

TESIS DOCTORAL

2019

**Reconocimiento de una plataforma para
aproximación de vehículos no tripulados
mediante técnicas de Visión por
Computador**

D. JOSÉ ANTONIO GARCÍA PULIDO

Ingeniero en Informática
Máster en Ingeniería de Sistemas y Control

**PROGRAMA DE DOCTORADO
EN INGENIERÍA DE SISTEMAS Y CONTROL**

**Director: Dr. D. GONZALO PAJARES MARTINSANZ
Codirector: Dr. D. SEBASTIÁN DORMIDO BENCOMO**

TESIS DOCTORAL

2019

**Reconocimiento de una plataforma para
aproximación de vehículos no tripulados
mediante técnicas de Visión por
Computador**

D. JOSÉ ANTONIO GARCÍA PULIDO

Ingeniero en Informática
Máster en Ingeniería de Sistemas y Control

**PROGRAMA DE DOCTORADO
EN INGENIERÍA DE SISTEMAS Y CONTROL**

**Director: Dr. D. GONZALO PAJARES MARTINSANZ
Codirector: Dr. D. SEBASTIÁN DORMIDO BENCOMO**

a mi mujer, Rebeca

Agradecimientos

A mi mujer, Rebeca, por la enorme paciencia que ha tenido durante todos estos años, y a la gran cantidad de sacrificios que ha realizado para que yo alcanzara esta meta. Su ayuda, siempre noble e incondicional, me ha dado la estabilidad emocional necesaria para superar este gran reto, a pesar de que su vida personal se ha visto lastrada en cierto modo, por las ingentes cantidades de tiempo que he dedicado a este proyecto. Haber convivido con un doctorando durante 5 años en los que también ha estado trabajando, es digno de todo elogio.

En segundo lugar, me faltan las palabras para agradecer al director de esta tesis, el Dr. Gonzalo Pajares Martinsanz, por toda la ayuda que me ha brindado, no solo en esta investigación, sino durante los últimos siete años. Gonzalo me impartió dos asignaturas, y me dirigió el Trabajo de Fin de Máster con relación al Máster de Ingeniería de Sistemas y Control, el cual finalmente derivó en el nacimiento de esta tesis, en la que participó de forma muy activa, tanto en su dirección como en su revisión, demostrando en todo momento un gran desempeño y profesionalidad. He de señalar al respecto, que para mí ha sido un auténtico honor y un privilegio haber podido trabajar codo con codo con él durante todo este tiempo.

En tercer lugar, y no menos importante, quiero expresar mi inmensa gratitud y reconocimiento al codirector de esta tesis, el Dr. Sebastián Dormido Bencomo, que me ha guiado y motivado con una gran maestría y liderazgo a lo largo de todos estos años, para que no perdiera el rumbo y pudiera alcanzar el objetivo final de esta investigación, la cual se materializa a través de esta memoria de tesis. Su cercanía, afecto y confianza demostrada en mi persona desde el inicio han sido dos pilares emocionales fundamentales para lograr esta meta.

En cuarto lugar, y no menos importante, quiero agradecer especialmente al Dr. Mike Bernstein, compañero mío de trabajo y químico especialista en el área de resonancia magnética nuclear (RMN), por el soporte lingüístico que nos ha brindado con relación al inglés. Dedicó una gran cantidad de su tiempo libre a revisar y resolver con destreza y profesionalidad todos los problemas que tuvimos en los procesos de publicación a las revistas, llevando a cabo cambios y correcciones en las estructuras gramaticales sobre los resultados publicados. Sin su refinamiento y pulido lingüístico, el proceso de publicación hubiera sido más tedioso todavía.

No quisiera olvidarme también del físico Felipe Seoane, otro gran compañero de trabajo durante mi etapa como doctorando, que me proporcionó soporte durante toda la fase de publicación a las revistas, proponiendo métodos, cambios y mejoras léxicas que han ayudado a mejorar la calidad de los manuscritos. A mayores, también me asesoró con destreza y determinación durante una parte del proceso de investigación, escuchando y formulando mejoras técnicas.

Finalmente, y como no podía ser de otra forma, quisiera agradecer de todo corazón a mis padres, José Antonio y Esther por el apoyo y la confianza que me han proporcionado durante toda mi vida. Sin su ayuda, sus consejos y su tenacidad, siempre tratándome de orientar hacia el buen camino, nunca hubiera recibido la educación necesaria que me permitiera abordar un trabajo de esta envergadura. En este sentido, me gustaría hacer una

mención especial a mi padre, puesto que ha sido mi mecenas proporcionándome un apoyo incondicional y sufragándome todos los gastos relacionados con los estudios desde que era un niño. Por fin, esta vez hemos llegado al final del camino.

Palabras Clave - Keywords

Sistema Experto, Vehículo Autónomo Aéreo (Unmanned Aerial Vehicles), Visión por Computador, Plataforma de aterrizaje, Procesamiento de imágenes, Reconocimiento de patrones, UAV, Binarización, Segmentación, Reconocimiento de regiones, Toma de decisiones.

ÍNDICE de Contenidos

AGRADECIMIENTOS	7
PALABRAS CLAVE - KEYWORDS.....	9
RESUMEN	17
ABSTRACT.....	19
LISTADO DE ACRÓNIMOS	21
CAPÍTULO 1 - INTRODUCCIÓN.....	23
1.1 – CONSIDERACIONES GENERALES	23
1.2 – DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	23
1.2.1 – <i>Problema con la adquisición</i>	25
1.3 – OBJETIVOS	26
1.4 – CONTRIBUCIONES MÁS RELEVANTES.....	26
1.5 – ORGANIZACIÓN DEL TRABAJO	27
CAPÍTULO 2 - ESTADO DEL ARTE	29
2.1 – VISIÓN GENERAL	29
2.2 – MÉTODOS RELACIONADOS	29
2.2.1 – <i>Comparativa de métodos</i>	36
2.3 – PATENTES	37
CAPÍTULO 3 - MÉTODO 1: SISTEMA EXPERTO.....	41
3.1 – INTRODUCCIÓN	41
3.2 – CONTRIBUCIONES	43
3.3 – DESCRIPCIÓN GEOMÉTRICA DE LA PLATAFORMA	44
3.4 – ESTRATEGIA PROPUESTA	46
3.4.1 – <i>Diagrama de Flujo y Arquitectura</i>	46
3.4.2 – <i>Adquisición de imágenes</i>	48
3.4.3 – <i>Segmentación de la imagen</i>	48
3.4.4 – <i>Detección de subfiguras</i>	49
3.4.5 – <i>Reconocimiento de la imagen</i>	55
3.5 – RESULTADOS	56
3.5.1 – <i>Entorno de adquisición de imágenes</i>	57
3.5.2 – <i>Pruebas relativas a la distancia</i>	58
3.5.2.1 – Ejemplos ilustrativos con relación a la distancia	60
3.5.3 – <i>Pruebas relativas al ángulo de inclinación</i>	60
3.5.3.1 – Ejemplos ilustrativos en relación con el ángulo de inclinación	61
3.5.4 – <i>Pruebas relativas a las condiciones de iluminación</i>	62
3.5.4.1 – Ejemplos ilustrativos con relación a condiciones de iluminación diversas.....	63
3.5.5 – <i>Evaluación del método</i>	64
3.5.6 – <i>Resumen global de los resultados</i>	65
CAPÍTULO 4 - MÉTODO 2: COMBINACIÓN DE COLOR Y RELACIONES GEOMÉTRICAS	69
4.1 – CONSIDERACIONES PRELIMINARES	69
4.2 – CONTRIBUCIONES	69
4.3 – DESCRIPCIÓN DE LA PLATAFORMA Y SUS CARACTERÍSTICAS	70
4.4 – ESTRATEGIA PROPUESTA	71
4.4.1 – <i>Arquitectura</i>	71
4.4.2 – <i>Preprocesado</i>	72
4.4.3 – <i>Extracción de características</i>	73
4.4.4 – <i>Reconocimiento</i>	74
4.4.4.1 – Identificación individual de los marcadores	74
4.4.4.2 – Análisis geométrico de distancia euclídea (EDGA)	76
4.4.5 – <i>Cálculo del grado de reconocimiento</i>	78

4.4.5.1 – Descriptores métricos	78
4.4.5.2 – Grado de reconocimiento	79
4.5 – RESULTADOS	81
4.5.1 – <i>Entorno de adquisición de imágenes</i>	81
4.5.2 – <i>Pruebas relativas a la distancia</i>	82
4.5.2.1 – Ejemplos ilustrativos con relación a la distancia	83
4.5.3 – <i>Pruebas relativas al ángulo de inclinación</i>	84
4.5.3.1 – Ejemplos ilustrativos con relación al ángulo de inclinación	85
4.5.4 – <i>Pruebas relativas a las condiciones de iluminación</i>	85
4.5.4.1 – Ejemplos ilustrativos con relación a condiciones lumínicas diversas	86
4.5.5 – <i>Evaluación del resultado según el grado de reconocimiento</i>	87
CAPÍTULO 5 - CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO	91
5.1– <i>LÍNEAS DE ACTUACIÓN FUTURA</i>	92
BIBLIOGRAFÍA.....	95
ANEXO I.....	103
TABLA A1	103
TABLA A2	110
ANEXO II.....	131
TABLA B1.....	131
TABLA B2.....	132
TABLA B3.....	134

ÍNDICE de Figuras

Figura 1-1 – Plataforma de aproximación para el método 1 [2]	24
Figura 1-2 – Plataforma de aproximación para el método 2.....	25
Figura 1-3 – Adquisición (a) Problema adquisición 1; (b) Problema adquisición 2.....	26
Figura 2-1 – Plataforma de aproximación de Chen et al. [39].....	31
Figura 2-2 – Plataforma de aproximación de Sharp et al. [43].....	31
Figura 2-3 – Plataforma de aproximación de Saripalli et al. [48].....	32
Figura 2-4 – Plataforma de aproximación de Cocchioni et al. [50].....	32
Figura 2-5 – Plataforma de aproximación de Guili et al. [53].....	33
Figura 2-6 – Plataforma de aproximación de Lange et al. [54].....	34
Figura 2-7 – Plataforma de aproximación de Chaves et al. [63].....	34
Figura 2-8 – Plataforma de aproximación de Nguyen et al. [11].....	35
Figura 3-1 – Dos secuencias de vuelo de un cuatri-rotor equipado con un smartphone.....	41
Figura 3-2 – Plataforma patentada para aterrizaje de UAVs	42
Figura 3-3 – Plataforma de aterrizaje de UAVs a bordo de un barco autónomo	42
Figura 3-4 – Características geométricas y umbrales de detección	45
Figura 3-5 – Diagrama de bloques de la solución con granularidad gruesa	46
Figura 3-6 – Diagrama de flujo con la solución propuesta de granularidad fina	47
Figura 3-7 – Arquitectura del método 1 basado en sistema experto [1]	48
Figura 3-8 – Diagrama de flujo del algoritmo de identificación de elipses	52
Figura 3-9 – Diagrama de flujo del algoritmo de identificación de círculos	54
Figura 3-10 – Ejemplo ilustrativo de los resultados obtenidos en cada proceso	57
Figura 3-11 – Efectividad con relación a la distancia (m) para las dos cámaras. (a) Efectividad general por tipo de cámara. (b) Efectividad por tipo de configuración para el Samsung Galaxy S6	59
Figura 3-12 – Ejemplos ilustrativos con relación a distancias antagónicas bajo las mismas condiciones de iluminación: (A) a 6.3 m; (B) a 0.66 m	60
Figura 3-13 – Efectividad con relación al ángulo de inclinación. (a) Efectividad general por tipo de cámara. (b) Efectividad por tipo de configuración para el Samsung Galaxy S6	61
Figura 3-14 – Ejemplos ilustrativos con relación al ángulo de inclinación: (A) reconocimiento exitoso con 50.71°; (B) reconocimiento fallido con 56.31°	62
Figura 3-15 – Efectividad con relación a las condiciones lumínicas. (a) Efectividad general por tipo de cámara. (b) Efectividad por tipo de configuración para el Samsung Galaxy S6	62
Figura 3-16 – Ejemplos ilustrativos con relación a las condiciones lumínicas: (A) sol y sombra; (B) soleado.....	63
Figura 3-17 – Fiabilidad real del grado de reconocimiento devuelto por el método 1	65
Figura 4-1 – Plataforma de aterrizaje con subfiguras y relaciones geométricas.....	70
Figura 4-2 – Diseño y arquitectura del método 2 basado en el color y relaciones geométricas	72
Figura 4-3 – Ejemplo ilustrativo para resolver problemas, incluso con reflexiones especulares	78
Figura 4-4 – Efectividad con relación a la distancia (m) para el método 2 y el método 1: (a) Intervalos exclusivos; (b) intervalos agregados (acumulativos).....	83
Figura 4-5 – Ejemplos ilustrativos con relación a distancias antagónicas bajo las mismas condiciones de iluminación: (A) a 8.94 m; (B) a 0.67 m	84
Figura 4-6 – Efectividad con relación al ángulo de inclinación (grados) para el método 2 y el método 1: (a) Intervalos exclusivos; (b) intervalos agregados (acumulativos).....	85
Figura 4-7 – Ejemplos ilustrativos con relación a ángulos de inclinación elevados bajo las mismas condiciones de iluminación: (A) 59.78°; (B) 61.17°.....	85
Figura 4-8 – Efectividad con relación a diferentes condiciones lumínicas.....	86
Figura 4-9 – Ejemplos ilustrativos bajo diferentes condiciones de iluminación entornos de interior (A) y exterior (B).	87
Figura 4-10 – Puntuación devuelta por el método de reconocimiento. (a) Puntuación por distancia. (b) Puntuación por ángulo de inclinación. (c) Puntuación según las condiciones de iluminación	88
Figura 4-11 – Fiabilidad real del grado de reconocimiento devuelto por el método 2	89

