OPTION 4                   |                |                |                |                |                |     |
| nº KEYPOINTS               | 500            | 500            | 500            | 500            | 500            | 500 |
| nº POINTS MIN.-LIM.-SCALE  | 500            |                |                |                |                |     |
| MATCHES knn                | 370            | 279            | 206            | 172            | 185            |     |
| PRE-FILTER ROT. ANGLE (30) | 262            | 183            | 52             | 22             | 29             |     |
| FILTER ANGLES (30)         | 215            | 116            | 7              | 6              | 3              |     |
| INLIERS                    | 207            | 100            | 4              | 0              | 0              |     |
| INLIERS RATIO              | 0,962790698    | 0,862068966    | 0,571428571    | 0              | 0              |     |
| OPTION 5                   |                |                |                |                |                |     |
| nº KEYPOINTS               | 500            | 500            | 500            | 500            | 500            | 500 |
| nº POINTS MIN.-LIM.-SCALE  | 500            |                |                |                |                |     |
| MATCHES knn                | 370            | 279            | 206            | 172            | 185            |     |
| PRE-FILTER SIZE AREA (10)  | 151            | 45             | 13             | 5              | 3              |     |
| FILTER ANGLES (30)         | 141            | 39             | 3              | 0              | 0              |     |
| INLIERS                    | 140            | 37             | 3              | 0              | 0              |     |
| INLIERS RATIO              | 0,992907801    | 0,948717949    | 1              | -              | -              |     |

Tabla 22. Resultados de las configuraciones sin análisis jerárquico.

### **BEES**

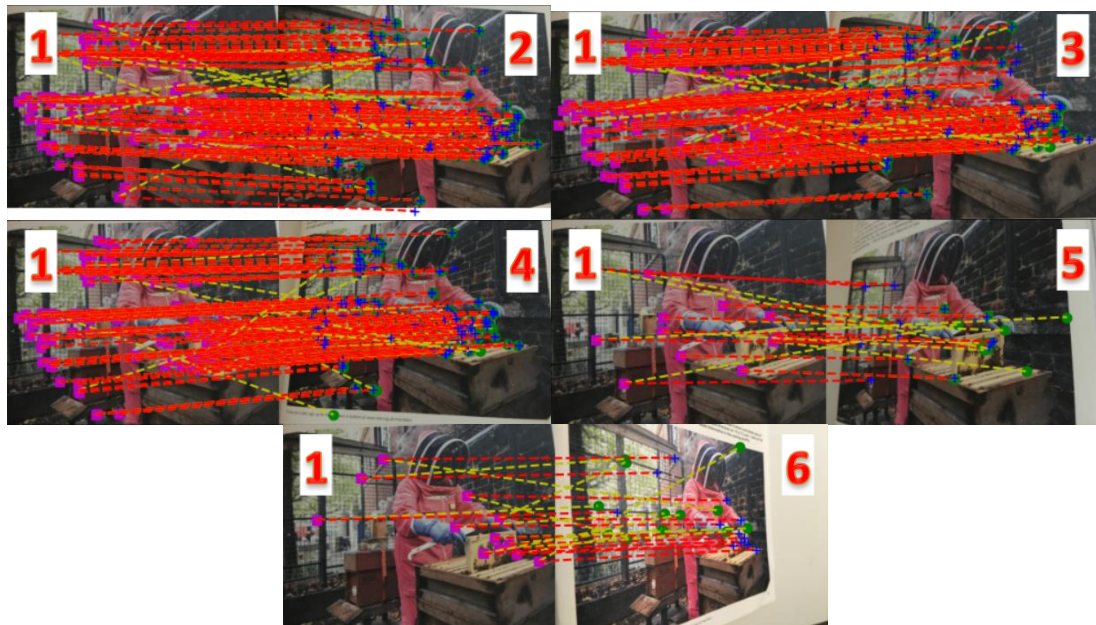
Para la secuencia de imágenes presentes en la imagen 38 se han seguido los mismos criterios y se han propuesto las opciones del 1, 2, 3, 4 y 5 que incluyen análisis multirresolución.