ÍNDICE de Tablas

Tabla 1-1 – Listado de Acrónimos	21
Tabla 2-1 – Resumen comparativo de los métodos previos y los propuestos.....	36
Tabla 3-1 – Análisis Parciales Comparativos (APC). Umbrales y constantes se definen en la figura 3-4 .	56
Tabla 3-2 – Matriz de resultado de evaluación del grado de reconocimiento	64
Tabla 3-3 – Resumen de la tasa de éxito (%) en función de la distancia y la inclinación.	65
Tabla 3-4 – Resumen de la tasa de éxito (%) en función de las condiciones de iluminación.....	66
Tabla 3-5 – Resumen de la tasa de éxito (%) para la distancia y el ángulo de inclinación de una manera en que los intervalos se excluyen entre sí. "NA" indica datos no disponibles.....	66
Tabla 3-6 – Resumen de la tasa de éxito (%) con relación a la distancia y el ángulo de inclinación. Se usan intervalos agregados.....	67
Tabla 4-1 – Valores numéricos CIELAB y umbral para llevar a cabo la segmentación por color	74
Tabla 4-2 – Promedio de valores numéricos para los siete momentos de Hu por marcador	74
Tabla A1 – Característica de las imágenes usadas en la fase experimental del método 1	109
Tabla A2 – Detalle de resultados para las imágenes experimentales del método 1.....	130
Tabla B1 – Ecuaciones basadas en el área para obtener el grado de reconocimiento del método 2.....	131
Tabla B2 – Ecuaciones basadas en la distancia para obtener el grado de reconocimiento del método 2 .	133
Tabla B3 – Ecuaciones basadas en los ángulos para obtener el grado de reconocimiento del método 2 .	135

Resumen

El uso de los vehículos aéreos no tripulados (UAV, *Unmanned Aerial Vehicles*), está creciendo significativamente para muchos y muy variados propósitos. Mientras que los UAV avanzados usan el aterrizaje auto-guiado soportado por dispositivos GPS, ésta es una maniobra precisa y crítica que requiere de una ayuda adicional. Muchos UAVs están equipados con una o varias cámaras que operan en el rango espectral visible, lo que proporciona una excelente herramienta para dar soporte en el aterrizaje automático con la precisión requerida.

Se necesita una consideración adicional para una mayor seguridad y prevención de posibles inconvenientes durante el aterrizaje, derivados principalmente de la pérdida de señal o de la precisión insuficiente del GPS. Esto contribuye en gran medida al éxito general del vuelo autónomo. En este sentido, para abordar esta problemática, esta tesis propone como principal contribución, dos métodos diferentes y específicos, que permiten llevar a cabo el reconocimiento de una plataforma de aterrizaje en imágenes de color mediante técnicas de Visión por Computador.

Por un lado, se ha desarrollado un novedoso Sistema Experto automático [1] que se encarga de reconocer la plataforma en una imagen. La plataforma consta de una figura geométrica tipografiada en negro sobre fondo blanco [2], utilizada en el proyecto SALACOM [3] financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad. El sistema diseñado incorpora el conocimiento experto humano mediante una secuencia de técnicas de procesamiento de imágenes y visión de alto nivel. El resultado final es una aplicación inteligente para el reconocimiento de la plataforma, suficientemente fiable como para su incorporación en un UAV equipado con una cámara a color, y que resulta especialmente robusta para los de ala giratoria.

Durante la fase experimental se ha constatado la problemática inherente para este tipo de diseños, derivados principalmente de dos circunstancias adversas: 1) los reflejos originados por la iluminación natural que causa la desaparición de determinadas partes de la figura, como consecuencia de la saturación de los niveles de intensidad, haciendo que partes negras aparezcan blancas como consecuencia del reflejo; 2) la necesidad de interrelacionar regiones, extrayendo medidas relativas, causa que las distorsiones de las figuras, como por ejemplo, círculos percibidos como elipses, o la misma desaparición de regiones debido a la saturación mencionada, provoquen que tales medidas relativas no sean suficientes para el reconocimiento.

En este sentido y para superar este inconveniente, se propone una nueva estrategia, también basada en el ámbito de la visión artificial, que combina el procesamiento de imágenes en color y las técnicas de reconocimiento de patrones, incluyendo además un análisis geométrico de distancia Euclídea (EDGA). Esto lleva al diseño de una nueva plataforma específica para su identificación, que permite solventar la problemática indicada previamente. El diseño de esta plataforma se basa con esencia en: 1) información de color en el rango espectral visible, con colores únicos para cada figura, con escasa o nula presencia en entornos naturales y urbanos y 2) figuras geométricas, que permiten su percepción parcial individualizada. Este método calcula el grado de reconocimiento de la plataforma a partir del número total de figuras detectadas en conjunción con las relaciones

geométricas entre dichas figuras, de tal forma que las relaciones dos a dos conjuntadas permiten tomar una decisión global sobre el reconocimiento.

La evidencia experimental llevada a cabo permite validar los dos procedimientos de reconocimiento desarrollados, teniendo en cuenta, además, que en el segundo caso se da solución a la problemática identificada en el primero.

Abstract

The use of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) is growing significantly for many and varied purposes. Whilst advanced UAVs use auto-guided landing supported by GPS devices, this is a precise critical maneuver requiring additional support. Many UAVs are equipped with vision-based cameras operating in the visible spectral range, and this offers an excellent tool to aid in automatic landing with the required precision.

Careful consideration is needed for enhanced security and prevention of possible issues derived from GPS problems, such as signal loss, support for indoor environments, accuracy issues, etc. This contributes greatly to the overall success of autonomous flight. In this sense, to address this problem, this thesis proposes as its main contribution, two different methods that are based on the recognition of a landing platform in color images by using Computer Vision techniques.

On the one hand, it has been developed a novelty automatic Expert System [1] that recognizes the platform in an image. The platform contains a black geometric figure drawn on a white background [2], used in the SALACOM project [3] funded by the Ministry of Economy and Competitiveness. The designed system incorporates the human expert knowledge using a sequence of high-level vision and image processing techniques. A smart application for the recognition of the landing platform has been developed as a result. It is reliable enough for its incorporation in a UAV equipped with a color camera, being especially robust for the rotary wing UAVs.

During the experimental phase the inherent problematic for this type of designs has been addressed, derived mainly from two adverse circumstances: 1) the reflections originated by the natural lighting condition that causes the disappearance of certain parts of the figure, as a consequence of the saturation of the intensity levels, causing black parts to appear white as a result of the reflection; 2) the necessity of interrelating regions, by extracting relative measures, causes the distortions of the figures, for example, circles perceived as ellipses, or the same disappearance of regions due to the above-mentioned saturation, origin relative measurements to be insufficient for recognition.

In this sense and to overcome this drawback, a new strategy based on the artificial vision field has been proposed. Both the color image processing and pattern recognition techniques has been combined together with a Euclidean Distance Geometric Analysis (EDGA). This leads to the design of a new specific platform for identification, which allows solving the problems above. The design of this new platform is based on: 1) color information in the visible spectral range, with unique colors for each figure, with little or no presence in natural and urban environments and 2) geometric figures, which allow partial individualized perception. This method calculates the recognition degree of the platform from the overall detected figures in conjunction with the geometric relationships between these figures, in such a way, that the 2-groups of regions allow a decision to be performed about recognition.

The experimental evidence carried out allows the validation of the two developed recognition procedures, taking into account that the problem identified during the first approach has been fixed in the second one.

Listado de Acrónimos

A continuación, se muestra una tabla ordenada alfabéticamente en la que se recogen algunos de los principales acrónimos usados durante la elaboración de esta memoria de tesis:

SIGLAS	IDIOMA	DESCRIPCIÓN
APC	Español	Análisis Parcial Comparativo
CIELAB	Inglés	CIE 1976 L*a*b*
EDGA	Inglés	Euclidean Distance Geometric Analysis
IMU	Inglés	Inertial Measurement Unit
RGB	Inglés	Red, Green, Blue
UAV	Inglés	Unmanned Aerial Vehicle
GPS	Inglés	Global Positioning System

Tabla 1-1 – Listado de Acrónimos

Capítulo 1 - Introducción

En este capítulo se expone una breve introducción del problema, así como los principales objetivos planteados en la investigación plasmada en esta memoria de tesis.

1.1 – Consideraciones generales

Los sistemas de visión artificial son dispositivos útiles y comúnmente utilizados a bordo de UAVs (*Unmanned Aerial Vehicles*) que realizan diversas tareas, tales como la identificación de cultivos y malezas en campos de maíz [4], gestión del tráfico rodado [5] o revisión de daños por inundación [6], sólo por citar algunas de ellas. Por lo tanto, su uso está creciendo significativamente para una amplia gama de propósitos y misiones [7]. Algunas de estas misiones están relacionadas con tareas de vigilancia, como la identificación y el rescate de personas, o el control de las infraestructuras civiles [8], mientras que otras abordan la navegación y la prevención de obstáculos. Además, algunas multinacionales de comercio electrónico, como puede ser Amazon, están desarrollando sistemas para entregar paquetes a sus clientes mediante el uso de una plataforma de aterrizaje con un código que indica al UAV dónde debe realizar la entrega del paquete, y, por consiguiente, dónde debe aterrizar, o al menos aproximarse [9].

El aterrizaje autónomo de UAVs es una tarea compleja, con diversos problemas asociados, demandando una especial atención y encontrándose en pleno proceso de investigación. Una vez que la misión está a punto de completarse, el UAV debe aterrizar en un lugar seguro, que puede determinarse mediante el uso de una plataforma de aterrizaje que contiene un patrón o estructura conocida. La mayoría de estas misiones implica llevar a cabo una trayectoria planificada que requiere de un aterrizaje preciso y fiable. Dicho aterrizaje es una maniobra particularmente compleja, debido principalmente a que la señal proveniente del sistema GPS que guía el vuelo, a menudo se vuelve ineficaz, imprecisa, o inexistente en el caso de interiores.

El uso del sistema de visión artificial, junto con una plataforma de aterrizaje y un algoritmo específico a bordo del UAV que se encarga de reconocerla, se convierten en una excelente herramienta para superar este problema. No obstante, como paso previo a la incorporación del sistema de reconocimiento a bordo de un UAV con carácter operativo, ha sido necesaria la experimentación en distintos escenarios en tierra, con el fin de valorar la eficiencia de los métodos desarrollados. Este aspecto constituye el objetivo principal de la investigación.

1.2 – Descripción del Problema

A pesar de que el sistema de navegación empleado por los UAVs se fundamenta esencialmente en un sistema satelital de posicionamiento global (GPS), se requiere el uso de una plataforma de aproximación que sirva para conocer la orientación y posición relativa entre el vehículo y su base, para así poder alcanzar el lugar exacto de aterrizaje, en la parte final del mismo. Asimismo, el receptor GPS permite al vehículo aproximarse hasta los alrededores en los que se le indica la zona de aterrizaje donde se encuentra ubicada la plataforma de aproximación, siendo la propia plataforma la que le sirve para orientarse

y determinar el lugar exacto donde posicionarse. Para lograr este objetivo, la plataforma se diseña bajo distintas configuraciones, incluyendo símbolos y figuras geométricas específicas, que facilitan su identificación en las imágenes capturadas por una cámara a bordo del UAV y operando en el espectro visible. Para ello se utilizan técnicas específicas de visión por computador convenientemente estructuradas, que trasladan el conocimiento y razonamiento humano al sistema de visión artificial.

En el trabajo de investigación reflejado en esta tesis, se describen dos métodos diferentes para abordar este problema, ambos bajo el diseño de sendas plataformas que son específicas para cada uno.

Por consiguiente, se han utilizado o diseñado dos patrones distintos que deberán ser reconocidos en función de cada método aplicado. El primer método, referido a partir de este momento, como **método 1**, está basado en un Sistema Experto [1], cuya base es una plataforma patentada [2], que fue utilizada en el proyecto SALACOM, financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad [3], que contiene una figura geométrica sobre un fondo blanco. De este modo, el objetivo del método 1 consiste en reconocer la plataforma que se muestra en la figura 1-1.

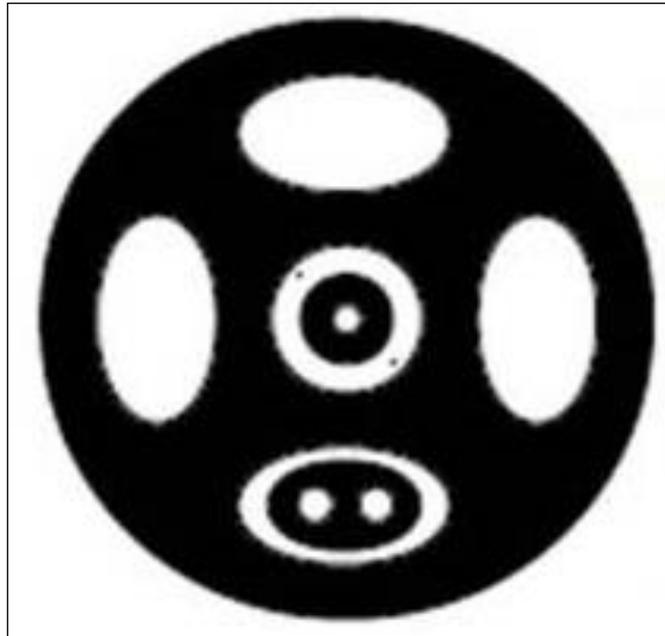


Figura 1-1 – Plataforma de aproximación para el método 1 [2]

El segundo método propuesto, identificado a partir de ahora como **método 2**, basado en combinación de color y relaciones geométricas, se fundamenta en el diseño de una nueva plataforma con la metodología asociada también en el campo de la visión por computador, cuyo objetivo es resolver la problemática surgida durante los experimentos desarrollados con la plataforma utilizada en el método 1. Además, también se trata de dar solución a la problemática que plantean otras plataformas, tal y como se recoge en el estado del arte descrito en el capítulo dos.

La idea subyacente para tal diseño se fundamenta en el hecho de que, en lugar de usar figuras geométricas complejas basadas en círculos o elipses, se utilizan seis figuras geométricas más simples, siendo todas ellas totalmente diferentes entre sí, como se puede

observar en la figura 1-2. Además, otro de los aspectos clave, es que cada una de las seis figuras posee un color único. De esta forma cabe la identificación de la plataforma por la diferenciación entre las formas geométricas y las variaciones espectrales en el rango visible.

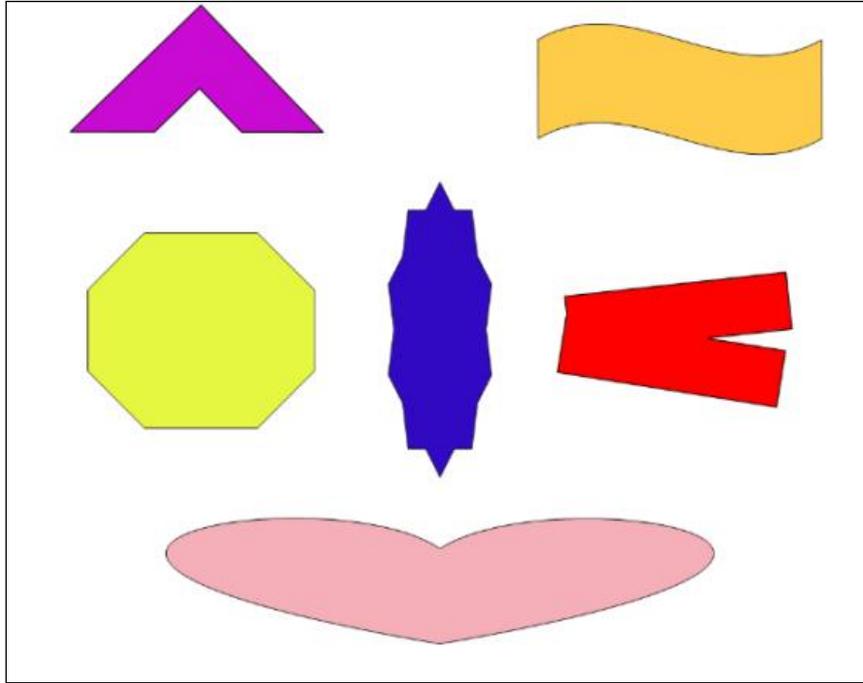


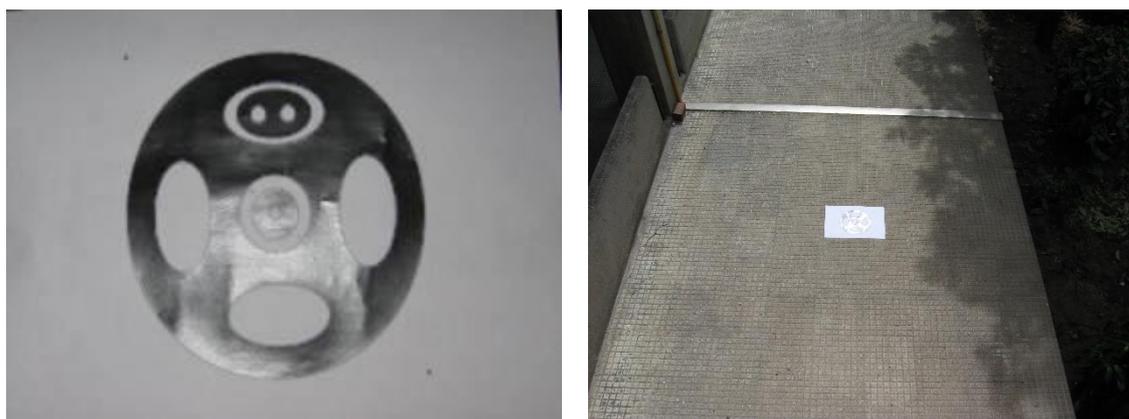
Figura 1-2 – Plataforma de aproximación para el método 2

1.2.1 – Problema con la adquisición

A partir de la segunda premisa que se acaba de postular, resulta factible intuir la dificultad inherente que conlleva un proceso de adquisición de imágenes, particularmente aéreas, en un entorno de exterior, donde resulta difícil controlar parámetros tan relevantes como el nivel de luminosidad, el grado de inclinación del dispositivo de captura (cámara) con respecto a la plataforma, o la distancia entre la cámara y la propia plataforma.

Tomando como referencia la plataforma de la figura 1-1, esto origina diversos efectos adversos como los que se muestran en la figura 1-3. En efecto, en la parte (a) de dicha figura aparece un intenso reflejo en la parte inferior, debido a la luminosidad, que dificulta el proceso de segmentación de la figura para su posterior identificación. En la parte (b) son claramente perceptibles los efectos producidos por la inclinación de la cámara y su distancia con respecto a la plataforma, observándose la distorsión geométrica de la figura, y la escasa diferenciación de dicha figura con respecto al fondo.

Si a esto se le añade que la autonomía del vehículo es limitada, y que por tanto se dispone de un tiempo determinado (en un entorno aéreo aún es más importante ya que el UAV puede caer de forma incontrolada) para tomar una imagen de la plataforma, que tenga un nivel de calidad suficientemente bueno como para identificar la figura mediante el uso de técnicas de visión por computador, el problema no tiene una solución trivial.



(a)

(b)

Figura 1-3 – Adquisición (a) Problema adquisición 1; (b) Problema adquisición 2

1.3 – Objetivos

El objetivo fundamental que se persigue en la investigación, plasmada en la presente memoria de tesis, es desarrollar un procedimiento mediante el uso de técnicas de visión por computador, que sirva para identificar de la forma más precisa posible, una plataforma de aterrizaje, para que éste se produzca con la máxima seguridad.

Este objetivo se desglosa en las siguientes consideraciones con carácter específico:

- 1) Estudio del desempeño de los métodos 1 y 2, propuestos para la identificación de sendas plataformas.
- 2) Análisis del comportamiento y robustez de sendos métodos bajo diferentes condiciones de captura en entornos reales de exterior, a saber:
 - a) Cambios en la iluminación natural en días soleados, nublados y según la captura a lo largo del día (mañana, mediodía o tarde).
 - b) Distorsiones debidas a la proyección de perspectiva debido a diferentes posicionamientos de la cámara con respecto a la plataforma.
- 3) Análisis de los resultados experimentales y formulación de conclusiones.

Para la consecución de estos objetivos resulta fundamental extraer un número importante de imágenes bajo las diferentes condiciones expresadas en los objetivos.

Además, la eficiencia computacional también juega un papel fundamental, ya que en un entorno productivo de tiempo real donde la autonomía operativa del UAV resulta un aspecto crítico, la eficiencia en el reconocimiento también es importante.

1.4 – Contribuciones más Relevantes

A continuación, se exponen las contribuciones más relevantes para cada uno de los dos métodos:

1) Método 1:

- a) Se sustenta en un proceso de segmentación que se basa en la binarización y la extracción de propiedades de regiones.
- b) Desarrollo de una estrategia de identificación basada en las relaciones geométricas entre sub-regiones.
- c) Sistema experto que plasma un razonamiento humano para determinar el grado de reconocimiento (probabilidad) analizando las relaciones entre las diferentes sub-regiones.

2) Método 2:

- a) Proceso de segmentación basado en el análisis espectral por colores para paliar efectos de saturación de intensidades como consecuencia de brillos excesivos, derivados de reflejos por una exposición lumínica incontrolada.
- b) Identificación basada en la combinación de la información espectral y geométrica, obteniendo el grado de reconocimiento mediante una función de similitud con respecto a una plataforma objetivo, basada en la distancia Euclídea (EDGA), con vistas a una decisión final.
- c) Mejora del proceso de gestión de áreas no visibles y sub-regiones no detectadas, que permite la identificación de la plataforma con hasta la mitad de las figuras disponibles, concretamente tres figuras.
- d) Determinación del grado de reconocimiento mediante una función basada en dos eventos independientes. Uno analiza el total de figuras detectadas, y el otro las relaciones geométricas entre las regiones.

1.5 – Organización del Trabajo

El trabajo que se presenta en esta memoria se organiza esencialmente en torno a cinco capítulos y dos anexos. En el presente capítulo 1, se incluye una breve introducción, así como una descripción precisa del problema, y una determinación de los objetivos que se persiguen.

En el capítulo 2 se hace un estudio del estado del arte con relación a los principales métodos y patentes existentes para resolver problemas similares al que se propone en esta memoria. Para ello, se realiza un análisis de los mismos con relación a las propuestas que se formulan, al mismo tiempo que se lleva a cabo una síntesis comparativa de los métodos referenciados por medio de una tabla en la que se exponen, tanto las ventajas como los inconvenientes detectados, que sirven de justificación del diseño y para la consideración de las propuestas formuladas y desarrolladas durante la investigación.

En el capítulo 3 se describe el *método 1*, que constituye una aportación relevante [1]. Se trata de un procedimiento que combina diferentes técnicas de procesamiento de imágenes, confluyendo en un proceso de visión de alto nivel, que plasma un razonamiento humano lógico, estructurado en forma de un *Sistema Experto*. La plataforma de aproximación, con una figura base en blanco y negro para su reconocimiento, es un diseño patentado [2]. En el capítulo se describe tanto la arquitectura de diseño como los algoritmos específicos de cara al reconocimiento. Se indican los principales problemas encontrados, y se muestran los resultados obtenidos durante la fase de experimentación, cuya base de comparación la constituyen los métodos descritos en el capítulo dos con relación a la calidad de las imágenes proporcionadas por la cámara en su desempeño final. En el estudio se incluyen algunas de las imágenes más representativas utilizadas en los experimentos, que dan una idea de la problemática inherente. Finalmente, se formulan las conclusiones derivadas del análisis de dichos resultados.

La estructura del capítulo 4 es muy similar a la del anterior, puesto que su finalidad principal es describir el *método 2*. El propósito de este diseño es superar la problemática inherente que plantean los diferentes métodos recogidos en el estado del arte, así como subsanar las dificultades encontradas en el planteamiento realizado en el *método 1*. De este modo, se ha diseñado una plataforma novedosa basada en el uso de diferentes formas geométricas coloreadas, sencillas y únicas, esto es, con nula, o por lo menos escasa probabilidad de aparición en los entornos de exterior, donde se realizan los experimentos, que son los entornos de operatividad habitual del UAV. El objetivo es usar una técnica que combine el reconocimiento por color junto con la detección de formas, apoyándose en un análisis geométrico que utiliza la distancia Euclídea denominado EDGA (Euclidean Distance Geometric Analysis), con el fin de determinar el grado de similitud con respecto a un patrón de plataforma objetivo. Finalmente, se muestran los resultados mediante el uso de un enfoque comparativo que mide el grado cuantitativo de mejora obtenido con respecto al método 1.

Finalmente, en el capítulo 5, se exponen las principales conclusiones obtenidas bajo los planteamientos formulados en los capítulos tres y cuatro, cuyo punto de partida es la revisión de los métodos llevada a cabo en el capítulo dos. Se exponen, igualmente, las principales líneas de actuación futura.

Por último, en el Anexo I se muestran todos los datos utilizados para la elaboración de la sección de resultados del método 1, mientras que en el Anexo II, se muestran las tablas que contienen las ecuaciones usadas en el método 2 para realizar el cálculo del grado de reconocimiento mediante el análisis entre las regiones geométricas que componen la plataforma de aproximación. Dichas ecuaciones son la implementación matemática en forma de inequaciones de las medidas de similitud entre figuras.

Capítulo 2 - Estado del Arte

A lo largo de este capítulo se realiza una breve descripción con relación a los principales métodos, procedimientos y patentes que se han llevado a cabo para resolver problemas similares al que se propone en esta tesis.