En la siguiente imagen de referencia de la secuencia se representa la escala 0 del grafo piramidal de la estructura multirresolución, en la que se encuentran los 500 “keypoints” que proporciona el detector ORB.



**Imagen 43. Escala 0 del grafo piramidal para 500 puntos clave proporcionados por el detector ORB en la imagen 38.**

La comparativa visual entre los resultados homográficos y los obtenidos en la propuesta de opción 1 con análisis multirresolución están presentes en la imagen 44.



**Imagen 44. Resultados de la opción 1 entre la secuencia de imágenes presentes en la imagen 38.**

En la imagen 45 se encuentran los resultados comparativos entre los resultados homográficos y los obtenidos en la propuesta de opción 2 con análisis multirresolución.

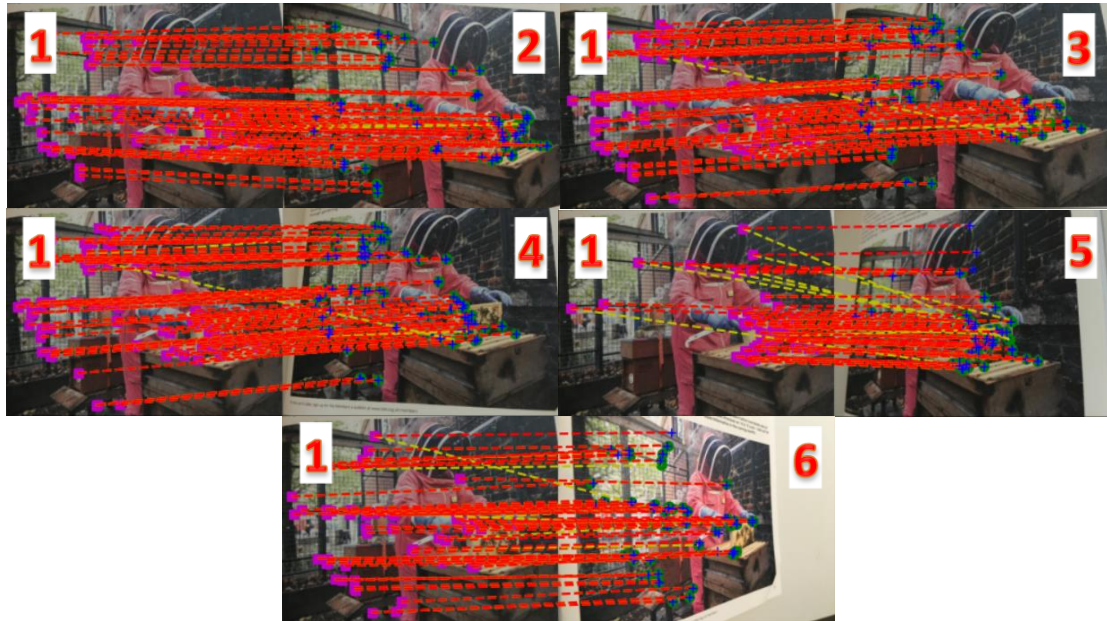


Imagen 45. Resultados de la opción 2 entre la secuencia de imágenes presentes en la imagen 38.

En la siguiente imagen 46, se representan los resultados obtenidos de la propuesta 3 junto con las homografías de los mismos en la que se ha aplicado un análisis jerárquico.

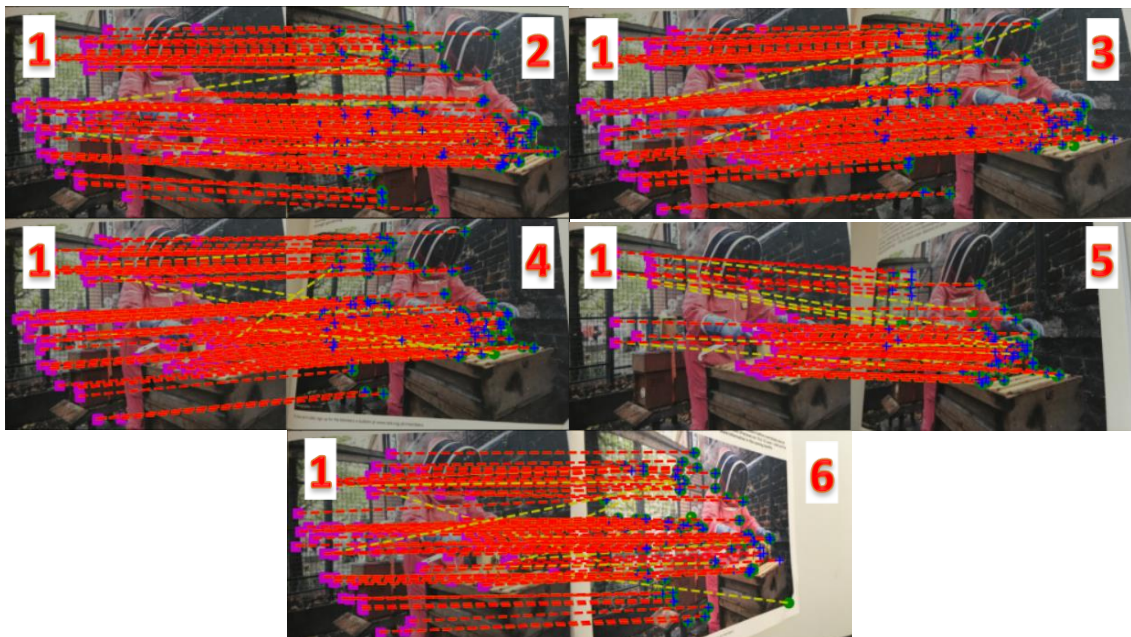


Imagen 46. Resultados de la opción 3 entre la secuencia de imágenes presentes en la imagen 38.

A continuación se representan los resultados obtenidos de la opción 4 sobre la secuencia de imágenes evaluada.

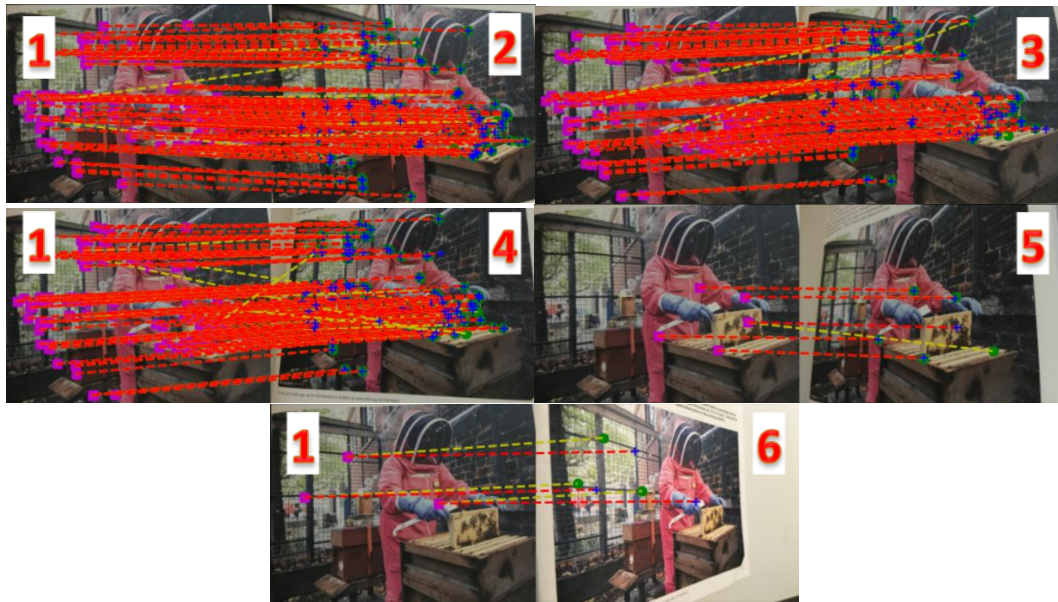


Imagen 47. Resultados de la opción 4 entre la secuencia de imágenes presentes en la imagen 38.

En la imagen 48 se muestran los resultados obtenidos en la implementación de la opción 5 sobre la secuencia de imágenes presente en la imagen 38.