2.1 – Visión General

El aterrizaje de un vehículo aéreo resulta ser, en general, una de las fases más críticas que se producen en el transcurso de un vuelo. En los vehículos tripulados el piloto se vale, además de la instrumentación de a bordo y su experiencia previa, de los sentidos del oído (equilibrio) y de la vista para manejar la máquina. Además, cabe resaltar, que en la última fase de la maniobra es cuando resulta necesario utilizar toda la información para obtener un alto grado de precisión que garantice el posado y la parada del vehículo, sin que éste y el piloto sufran daño alguno.

De manera similar, el atraque de un buque en un muelle necesita de la información visual del piloto para su realización. Es por ello que, en los vehículos autónomos, el uso de sistemas de visión artificial ha sido una elección natural lógica para intentar dotar al vehículo de uno de los sentidos usados por los humanos en la misma tarea. Pero disponer de un sistema que capte información visual del entorno no es suficiente para asegurar el éxito de la maniobra, ya que resulta necesario que dicha información visual pueda ser usada con una precisión suficiente, y con un coste computacional, que lo haga apto para procesar la información en tiempo real.

Tras un proceso exhaustivo de búsqueda en el estado del arte de este tipo de plataformas de aproximación, se ha determinado que existen diversas formas de figuras, así como tecnologías ya patentadas que tratan de dar solución al problema descrito anteriormente. Muchas de ellas se basan en el uso de mecanismos que captan la radiación del espectro visible, y otras la radiación infrarroja, más concretamente la térmica.

No obstante, en ambos casos, resulta necesario extraer la información de las imágenes proporcionadas por las cámaras para tener cierto grado de conocimiento de la posición y orientación relativa del vehículo con respecto al punto de aterrizaje/despegue o atraque/partida. En este sentido, cabe reseñar, que la propuesta que se formula en la presente investigación se encuadra dentro de la primera opción, ya que entre otras razones se trata de un problema aún no resuelto, a la vez que los vuelos de UAVs se realizan principalmente en condiciones donde la visibilidad es suficiente y, en cualquier caso, la metodología utilizada puede adaptarse al rango espectral infrarrojo.

2.2 – Métodos relacionados

Se han propuesto una amplia variedad de métodos activos y pasivos basados en estrategias de visión por computador para el aterrizaje preciso de UAVs autónomos [10, 11]. Los métodos activos requieren alguna intervención adicional, además del propio sistema de visión para su guiado durante el aterrizaje, tal y como puede ser el uso de lámparas [12] o emisores de infrarrojos (IR) [13, 14, 15]. Los sistemas IR basados en

captura de imágenes mediante una cámara instalada en el suelo detectan una lámpara láser IR ubicada en las proximidades del morro del UAV [16], en el caso de sistemas con alas fijas; los sistemas de visión IR estéreo también han sido propuestos en algunos desarrollos de interés [17, 18, 19], permitiendo establecer con cierta precisión las distancias a las que se encuentran los objetos. Alternativamente, los sistemas pasivos solo requieren el uso del sistema de visión artificial, sin necesidad de usar elementos o acciones adicionales, y por tanto sin intervención en el entorno. Algunos enfoques de esta naturaleza intentan reconocer el UAV en vuelo, para que sea guiado posteriormente desde una estación terrestre de control [20, 21], o mediante el uso de sensores de flujo óptico [22, 23] que van incorporados en el propio UAV.

Otros métodos determinan un área segura de aterrizaje mediante el análisis del terreno [24, 25], basado en el aprendizaje automático [26], mediante la reconstrucción 3D del terreno [27, 28, 29, 30], o basado en el posicionamiento 3D con dos cámaras situadas en el suelo para UAVs de ala fija [10]. Otra práctica común es el uso de figuras en el suelo con tipologías más o menos significativas, es decir, plataformas de aterrizaje con diseños específicos que contienen determinados dibujos. Diversas técnicas de procesamiento de imágenes especialmente diseñadas a tal efecto logran el reconocimiento de estas figuras, que pueden ubicarse incluso en movimiento [31, 32, 33, 34, 35, 36], y también en barcos [37, 38].

En este trabajo se ha utilizado el enfoque pasivo, donde el objetivo final consiste en reconocer una plataforma de aterrizaje con figuras en blanco y negro [2], o con figuras de colores usando una cámara monocolor RGB, que en modo de operación normal se encuentra incorporada en el propio UAV. En este sentido, a continuación, se analiza el estado del arte con el fin de recopilar los métodos basados en el campo de la visión por computador, donde además se usan figuras (blanco y negro, o a color) sobre un fondo determinado en las plataformas:

- (a) Chen et al. [39] propusieron una plataforma de aterrizaje basada en una figura en blanco y negro, conteniendo un pentágono que actúa como un signo clave de aterrizaje colocado en el centro de un círculo blanco, figura 2-1. El algoritmo de reconocimiento utiliza la técnica denominada *Faster R-CNN (Fast Region-based Convolutional Neural Network)* en donde se incluyen agrupaciones y las capas convolucionales que proporcionan propiedades específicas de la imagen, y que se codifican en el correspondiente mapa de características con el fin de permitir su reconocimiento. La figura que hay que identificar, resulta fácil de reconocer con una complejidad computacional relativamente baja, por lo que proporciona un buen rendimiento en tiempo real. Sin embargo, a pesar de las buenas prestaciones de este tipo de redes, no se suministran mecanismos adicionales para llevar a cabo el reconocimiento en el caso de que falten partes en la figura a raíz de la saturación de intensidad como consecuencia de brillos excesivos causados por luz reflejada, algo muy habitual en días soleados con incidencia directa de los rayos solares. Polvara et al. [40] también aplicaron CNN para detectar un círculo negro que encierra una cruz negra sobre un fondo blanco. Este diseño entraña las mismas dificultades intrínsecas para su reconocimiento. Asimismo, en ambos casos, esta circunstancia constituye una limitación significativa desde el punto de vista de la identificación de la plataforma.



Figura 2-1 – Plataforma de aproximación de Chen et al. [39]

- (b) Wang et al. [41] plantearon una figura monocromática en forma de H [42] encerrada dentro de un círculo. Se aplican técnicas de binarización con el fin de segmentar la imagen, tras lo que se obtienen los puntos de interés (esquinas) de la figura estableciendo una relación geométrica entre ellos. Sin embargo, esta relación se ve afectada por la rotación de la imagen cuando ésta se obtiene bajo diferentes puntos de vista. Además, la proyección de perspectiva con la que se proyecta la imagen de la escena, y el ángulo de inclinación de la cámara con respecto a la plataforma, hacen que el diseño de esta figura sea altamente sensible a este tipo de distorsiones que se manifiestan en la imagen. Asimismo, el uso de una única figura no mitiga de manera efectiva los problemas que surgen en las partes no presentes en la imagen, debido, por ejemplo, a saturaciones de intensidad o a la captura parcial de la plataforma, por lo que se requiere de una vista completa de la plataforma para obtener todos los puntos de interés. En los vuelos a baja altura, además, presenta serias dificultades ya que muy comúnmente solo están disponibles vistas parciales o sesgadas de la figura. Sharp et al. [43] también se decantaron por usar cuadrados en blanco y negro utilizando descriptores de puntos de interés, tales como el operador de Harris [44] para la detección de esquinas, figura 2-2. No obstante, en este diseño aún persisten las dificultades y limitaciones descritas previamente en lo que respecta a la ausencia de partes relevantes de la imagen como consecuencia de los brillos y las distorsiones. Zhao y Pei [45] usaron una sola figura verde en forma de H aplicando el descriptor SURF (*Speed Up Robust Features*) [46, 47], que es invariante a pequeñas rotaciones y cambios de escala. Sin embargo, el problema relativo a la ausencia de determinadas partes de la figura todavía persiste.

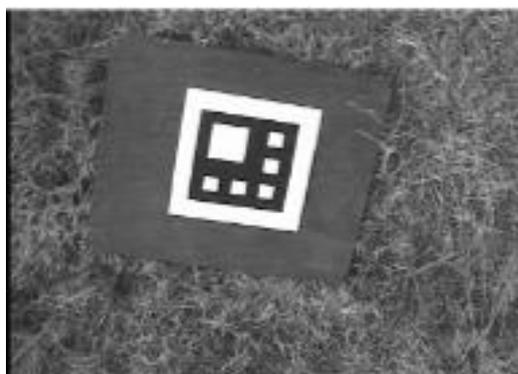


Figura 2-2 – Plataforma de aproximación de Sharp et al. [43]

- (c) Saripalli et al. [48, 49] usaron también una figura en forma de H impresa sobre la superficie de la plataforma de aterrizaje, figura 2-3. El método está basado en las siguientes técnicas de procesamiento de imágenes: filtrado, umbralización, segmentación y etiquetado de componentes conexas. El objetivo final consiste en determinar el ángulo de orientación de la figura con respecto al UAV mediante las mencionadas técnicas. Sin embargo, en este caso, vuelven aparecer las mismas limitaciones que en [41]. Si una parte o región falta, ya sea total o parcialmente, no es posible obtener una orientación completa en el rango $[0^\circ - 360^\circ)$.



Figura 2-3 – Plataforma de aproximación de Saripalli et al. [48]

- (d) Cocchioni et al. [50] diseñaron una figura basada en dos círculos concéntricos, uno grande y otro mucho menor, junto con dos pequeños triángulos equiláteros de diferentes tamaños, figura 2-4. Li et al. [51] crearon también una figura que usa el patrón de círculos concéntricos, usando específicamente para ello una figura que contiene seis círculos combinados entre sí. El algoritmo de reconocimiento extrae patrones de características basadas en los momentos afines invariantes [44] que se proporcionan a un clasificador del tipo SVM (*Support Vector Machines*) [52]. En su diseño, los autores consideraron las posibles distorsiones en el plano derivadas de la proyección en perspectiva. Sin embargo, estas mismas distorsiones hacen que los círculos se perciban como elipses, debido a los cambios que se producen en el valor de la excentricidad. Por tanto, es una figura geométrica inadecuada para gestionar diferentes ángulos de inclinación. Además, el diseño acromático no proporciona mecanismos adicionales para evitar, en la medida de lo posible, las posibles áreas saturadas debido a los brillos, que acaban derivando en la ausencia total o parcial, de partes relevantes de la figura en la imagen.

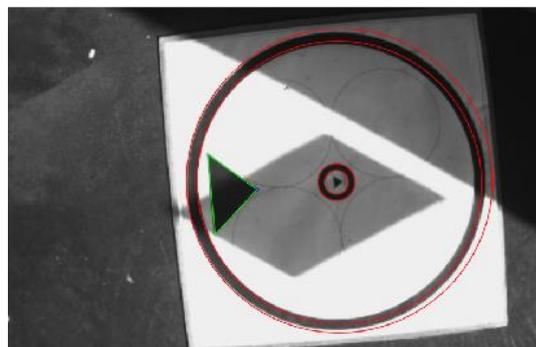


Figura 2-4 – Plataforma de aproximación de Cocchioni et al. [50]

- (e) Guili et al. [53] diseñaron una figura en forma de T que sirve para determinar el ángulo de orientación relativo entre la plataforma y el UAV. Esta técnica se basa en la radiación electromagnética infrarroja (IR) para adquirir una temperatura lo suficientemente alta, como para permitir un contraste térmico entre la figura y el entorno donde se ha colocado, figura 2-5. Se usan dos técnicas diferentes de procesamiento de imágenes, como son la extracción de bordes y la segmentación de regiones para su reconocimiento mediante la extracción de propiedades proporcionadas por los momentos invariantes de Hu [44], los cuales permiten su posterior reconocimiento en base a la similitud de dichas propiedades con patrones característicos. Sin embargo, el algoritmo no es capaz de compensar la simplicidad en el patrón de reconocimiento, lo que ocasiona problemas en los entornos de exterior. Por lo tanto, el método es susceptible de confundir el único elemento a reconocer con los elementos naturales. Además de la problemática señalada, existe también el inconveniente de que no se han proporcionado unos mecanismos para gestionar las posibles partes inexistentes en la imagen.

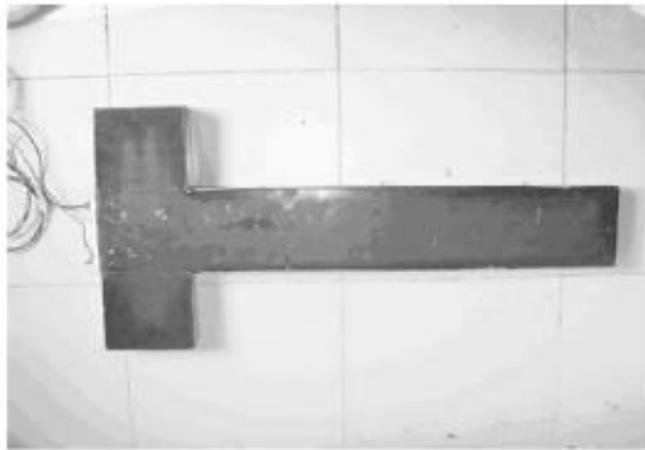


Figura 2-5 – Plataforma de aproximación de Guili et al. [53]

- (f) Lange et al. [54, 55] propusieron una figura similar a la utilizada en [48], basada en varios anillos concéntricos de color blanco, figura 2-6. Sin embargo, en este caso, en lugar de usar un pentágono para el reconocimiento, se emplea el uso de coronas circulares definidas por círculos cuyo ancho varía a medida que éstas se alejan del centro de la figura. La clave es, por lo tanto, lograr la diferenciación e identificación de cada anillo. Aunque el reconocimiento de esta plataforma es posible incluso cuando no todas las coronas circulares se encuentran dentro del campo de visión de la cámara, lo que puede ocurrir cuando se vuela a baja altura, el método asume que el UAV siempre está posicionado paralelo a la plataforma en posición cenital. Por lo tanto, ignora el ángulo de inclinación y no puede usarse para posicionar el UAV hasta que éste se coloque sobre la plataforma. Tampoco es posible su uso con los UAVs de ala fija, porque su aproximación no se realiza verticalmente. De este modo, existe una importante limitación práctica para este enfoque, incluso cuando el reconocimiento esté destinado a UAVs del tipo rotores con capacidad de vuelo vertical, pero que se encuentran a una distancia pequeña con respecto a la plataforma.

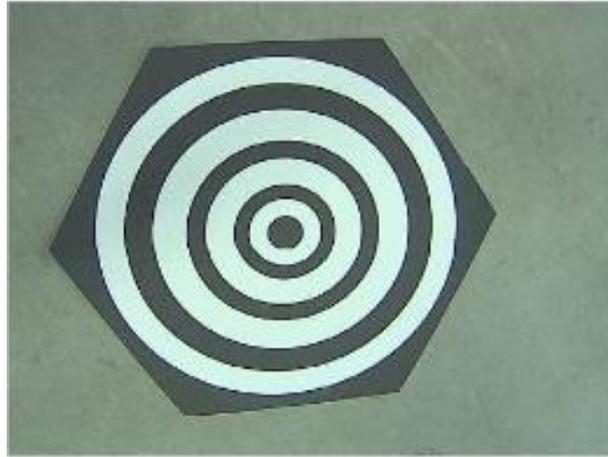


Figura 2-6 – Plataforma de aproximación de Lange et al. [54]

- (g) Las figuras AprilTag [56, 57], figura 2-7, se utilizaron en [34, 58, 59, 60] mediante el uso de cámaras con resoluciones bajas y detectores de bordes robustos del tipo Sobel [44] con el fin de hacer frente a las oclusiones, rotaciones y variaciones de iluminación. En [60] se realizaron algunas mejoras al respecto. Por otro lado, las figuras ArUco, que son similares a los AprilTags, se usaron en [61, 62]. Chaves et al. [63] utilizaron este tipo de figuras junto con el filtro de Kalman [44] para guiar al UAV durante la última fase del aterrizaje. Dicho planteamiento se diseñó para llevar a cabo el aterrizaje de UAVs en barcos. Sin embargo, es bien sabido que los bordes son estructuras sensibles al ruido, y que, por consiguiente, son propensas a los típicos bordes rotos, causando detecciones incorrectas. Araar et al. [64] usaron también el sistema basado en los AprilTags para generar figuras que se imprimen sobre la plataforma de aterrizaje. El objetivo radica en identificar las figuras mediante el desarrollo de un procedimiento basado en técnicas de visión por computador que incluye dos componentes principales, a saber: el detector de etiquetas y el sistema de codificación. El detector agrupa los píxeles en función de sus magnitudes y direcciones de gradiente, mientras que el sistema de codificación lee los bits de cada campo de la etiqueta para identificar las figuras. Sin embargo, estas figuras están basadas en cuadrados y, por lo tanto, son muy sensibles a las distorsiones en el plano causadas por perspectivas con ángulos de inclinación elevados.

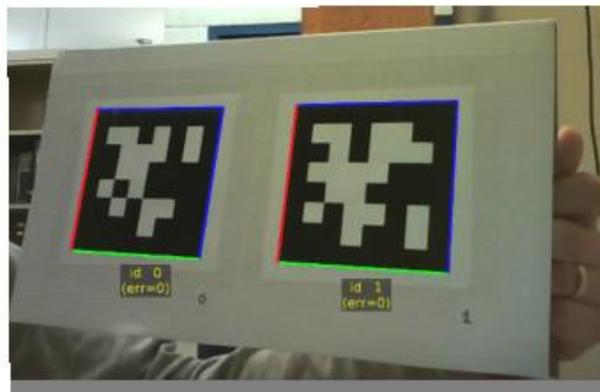


Figura 2-7 – Plataforma de aproximación de Chaves et al. [63]

- (h) Nguyen et al. [11] usaron tres círculos concéntricos que definen ocho áreas en blanco y negro cada una. La plataforma puede ser reconocida incluso si faltan áreas, figura 2-8. Sin embargo, la figura contiene un punto de partida o inicio para elaborar el patrón de reconocimiento, que debe ser identificado como paso previo a la obtención de las características, lo cual representa una desventaja muy seria, particularmente cuando la zona que contiene dicho punto presenta brillos intensos. La orientación del UAV respecto de la plataforma se define mediante un área negra asimétrica. Se usa una plantilla adaptable con la finalidad de establecer las correspondencias, que se basan en la correlación de imágenes con el objetivo de encontrar la plataforma. Este proceso está guiado por las figuras anteriores que se obtienen mediante la aplicación del filtro de Kalman [65]. Usando el reloj embebido, se identifican las horas diurnas y nocturnas. Mediante el empleo de la técnica de segmentación basada en umbral adaptativo se puede reconocer la figura en situaciones de luminosidad moderada. Una vez identificado el centro de la figura, los puntos de intersección se definen como transiciones de negro a blanco siguiendo el círculo situado en el centro geométrico del dibujo. Nuevamente, el diseño acromático resulta ser un punto débil en la estrategia general, sobre todo en condiciones de iluminación adversas. Además, el umbral de adaptación tiende a extraer bordes en contra de las regiones, y la definición de plantillas para el enfoque adaptativo, se convierte en un inconveniente importante a la hora de tratar de definir plantillas válidas para gestionar las diferentes alturas del vuelo.



Figura 2-8 – Plataforma de aproximación de Nguyen et al. [11]

En resumen, existen enfoques [39, 41, 42, 48, 53] que usan una sola figura que no resuelve el problema de las regiones ausentes en la imagen debido a las saturaciones de brillo por iluminación directa que causan los reflejos. Otros métodos [1, 34, 51, 54, 58, 59, 60, 61] usan varias figuras (entrelazadas o intercaladas) para abordar el problema de las zonas o regiones ausentes en la imagen, o figuras complejas basadas en el círculo [66] y la elipse. Algunos de ellos [1] permiten una cierta distorsión del plano como consecuencia de la proyección de perspectiva y del posicionamiento del UAV de forma oblicua con respecto a la plataforma. En otros, como en [54], suponen que el UAV se sitúa en una posición cenital con respecto a la plataforma durante la fase de aterrizaje, ignorando así el ángulo de inclinación. Los bordes y los puntos de interés también han sido considerados en otras propuestas, si bien es necesario tener en consideración, la alta sensibilidad al ruido que este tipo de estructuras conllevan [41, 43, 45, 53].

2.2.1 – Comparativa de métodos

La tabla 2-1 clasifica los métodos referenciados con anterioridad con relación a los siguientes criterios: ubicación de los dispositivos, categoría y subcategorías (I, II y III) que aúnan rasgos comunes. Para cada una de estas agrupaciones, se hace una breve descripción, y se enumeran también los principales inconvenientes identificados.

Dispositivos	Categoría	Sub-Categoría I	Sub-Categoría II	Sub-Categoría III	Descripción / Análisis	Comentarios / Inconvenientes
A bordo	Con Plataforma de Aterrizaje	Basado en un solo color / blanco y negro. Usa una cámara de luz visible	Múltiples figuras	Figuras obligatorias [1, 11]	<ul style="list-style-type: none"> Figuras específicas para el reconocimiento. Relaciones geométricas entre figuras. Figura única dividida en subfiguras. 	<ul style="list-style-type: none"> Figuras complejas (círculos / elipses) sensibles a la distorsión de la perspectiva de la imagen. Cuando faltan las figuras principales, no se puede detectar ningún punto de partida para la identificación.
				Diferencias de tamaño entre las figuras [43, 51, 54, 55, 67]	<ul style="list-style-type: none"> Cuadrados o círculos con diferentes tamaños o radios. Figura principal construida con subfiguras (cuadrados / círculos) Reconocimiento basado en los diferentes tamaños de cada subfigura. 	<ul style="list-style-type: none"> Las figuras geométricas en forma de cuadrados pueden confundirse con elementos naturales típicos de ambientes exteriores, como puede ser una paca, es decir un bloque de paja o forraje. La excentricidad depende en gran medida de la perspectiva. Los círculos se ven muy afectados por las distorsiones y se perciben como elipses.
				Figuras basadas en cuadrados [32, 34, 58, 59, 60, 61, 63, 64]	<ul style="list-style-type: none"> Marcas artificiales basados en cuadrados en blanco y negro (AprilTags, ArUco). Técnicas basadas en visión artificial para identificar partes negras / blancas dentro de un borde ancho negro y una matriz binaria interna. 	<ul style="list-style-type: none"> Las formas geométricas basadas en cuadrados tienen una gran sensibilidad a las distorsiones causadas por las perspectivas de la imagen. Aunque algunos métodos replican los códigos en diferentes tamaños, la distancia sigue siendo un problema.
		Figura principal / figura única sin subfiguras [31, 33, 38, 39, 40, 41, 42, 45, 48, 49, 53, 66, 68]	<ul style="list-style-type: none"> Reconocimiento basado en características específicas de regiones en el dibujo (en forma de T, en forma de H, en forma de X, o una sola figura geométrica como puede ser un círculo, cuadrado, etc.). Técnicas típicas de visión: binarización, umbralización, segmentación, SURF, que se usan para la extracción de características a base de descriptores. 	<ul style="list-style-type: none"> Una figura única requiere un punto de partida o un punto especial como referencia para las correlaciones. Ciertas regiones de interés no pueden permanecer ocultas o faltantes (lo habitual en entornos al aire libre). Las distancias entre la visión artificial y la figura deben considerarse para un encuadre correcto. 		
		Varios colores basados en cámara de luz visible	Múltiples Figuras	No hay restricción en cuanto a las figuras (Caso 2)	<ul style="list-style-type: none"> Reconocimiento con solo la mitad de las figuras que componen la plataforma. Relaciones entre subfiguras que permiten el reconocimiento de marcadores ilegibles. Método robusto para trabajar con ángulos elevados y condiciones adversas. 	<ul style="list-style-type: none"> Necesidad de usar colores heterogéneos para obtener la mayor diferenciación entre ellos. Las subfiguras con colores claros (Figura 4-1) podrían desaparecer debido a las reflexiones. Entrenamiento requerido para ajustar colores teóricos con respecto a los reales (Tabla 4-1)
	Cámara Termal	Figura principal / figura sin subfiguras	Figura basada en forma de letra [13, 14]	<ul style="list-style-type: none"> Reconocimiento basado en la radiación infrarroja (diferencias de temperatura) entre el objetivo (marca en forma de letra) y el fondo. 	<ul style="list-style-type: none"> Se requieren diferencias térmicas, obtenidas normalmente con calentamiento activo. Se requiere una cámara térmica, con el coste que ello conlleva. 	
	Sin Plataforma de Aterrizaje (No usa una plataforma específica)	Cámara de Luz Visible	Pista de aterrizaje	No es necesario calibrar la cámara [12]	<ul style="list-style-type: none"> La pista debe ser fotografiada durante el vuelo y binarizarse. Se aplican el detector de bordes Sobel y la transformada de Hough para identificar las líneas y los bordes que componen la pista. 	<ul style="list-style-type: none"> Se debe conocer previamente el ancho de la pista y las desviaciones laterales del UAV con respecto a la línea central de la pista. Por la noche, o con poca luz, se requiere una lámpara que actúe de guía de la aeronave.
			Cualquier lugar / Sin objetivo específico [24, 25]	Base de datos con lugares de aterrizaje [26, 69]	<ul style="list-style-type: none"> Las áreas de aterrizaje se definen como texturas suaves. Los descriptores de texturas permiten la identificación (por aprendizaje) de las áreas de aterrizaje en base a la similitud de los patrones de referencia. 	<ul style="list-style-type: none"> Se requieren áreas texturizadas apropiadas, con tamaños suficientes para el aterrizaje del vehículo aéreo. Se requiere una base de datos texturizada, que por consiguiente tuvo que ser sobre volada con anterioridad.
		Visión matricial en escala grises [27, 28, 29, 30]	La reconstrucción del terreno en 3D se lleva a cabo a partir de una cámara de visión matricial en escala de grises (mvBlueFOX).	<ul style="list-style-type: none"> Se requieren terrenos planos. Alto costo computacional. Se requieren errores de reconstrucción 3D que sean asumibles. 		
	Fijados al suelo	UAVs de ala fija / cuatri-rotor	Basado en unidad pan-tilt (PTU)	Visión Estéreo	Cámaras de infrarrojos [10, 17, 18]	<ul style="list-style-type: none"> La posición relativa entre el aterrizaje objetivo y el UAV se obtiene en base a la información provista por un sistema de visión de PTU en diferentes posiciones.
Cámaras de luz visible			Sistema Trinocular	Conexión FireWire [20]	<ul style="list-style-type: none"> Los puntos de referencia de color (rojo, amarillo, verde y azul) se utilizan para determinar la orientación y la posición. Se aplica el algoritmo CamShif para la detección y el seguimiento de los puntos de referencia de las tres imágenes. 	<ul style="list-style-type: none"> Se requiere una calibración previa con una alta precisión. El punto de referencia de color azul se puede confundir con el azul del cielo.
UAV de ala fija		Cámaras NIR	Basado en sistema de matriz	Lámpara Laser [16]	<ul style="list-style-type: none"> Un UAV de ala fija (velocidad de vuelo alto) está equipado con una lámpara láser de infrarrojo. Conjunto de cámaras que permite detectar la aproximación del láser infrarrojo. 	<ul style="list-style-type: none"> Se requieren dos cámaras NIR dispuestas en el suelo (con un proceso de configuración preciso y complejo) para lograr la precisión necesaria. Las cámaras se colocan a cada lado de la pista, lo que requiere una línea base amplia.
		Basado en unidad pan-tilt (PTU)	Visión estéreo	Cameras de luz visible [19, 21]	<ul style="list-style-type: none"> Se colocan dos PTU separadas con dos cámaras a ambos lados de la pista para evitar limitaciones entorno a la línea base. Se usa AdaBoost en [21] para llevar a cabo el seguimiento y la determinación 3D por triangulación. La localización tridimensional se aplica en [18] para la detección de objetivos. 	<ul style="list-style-type: none"> Diseñado para UAVs de ala fija que requiere tanto de una configuración específica, como de una calibración del hardware. Alta complejidad computacional para la localización 3D. Se requiere un entrenamiento exhaustivo para afinar el sistema AdaBoost.