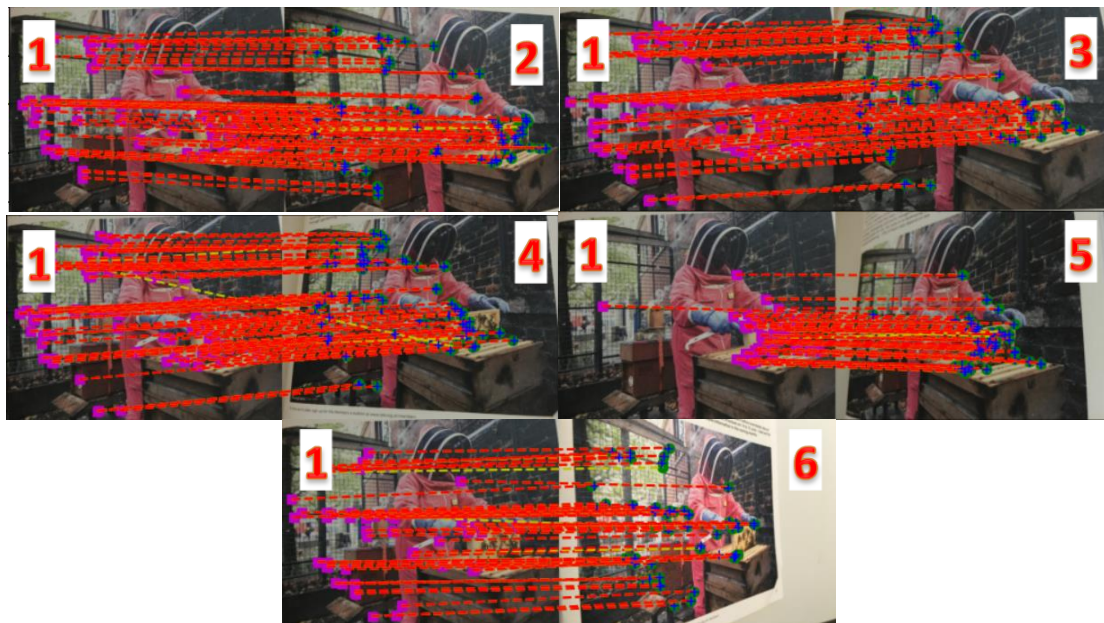


Imagen 48. Resultados de la opción 5 entre la secuencia de imágenes presentes en la imagen 38.

Los resultados tras el emparejamiento por “knn” – fuerza bruta se muestran a continuación, en la tabla 23, se presentan los resultados de los emparejamientos, verdaderas correspondencias y ratio de estas sobre el número de emparejamientos presentes.