Tabla 2-1 – Resumen comparativo de los métodos previos y los propuestos

2.3 – Patentes

En el ámbito del proyecto que se propone para el reconocimiento de plataformas de aterrizaje de UAVs, merecen especial mención una serie de plataformas patentadas, además de la reseñada en [2], que se describen a continuación:

- (1) CN101109640 [70]: presentada en julio del año 2006, se basa en el uso de una cámara que sirve para extraer características de la pista de aterrizaje. A partir de dicha información, y mediante el uso de una búsqueda iterativa a través de la imagen, se lleva a cabo la maniobra de aterrizaje. La patente tiene dos partes: a) un software que proporciona un análisis de visión por computador, la fusión de la información proporcionada por el sistema de visión, y una estimación de los parámetros aerodinámicos del estado del vuelo de la aeronave (altura, orientación, velocidad, aceleración); y b) una disposición hardware en la que se comprende: la característica de la pista, el subsistema de sensores a bordo y un subsistema de fusión de información para recopilar los datos de medición de los sensores. Considera dos formas geométricas en la pista de aterrizaje, un triángulo y un rombo, situados de forma longitudinal a lo largo de la pista. Usa la información extraída del análisis de la figura mediante el sistema de visión, en conjunción con la información proporcionada por otros sensores (*GPS diferencial* e *IMU*), con el fin de obtener mayor precisión en la posición relativa de la aeronave con respecto a la pista de aterrizaje. Las figuras se encuentran separadas, y no están pensadas para operar con vehículos de despegue y aterrizaje vertical.
- (2) US20080215204 [71]: presentada en diciembre del año 2007, provee métodos, aparatos y sistemas de visión sintética mejorada y de fusión de datos de sensores múltiples, que sirven para tratar de mejorar la capacidad operativa de los UAVs. Básicamente, lo que se plantea es un sistema de comunicación para permitir el intercambio de información entre el UAV y un centro de control. El intercambio de la información se fundamenta de manera esencial en el uso de un sistema de visión por computador que se encarga de captar y analizar la escena del entorno sobre el que se lleva a cabo la misión.
- (3) US20090306840 [72]: presentada en abril del año 2009, propone un sistema automático de visión por computador. Se toma como eje central del método, una figura en forma de cruz que contiene un rectángulo en su eje mayor. A partir de la imagen captada por el vehículo en pleno vuelo, se determinan los ángulos de orientación, o guiñada, y la elevación del UAV con respecto al eje central de la figura. Por consiguiente, el flujo lógico del proceso es el siguiente:
 1. Se captura una imagen en la dirección de movimiento del UAV.
 2. Se analiza la imagen para determinar si es un posible objetivo.
 3. Se evalúa el objetivo para determinar el ángulo de planeo y elevación.
 4. Se corrige la altura, posición y orientación del UAV.

- (4) [US20070093945](#) [73]: presentada en octubre del año 2006, proporciona un sistema de procesamiento para UAVs, que combina la metodología de visión por computador con un método de compensación de movimiento. Por tal motivo, el sistema utiliza dos tipos de sensores contrapuestos. Por un lado, emplea como mínimo un sensor de visión que sirve para captar la información visual del entorno, y por otro, un sensor de movimiento que se encarga de registrar los principales datos cinemáticos del UAV. Internamente, el sistema combina las entradas de ambos sensores con el fin de aumentar las capacidades de estimación basadas en la visión por computador, tanto en el ámbito de la navegación, como en el de la estabilización. Dicha patente, proporciona un sistema que es capaz de explorar los entornos desconocidos hasta la fecha, lo que le confiere la habilidad de poder operar en ambientes desordenados o con gran variedad de obstáculos. A modo de resumen, cabe señalar, que la patente describe una estructura organizativa de elementos, que confieren a un UAV dotado de un sistema de visión, la habilidad de navegar basándose, al menos en parte, en datos de imágenes corregidas con información proporcionada por otros sensores tradicionales, haciéndolo apto para adaptarse a entornos dinámicos.
- (5) [KR1020070058957](#) [74]: patente coreana cuya fecha de publicación data de junio del año 2008, y que sirve para proporcionar un método de navegación automático para un UAV a partir de un símbolo dado, situado en una zona que contiene una malla o red de aterrizaje. Dicho sistema reconoce la imagen, mide la distancia mediante un puntero láser, y posteriormente transmite la información a un puesto de control externo. El sistema pasa por las siguientes etapas que se describen a continuación de forma esquemática:
1. Fotografía en tiempo real mediante el uso de una cámara frontal que está incorporada en el UAV; el símbolo a reconocer se encuentra ubicado en una malla de aterrizaje.
 2. Tras la adquisición de la imagen se lleva a cabo un proceso de análisis de la misma mediante un procesador gráfico específicamente dedicado.
 3. Mediante el uso de un puntero láser, se efectúa una medición en tiempo real de la distancia que existe entre el símbolo de aterrizaje y el UAV.
 4. Se transmite en tiempo real toda la información relativa al símbolo y a la distancia existente entre éste y el UAV, así como los comandos de control necesarios para llevar a cabo el aterrizaje.
- (6) [US5525883A](#) [75]: esta patente presentada en julio del año 1994 describe un método que permite determinar la orientación y la posición de un vehículo autónomo mediante el uso de puntos de referencia. Dichos puntos de referencia son similares a las celdas de un tablero de ajedrez que contienen unas figuras rectangulares de colores bien contrastados (blanco y negro), y que están dispuestas de tal forma que permiten crear un patrón pseudoaleatorio. El UAV incorpora un sistema de reconocimiento basado en una cámara y un procesador a bordo, que, mediante el uso de técnicas de visión por computador, como la binarización en conjunción con DTL (*Direct Linear Transformation*), y un mapa simbólico almacenado en la unidad de reconocimiento y medición, sirven para describir la

posición, la orientación y las dimensiones de cada patrón pseudoaleatorio del tablero. La unidad de reconocimiento y medición procesa la imagen del tablero ubicado en el suelo, para identificar el punto de referencia en el que se muestra el patrón, y así tratar de calcular la posición y la orientación del vehículo.

Capítulo 3 - Método 1: Sistema experto

3.1 – Introducción

A lo largo del presente capítulo se describe el primero de los dos métodos desarrollados en la investigación. El núcleo principal se fundamenta en el diseño de un sistema experto, [1], para el reconocimiento de una plataforma de aterrizaje mediante un sistema de visión a bordo de un UAV, y sobre el que se han implementado técnicas específicas de procesamiento de imágenes y visión por computador, cuya base consiste en la proyección de los procesos específicos del razonamiento humano sobre el sistema de reconocimiento.

La plataforma posee una figura característica en negro sobre un fondo blanco, que fue patentada en el año 2012 [2], y que ha sido utilizada en el proyecto SALACOM. En la figura 3-1 (a) y (b) se muestran dos secuencias de vuelo de un UAV, en este caso un cuatri-rotor, durante diferentes pruebas realizadas al amparo del proyecto SALACOM [3], que ha dado origen al presente trabajo. El UAV está equipado con un *Smartphone* Samsung Galaxy S6, que permite la captura de imágenes mediante su cámara integrada, con una resolución máxima de 3456×4608 píxeles, y bajo el sistema operativo Android.

En lo que se refiere al mencionado proyecto SALACOM se desarrollaron sendos sistemas autónomos cooperativos y colaborativos. El UAV tiene la misión de explorar el entorno de operación con el objetivo de detectar posibles zonas de vertidos contaminantes sobre la superficie del agua mediante la captura de imágenes aéreas, para proporcionar dicha información al barco autónomo que ha de dirigirse a la zona del vertido con fines de contención y operación sobre él, y así tratar de evitar, y en todo caso minimizar, el posible impacto medioambiental. Todo ello bajo el diseño y planteamiento de un sistema cooperativo entre vehículos autónomos.



(a)



(b)

Figura 3-1 – Dos secuencias de vuelo de un cuatri-rotor equipado con un *smartphone*

Como bien es sabido, la autonomía de cualquier UAV es limitada, y, en cualquier caso, aun estando todavía operativo, al finalizar la misión tanto en el ámbito del proyecto SALACOM como en cualquier tipo de operación, el UAV debe posarse sobre un sitio

seguro, en este caso, encima de la plataforma que se muestra en la figura 3-2. En (a) vista desde arriba, y en (b) con el UAV ya posado sobre ella. Mediante el sistema de visión a bordo del propio UAV, se ha diseñado un procedimiento de identificación para su reconocimiento basado en el procesamiento de imágenes, con el fin de llevar a cabo su identificación mediante la aplicación de técnicas específicas en el campo de la visión por computador.



(a)

(b)

Figura 3-2 – Plataforma patentada para aterrizaje de UAVs

En el ámbito del proyecto SALACOM el aterrizaje ha de realizarse sobre el barco autónomo, que lleva la plataforma a bordo para el posado mediante su reconocimiento a través del sistema de visión, figura 3-3. Obviamente, en este caso, se trata de una situación crítica el hecho de que el aterrizaje se produzca de forma segura y precisa sobre ella, ya que, de lo contrario, el UAV caería sobre el agua con su consiguiente deterioro y posible pérdida definitiva. En cualquier caso, el aterrizaje debe realizarse siempre de una forma segura, para evitar que éste se produzca en zonas críticas que pongan en peligro al propio UAV, y a veces incluso, la propia misión.



Figura 3-3 – Plataforma de aterrizaje de UAVs a bordo de un barco autónomo

3.2 – Contribuciones

Gran parte de los métodos introducidos en el capítulo anterior, aplican la umbralización y el etiquetado de regiones con fines de segmentar las imágenes para la identificación de la zona de interés. Son, por consiguiente, dos técnicas ampliamente usadas en el reconocimiento de imágenes mediante el uso de técnicas de visión por computador.

La principal contribución del método que se explica en el presente capítulo consiste en explotar el rendimiento de las técnicas de tratamiento de imágenes con unos rendimientos aceptables, a la vez que se propone un enfoque novedoso cuyo objetivo radica en el aumento de la eficiencia y fiabilidad por la integración y secuenciación de los procesos propuestos.

Esto permite la identificación de la figura base de la plataforma, compuesta de formas geométricas basadas en círculos y elipses, y ubicadas estratégicamente. La idea subyacente en el proceso estriba en la aplicación de una metodología de razonamiento humano, que se lleva al ámbito computacional, en lo que en definitiva viene a ser un *Sistema Experto*.

La base del mencionado razonamiento se fundamenta en los siguientes supuestos y premisas:

- (a) La plataforma consta de una base conteniendo la figura global, pues bien, la propia base define un elemento diferencial, objeto de la primera fase de reconocimiento, que continúa con la identificación de las figuras y sus relaciones geométricas que permiten definir dicha figura global.
- (b) Binarización, segmentación y etiquetado de regiones conexas que posibilitan la extracción de propiedades métricas y topológicas de cada una de las regiones en que se descompone la imagen obtenida por la cámara del móvil que incorpora el UAV. Se correspondería con la parte del razonamiento humano, que es capaz de discernir la existencia de distintas figuras con diferentes formas geométricas.
- (c) Uso de descriptores métricos y topológicos (número de Euler), como proceso de selección previo, para proceder a un descarte de regiones, que por su tamaño o topología (huecos), se sabe que no pueden formar parte de la plataforma. De este modo se reducen las regiones candidatas a estudiar, aumentando la eficiencia. En este caso, el proceso de razonamiento humano está en la diferenciación específica de cada región.
- (d) Uso de diversos descriptores geométricos combinados, a saber: área, orientación, excentricidad y distancia euclidiana entre centroides, extraídos en el proceso de segmentación, para obtener grupos de regiones que tengan valores análogos. Se trata, por ejemplo, de buscar un grupo de tres regiones para identificar las elipses E1, E2 y E3 que aparecen en la figura 3-4, teniendo en cuenta los umbrales y valores calculados en la leyenda de dicha figura, con los reales, es decir, los que se obtienen para cada imagen. La parte correspondiente al razonamiento humano estriba en la relación combinada de los elementos.