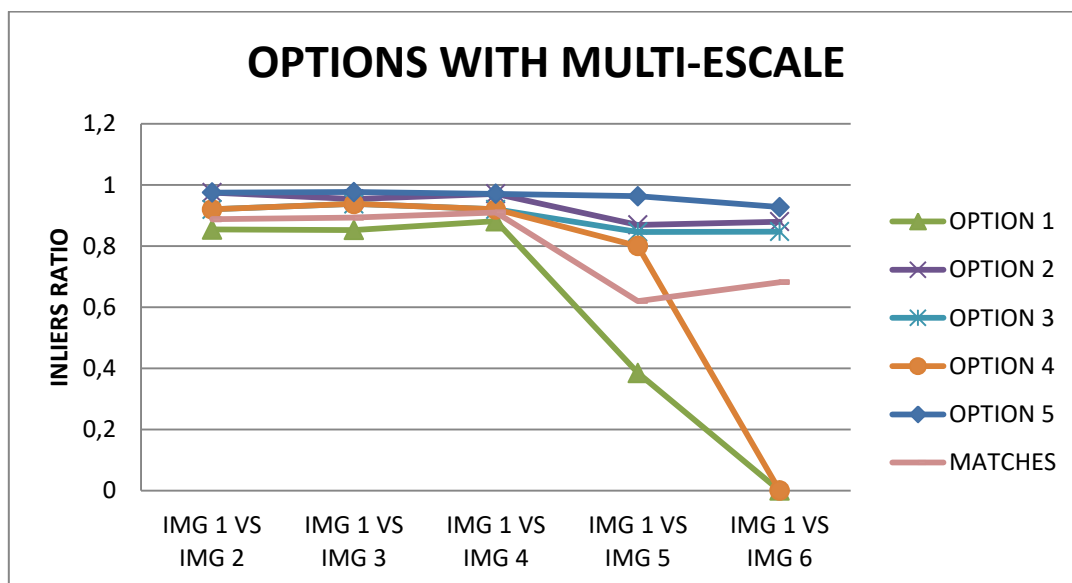


| K = 2; inlier_threshold = 10 |                |                |                |                |                |
|------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|                              | IMG 1 VS IMG 2 | IMG 1 VS IMG 3 | IMG 1 VS IMG 4 | IMG 1 VS IMG 5 | IMG 1 VS IMG 6 |
| nº KEYPOINTS                 | 500            | 500            | 500            | 500            | 500            |
| MATCHES                      | 391            | 391            | 399            | 284            | 311            |
| INLIERS                      | 347            | 349            | 363            | 176            | 212            |
| INLIERS RATIO                | 0,887468031    | 0,89258312     | 0,909774436    | 0,61971831     | 0,681672026    |

Tabla 23. Resultados “inliers” de emparejamiento sobre la secuencia de imágenes de la imagen 38.

En la siguiente gráfica 27, se presentan los ratios de las cinco propuestas evaluadas en la secuencia de imágenes “Bees”, vemos como la opción 5, compuestas de análisis multiescala, pre-filtrado de áreas y filtrado de ángulos presenta los mejores resultados.

En la tabla 24, se presentan los resultados del estudio y análisis de cada una de las cinco propuestas.



Gráfica 27. “Ratio inliers” de las diversas combinaciones de algoritmos que no incluyen análisis multiescala.

Anexo G, Estudio y estructuración de la implementación de metodologías desarrolladas.

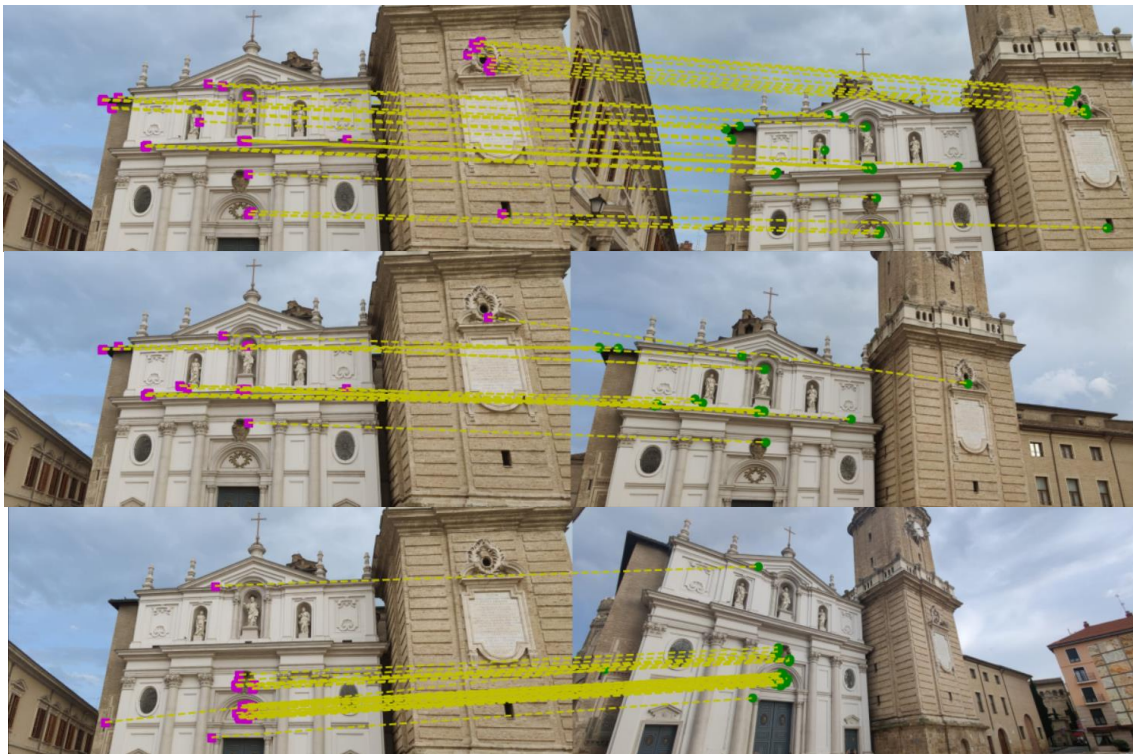
| WITH MULTISCALE            |                |                |                |                |                |
|----------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|                            | IMG 1 VS IMG 2 | IMG 1 VS IMG 3 | IMG 1 VS IMG 4 | IMG 1 VS IMG 5 | IMG 1 VS IMG 6 |
| <b>OPTION 1</b>            |                |                |                |                |                |
| nº KEYPOINTS               | 500            | 500            | 500            | 500            | 500            |
| nº POINTS MULTISCALE       | 202            |                |                |                |                |
| MATCHES knn                | 148            | 149            | 157            | 118            | 125            |
| PRE-FILTER ROT. ANGLE (30) | 137            | 142            | 143            | 13             | 12             |
| INLIERS                    | 117            | 121            | 126            | 5              | 0              |
| INLIERS RATIO              | 0,854014599    | 0,852112676    | 0,881118881    | 0,384615385    | 0              |
| <b>OPTION 2</b>            |                |                |                |                |                |
| nº KEYPOINTS               | 500            | 500            | 500            | 500            | 500            |
| nº POINTS MULTISCALE       | 202            |                |                |                |                |
| MATCHES knn                | 148            | 149            | 157            | 118            | 125            |
| PRE-FILTER SIZE AREA (10)  | 80             | 87             | 102            | 61             | 58             |
| INLIERS                    | 78             | 83             | 99             | 53             | 51             |
| INLIERS RATIO              | 0,975          | 0,954022989    | 0,970588235    | 0,868852459    | 0,879310345    |
| <b>OPTION 3</b>            |                |                |                |                |                |
| nº KEYPOINTS               | 500            | 500            | 500            | 500            | 500            |
| nº POINTS MULTISCALE       | 202            |                |                |                |                |
| MATCHES knn                | 148            | 149            | 157            | 118            | 125            |
| FILTER ANGLES (30)         | 125            | 128            | 137            | 65             | 85             |
| INLIERS                    | 115            | 120            | 126            | 55             | 72             |
| INLIERS RATIO              | 0,92           | 0,9375         | 0,919708029    | 0,846153846    | 0,847058824    |
| <b>OPTION 4</b>            |                |                |                |                |                |
| nº KEYPOINTS               | 500            | 500            | 500            | 500            | 500            |
| nº POINTS MULTISCALE       | 202            |                |                |                |                |
| MATCHES knn                | 148            | 149            | 157            | 118            | 125            |
| PRE-FILTER ROT. ANGLE (30) | 137            | 142            | 143            | 13             | 12             |
| FILTER ANGLES (30)         | 125            | 128            | 137            | 5              | 3              |
| INLIERS                    | 115            | 120            | 126            | 4              | 0              |
| INLIERS RATIO              | 0,92           | 0,9375         | 0,919708029    | 0,8            | 0              |
| <b>OPTION 5</b>            |                |                |                |                |                |
| nº KEYPOINTS               | 500            | 500            | 500            | 500            | 500            |
| nº POINTS MULTISCALE       | 202            |                |                |                |                |
| MATCHES knn                | 148            | 149            | 157            | 118            | 125            |
| PRE-FILTER SIZE AREA (10)  | 80             | 87             | 102            | 61             | 58             |
| FILTER ANGLES (30)         | 80             | 85             | 102            | 54             | 55             |
| INLIERS                    | 78             | 83             | 99             | 52             | 51             |
| INLIERS RATIO              | 0,975          | 0,976470588    | 0,970588235    | 0,962962963    | 0,927272727    |

Tabla 24. Resultados de las configuraciones con multirresolución de la secuencia de imágenes de la imagen 38.