- (e) Uso de varios umbrales métricos basados en las relaciones geométricas entre las subfiguras usando una perspectiva cenital, que sirven para el reconocimiento de la plataforma, y que están recogidos en la figura 3-4. El objetivo de los umbrales es dar flexibilidad para que el reconocimiento sea efectivo bajo el mayor número de perspectivas posibles, puesto que los valores esperados (teóricos) se obtuvieron bajo la perspectiva cenital de la figura 3-4. El razonamiento humano en este caso sería establecer un grado de similitud entre lo que se ve y el patrón ideal.
- (f) Cálculo del grado de reconocimiento de la plataforma en el rango numérico $[0, 1]$, mediante el uso de los umbrales geométricos que se emplean en los Análisis Parciales Comparativos (APC). Dichos análisis, recogidos en la tabla 3-1, no son más que inequaciones que permiten analizar las relaciones geométricas entre las figuras para obtener así la puntuación del grado de similitud entre ellas. Se trata de la decisión final del razonamiento.

Al combinar el uso de los umbrales, junto con los valores esperados (figura 3-4), y los reales, este sistema experto supera algunos problemas existentes en otros métodos propuestos, destacando de forma específica lo siguiente: la secuenciación de métodos de procesamiento permite la identificación de la morfología de la figura propuesta para su reconocimiento en un entorno de exteriores.

Además, también resulta factible determinar la inclinación y la orientación del UAV respecto de la plataforma, siendo posible la identificación de dicha plataforma, incluso cuando parte de la figura se visualice de forma incompleta, bien por la captura, o debido a los reflejos que anulan ciertas partes de la misma.

Sin embargo, para que esto último suceda, las tres elipses principales, a saber, E1, E2 y E3, que se muestran en la figura 3-4, deben ser reconocidas correctamente. En caso contrario, el reconocimiento de la plataforma no se puede llevar a cabo, porque ocho de los diez APC, usan de forma explícita las propiedades métricas de las elipses E1, E2 y E3, tal y como puede observarse en la columna *región* de la tabla 3-1.

3.3 – Descripción geométrica de la plataforma

Antes de continuar con la descripción del método propuesto, es el momento de realizar un breve análisis preliminar de la figura, que servirá además como punto de referencia para etiquetar cada una de las subfiguras, referidas asimismo con el término de marcadores, que forman parte de la figura global que se encuentra serigrafiada sobre la plataforma de aproximación.

Este proceso de etiquetado es muy importante, ya que la nomenclatura que se muestra en la figura 3-4, es la que se emplea cuando se alude de forma específica a cada uno de los cuatro círculos (C1, C2, C3 y C4) y las tres elipses (E1, E2 y E3) que forman parte de la figura.

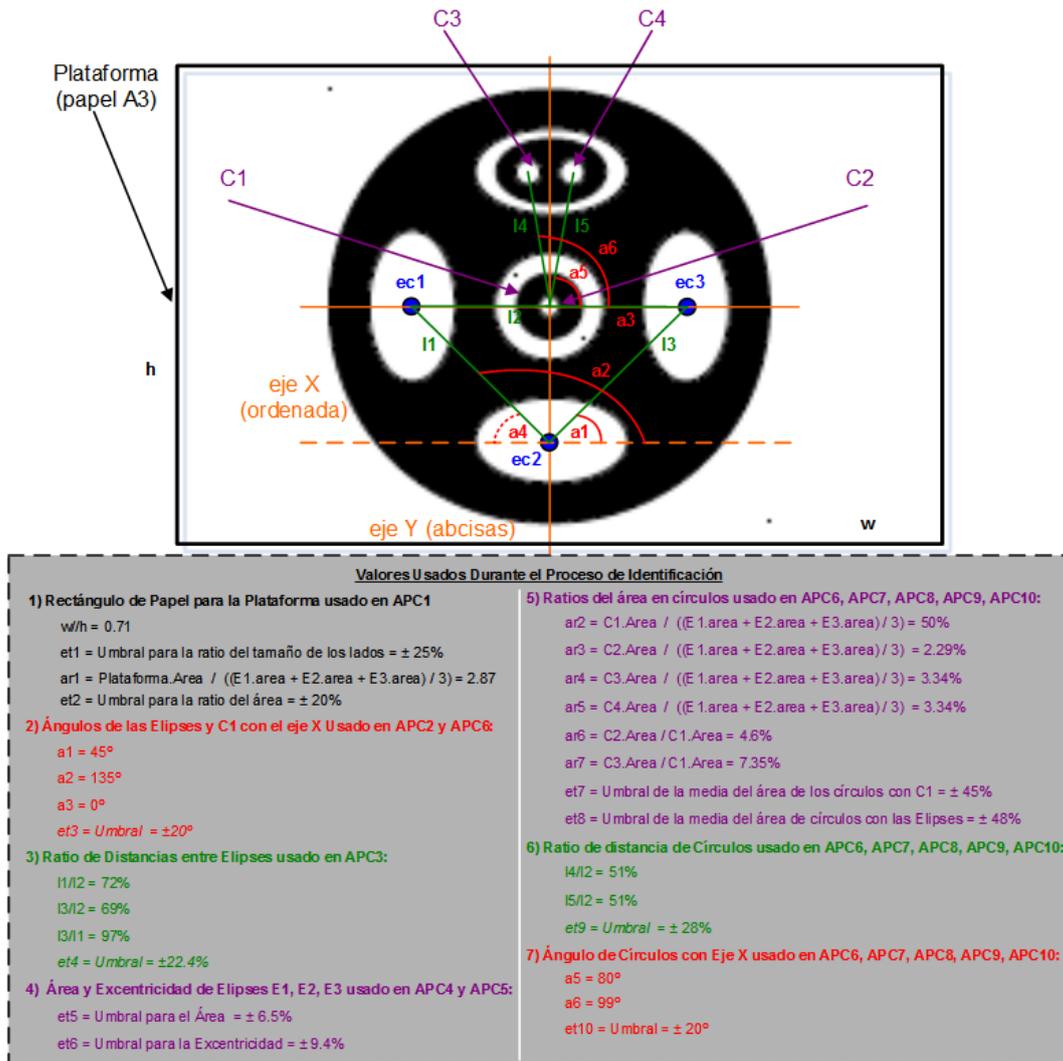


Figura 3-4 – Características geométricas y umbrales de detección

Considerando la figura 3-4, se establecen las siguientes premisas que se indican a continuación:

- (1) La asimetría de la figura constituye un elemento diferenciador relevante, ya que sirve de base para calcular la orientación de la plataforma con respecto al UAV, gracias a que las distancias entre las elipses E1-E2 y E2-E3, son distintas.
- (2) Además, debido a la asimetría, el triángulo que forman los centros de las elipses mediante los segmentos l1, l2 y l3 no constituyen un triángulo equilátero. De hecho, el valor de los ángulos a1 y a3 no es el mismo, aunque a simple vista no se aprecie tal diferencia. También sucede lo mismo con la distancia entre los centros c1 y c3.
- (3) En la leyenda de la figura, se muestran los valores significativos que constituyen los parámetros para el análisis de la misma, tras la segmentación y etiquetado de las diversas regiones a partir de la imagen. En este sentido, cabe reseñar, que todos los valores indicados en la leyenda coinciden con los valores asignados a los umbrales que se parametrizan en la sección de configuración del sistema. Tales

valores son la base con la que se establecen las similitudes mediante la aplicación de los correspondientes análisis parciales comparativos (APCs).

- (4) Los distintos colores del texto representan y clasifican los tipos de criterios utilizados para llevar a cabo el análisis de la figura con el fin de poder determinar geoméricamente, si dicha figura se corresponde con el dibujo serigrafiado sobre la superficie de la plataforma.

3.4 – Estrategia propuesta

La figura 3-5 muestra el diagrama de bloques de alto nivel, que define el diseño de la estrategia propuesta. En él se expone tanto la secuencia de pasos a seguir, así como la identificación de los procesos en el tratamiento de imágenes.

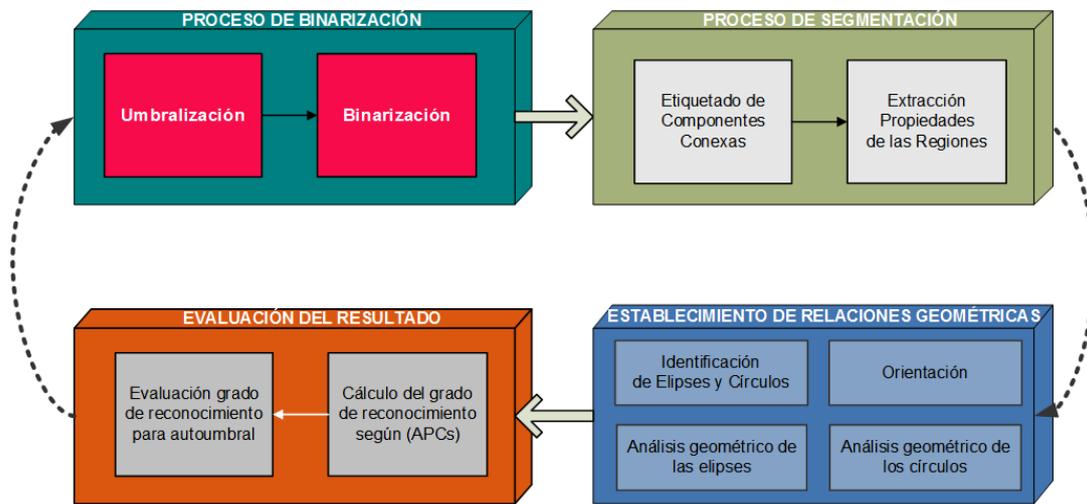


Figura 3-5 – Diagrama de bloques de la solución con granularidad gruesa

A partir del diagrama, se puede observar como la imagen original es binarizada con el fin de obtener una imagen en blanco y negro que sirva de base para su posterior segmentación. Acabado el proceso de segmentación, basado en el análisis de todos los píxeles junto con los de sus vecinos [44], se obtienen todas las regiones y las propiedades métricas asociadas a cada una de ellas, a saber: excentricidad, centros, área (en píxeles) y orientación. A partir de dichas propiedades, se obtienen por geometría todas las distancias entre los centros, así como los ángulos que forman las rectas imaginarias que unen los centros de las regiones. Usando toda esta información, junto con los valores y umbrales definidos en la figura 3-4 que relacionan las diferentes subregiones, se identifican tanto las elipses E1, E2 y E3, como los círculos C1, C2, C3 y C4. Una vez identificadas dichas subregiones, se llevan a cabo los diez análisis parciales comparativos (APC) definidos en la tabla 3-1 con la finalidad de obtener el grado de reconocimiento que cuantifica de una forma numérica la probabilidad de que la imagen que se acaba de procesar contenga la figura impresa en la plataforma de aterrizaje.