## Anexo H, Resultados de las técnicas de visión en exteriores.

En este anexo se ha evaluado la estructura compuesta por los algoritmos de análisis multirresolución, pre-filtrado de áreas y filtrado de ángulos sobre algún par de imágenes de edificios para determinar correspondencias y poder comprobar el funcionamiento en entornos exteriores.

Se ha seleccionado como detector de puntos clave ORB y como extractor de características BEBLID. Fijándose el número de “keypoints” en 1000 y escogido la escala del grafo piramidal del análisis multirresolución con la escala más próxima a 200 puntos característicos.



**Imagen 49. Correspondencias entre diversas imágenes de la fachada de La Seo del Salvador en su Epifanía en Zaragoza.**

El margen impuesto en el pre-filtrado de áreas es de 10 y de  $30^\circ$  en el filtrado por ángulos, en algún par de imágenes pueden observarse correspondencias erróneas, pudiendo solventarse este problema disminuyendo los márgenes en ambos métodos.



Imagen 50. Correspondencias entre diversas imágenes de la fachada de la sala de exposiciones La Lonja en Zaragoza.

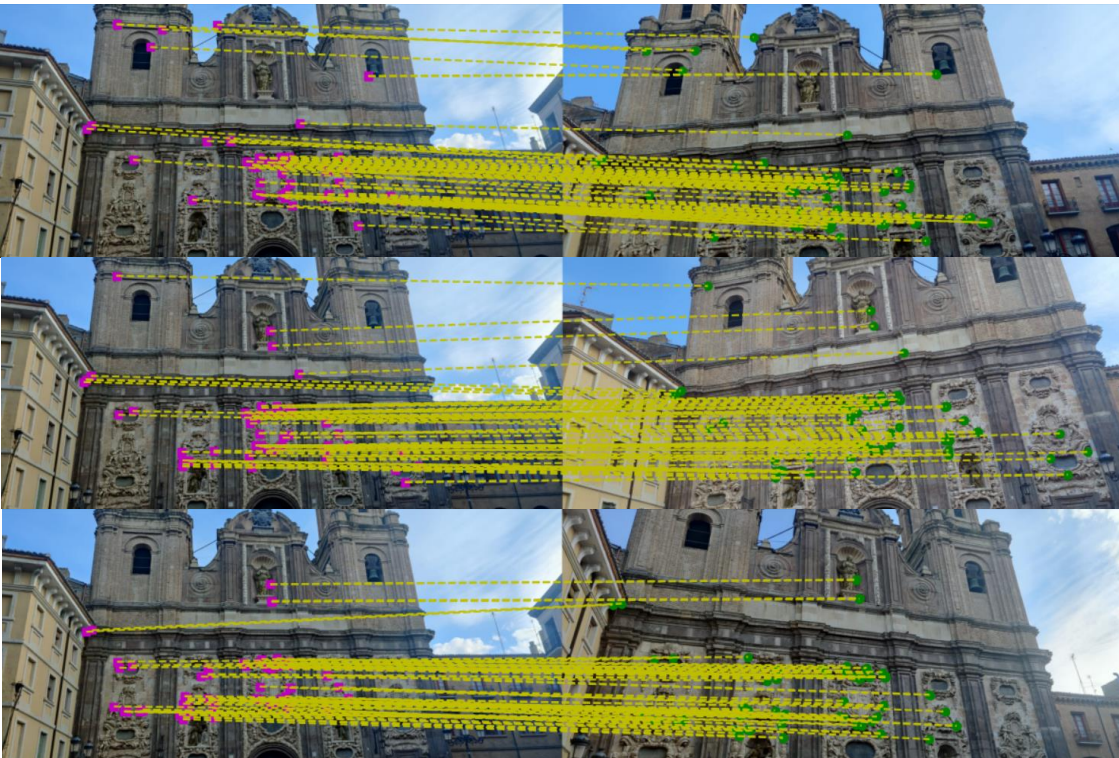


Imagen 51. Correspondencias entre diversas imágenes de la fachada de la iglesia de Santa Isabel de Portugal en Zaragoza.



Imagen 52. Correspondencias entre diversas imágenes del museo Pablo Gargallo de Zaragoza.