3.4.1 – Diagrama de Flujo y Arquitectura

La figura 3-6 muestra el diagrama de flujo detallado, que conforma en su conjunto la arquitectura para este método:

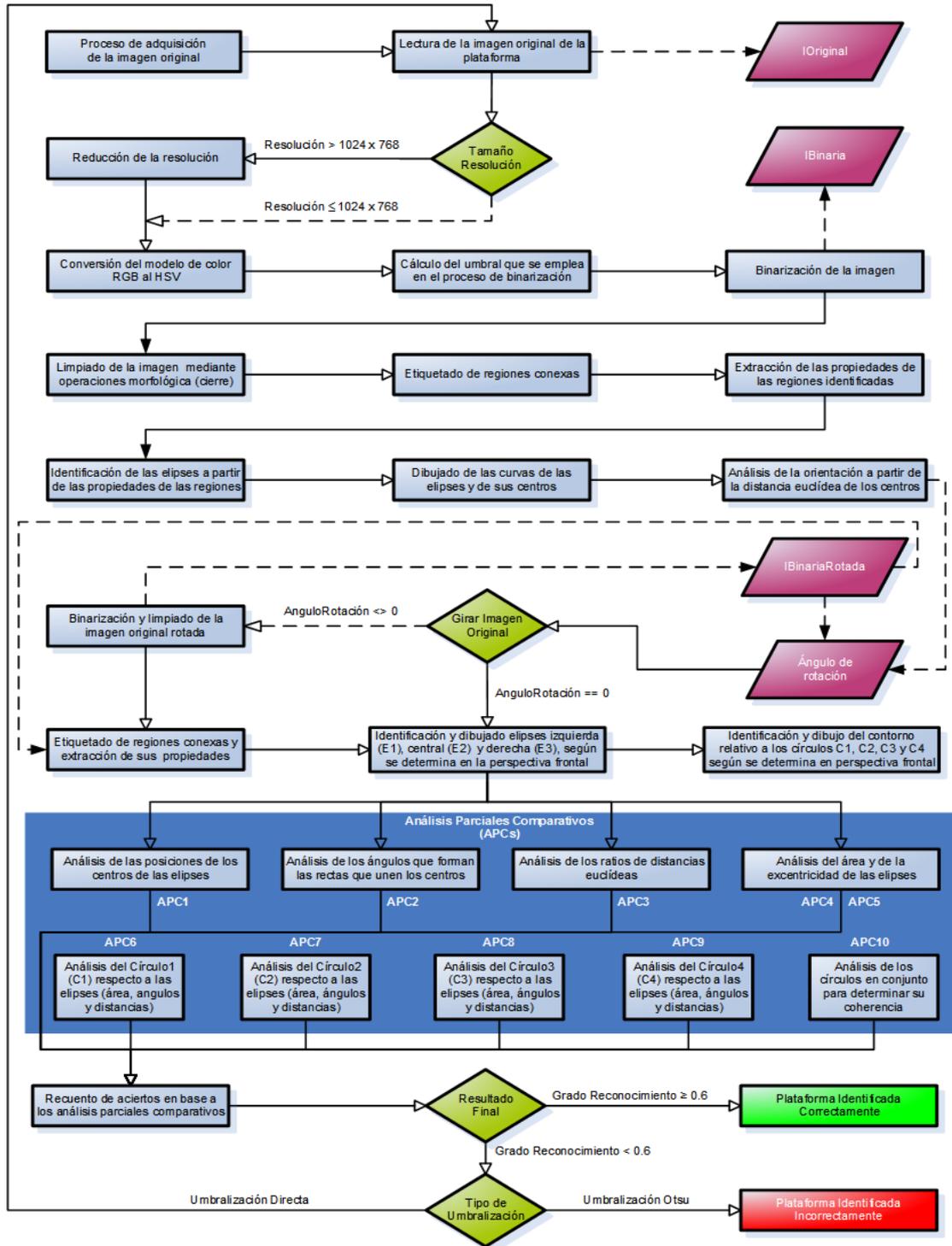


Figura 3-6 – Diagrama de flujo con la solución propuesta de granularidad fina

El diagrama de flujo de la figura 3-6 define de forma esquemática y secuencial cada una de las etapas, acciones y procesos que conforman el Sistema Experto propuesto en este método 1. Por lo tanto, define todos los procesos desde que se recibe la imagen tomada por el *móvil* a bordo del UAV, hasta que se proporciona un valor numérico en el rango [0, 1], que indica el grado de reconocimiento de que la plataforma esté contenida en la imagen de entrada.

Finalmente, en la figura 3-7, se muestra la arquitectura correspondiente a este método basado en sistema experto [1]. Este diagrama, a diferencia del anterior, muestra los procesos agrupados en las cuatro grandes líneas de actuación que se han llevado a cabo en el diseño e implementación del Sistema Experto, y que se describen en los cuatro apartados siguientes. El nivel de detalle es, por lo tanto, considerablemente menor al del diagrama 3-6, por lo que se proporciona un mayor nivel de abstracción:

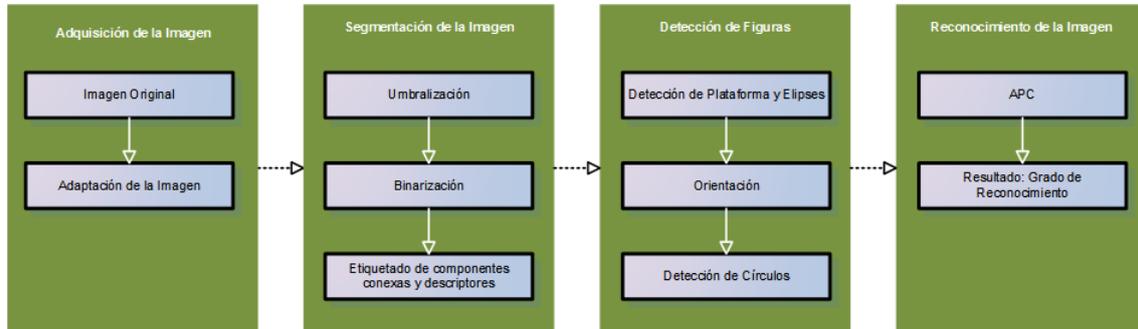


Figura 3-7 – Arquitectura del método 1 basado en sistema experto [1]

A continuación, se describen con detalle los procesos inmersos en cada uno de los cuatros grandes bloques que aparecen en la figura 3-7.

3.4.2 – Adquisición de imágenes

1. El diseño está previsto de forma que una vez el UAV se encuentre a punto de finalizar la misión y, por ende, se esté aproximando a la estación base gracias a la información proporcionada por su GPS interno, se capte una imagen aérea de la plataforma de aproximación ubicada en el suelo. Está previsto, por tanto, que la imagen se capture en pleno vuelo desde la cámara digital que lleva incorporado el UAV.
2. La resolución con que se toman las imágenes es de 2592×1944 píxeles. Sin embargo, la resolución necesaria para efectuar un reconocimiento con éxito es proporcional a la distancia entre la cámara y la plataforma (condición constante de zum). Por tanto, se reduce la resolución mediante un proceso de escalado hasta los 1024×768 píxeles. En el caso de que el reconocimiento sea fallido con esta nueva resolución se volverá a la original. Si el reconocimiento sigue sin volver a efectuarse de forma exitosa (grado de reconocimiento superior o igual a 0.6), entonces se toma una imagen nueva con la cámara del UAV.

3.4.3 – Segmentación de la imagen

3. La imagen se obtiene en el espacio de color RGB, convirtiéndose de inmediato al formato HSV [44]. Acto seguido, se procede a su binarización [76, 77] mediante umbralización directa o dinámica basada en el método Otsu [78]. De forma análoga a como se hace con la resolución, inicialmente se realiza el proceso de reconocimiento usando la umbralización directa. En caso de que el reconocimiento sea fallido (por no haber alcanzado el mínimo grado de reconocimiento), entonces el sistema cambia automáticamente al tipo de umbralización dinámica basada en el método de Otsu, que proporciona un nuevo valor de umbral para proceder a su reconocimiento.

En caso fallido, se toma una nueva imagen, y comienza nuevamente el proceso de reconocimiento. Acerca del proceso de umbralización, a continuación, se explica en qué consisten los dos tipos empleados en esta tesis:

- a. *Umbralización directa*: usa el mismo valor para todas las imágenes, que ha sido de 0.8, y se obtuvo durante la fase experimental mediante ensayo y error.
 - b. *Umbralización dinámica*: el valor se adapta al tipo de imagen a procesar. El algoritmo usado se basa exclusivamente en el método de Otsu [78].
4. Con la finalidad de eliminar pequeñas regiones (espurias), se realiza un proceso de cierre morfológico (dilatación seguida de erosión) sobre la imagen binaria, que se explica en [79].
 5. Segmentación de la imagen a partir de un proceso de etiquetado de regiones conexas [80], basado en [81], que permite obtener la información en forma de propiedades, para cada una de las regiones extraídas en la imagen. Este proceso de segmentación constituye una parte importante del proceso, explicándose en [82].

3.4.4 – Detección de subfiguras

6. Como se ha indicado previamente, la figura se compone de una serie de subfiguras en blanco y negro. Para la identificación de éstas, se utilizan las siguientes propiedades obtenidas en el paso anterior, que permiten su descripción como regiones: centroides, área (número de píxeles), número de Euler, excentricidad y orientación. Tanto su simbología, como los valores geométricos, se muestran en la figura 3-4.

Una vez segmentada la imagen en regiones, se buscan regiones candidatas, supuestamente integrantes de la plataforma. Dichas regiones deben satisfacer las ecuaciones (3.1) a (3.3) para ser consideradas como candidatas a formar parte de la plataforma:

$$R_{el} \in \{-1,0,1\} \quad (3.1)$$

$$\frac{R_{ma}}{R_{mi}} \geq A * \left(1 - \frac{et1}{100}\right) \quad (3.2)$$

$$\frac{R_{ma}}{R_{mi}} \leq A * \left(1 + \frac{et1}{100}\right) \quad (3.3)$$

donde R_{el} es el número de Euler, R_{ma} y R_{mi} son la longitud del eje mayor y menor de la región respectivamente.

A continuación, se realiza un proceso de selección sobre las regiones obtenidas en el paso cinco, con el fin de obtener regiones consideradas como *elipses candidatas*. La ecuación (3.1) debe cumplirse nuevamente, y se ha de tener en cuenta que los valores dependen del tamaño de la base de la plataforma (papel A3 en nuestro caso), del tipo de cámara empleado y de la configuración del sistema de visión, incluyendo su disposición geométrica, así como los parámetros intrínsecos y extrínsecos. En nuestro caso, a partir de los análisis experimentales efectuados, se han determinado de forma empírica, los siguientes valores, restringidos a los dos rangos de valores

especificados: $R_a \in [165, 80000]$; $R_e \in [0.55, 0.95]$, donde R_a representa el área y R_e representa la excentricidad, esto es, razón entre las longitudes del eje menor y mayor.

El siguiente objetivo consiste en formar grupos de elipses de acuerdo con su disposición en la plataforma. Las elipses candidatas son combinadas de manera matemática considerando grupos de tres elementos, de tal modo, que el número total de combinaciones viene dado por la siguiente expresión: $C(n, r) = \binom{n}{r}$, donde n es el número de regiones y r es el número de elipses agrupadas, y que por tanto deben ser posteriormente identificadas.

Para cada combinación, se lleva a cabo un segundo proceso de eliminación de elipses no candidatas usando el área y la excentricidad. No obstante, en este caso, el objetivo consiste en seleccionar grupos de tres regiones que tienen gran similitud respecto a los valores teóricos de área y excentricidad de la figura 3-4. Para ello, se comparan las propiedades de las regiones relativas al área y la excentricidad usando los umbrales que se indican a continuación, y que también aparecen en la figura 3-4, obteniéndose de forma empírica durante la fase experimental:

Área: cada combinación, que representa un grupo de tres regiones, debe cumplir las restricciones especificadas en la ecuación (3.4):

$$\begin{aligned}
 R1_a &\geq R3_a * \left(1 - \frac{ast}{100}\right); & R1_a &\leq R3_a * \left(1 + \frac{ast}{100}\right); \\
 R1_a &\geq R2_a * \left(1 - \frac{ast}{100}\right); & R1_a &\leq R2_a * \left(1 + \frac{ast}{100}\right); \\
 R2_a &\geq R3_a * \left(1 - \frac{ast}{100}\right); & R2_a &\leq R3_a * \left(1 + \frac{ast}{100}\right); \\
 R2_a &\geq R1_a * \left(1 - \frac{ast}{100}\right); & R2_a &\leq R1_a * \left(1 + \frac{ast}{100}\right); \\
 R3_a &\geq R2_a * \left(1 - \frac{ast}{100}\right); & R3_a &\leq R2_a * \left(1 + \frac{ast}{100}\right); \\
 R3_a &\geq R1_a * \left(1 - \frac{ast}{100}\right); & R3_a &\leq R1_a * \left(1 + \frac{ast}{100}\right);
 \end{aligned} \tag{3.4}$$

donde $R1_a$, $R2_a$ y $R3_a$ son las áreas de cada región del grupo de tres.

Excentricidad: cada combinación, que representa un grupo de tres regiones, debe cumplir las restricciones definidas en la ecuación (3.5):

$$\begin{aligned}
 R1_e &\geq R3_e * \left(1 - \frac{est}{100}\right); & R1_e &\leq R3_e * \left(1 + \frac{est}{100}\right); \\
 R1_e &\geq R2_e * \left(1 - \frac{est}{100}\right); & R1_e &\leq R2_e * \left(1 + \frac{est}{100}\right); \\
 R2_e &\geq R3_e * \left(1 - \frac{est}{100}\right); & R2_e &\leq R3_e * \left(1 + \frac{est}{100}\right);
 \end{aligned} \tag{3.5}$$

$$\begin{aligned}
 R2_e &\geq R1_e * \left(1 - \frac{est}{100}\right); & R2_e &\leq R1_e * \left(1 + \frac{est}{100}\right); \\
 R3_e &\geq R2_e * \left(1 - \frac{est}{100}\right); & R3_e &\leq R2_e * \left(1 + \frac{est}{100}\right); \\
 R3_e &\geq R1_e * \left(1 - \frac{est}{100}\right); & R3_e &\leq R1_e * \left(1 + \frac{est}{100}\right);
 \end{aligned}$$

donde $R1_e$, $R2_e$ y $R3_e$ son las excentricidades de cada región, también del grupo de tres.

Si todos los grupos de tres regiones se rechazan por incumplimiento de las restricciones anteriores, se realiza un incremento automático del umbral. Es decir, los valores relativos a los umbrales ast y est se incrementan dinámicamente de uno en uno para dar más flexibilidad y así aumentar las posibilidades de encontrar un grupo que cumpla las condiciones anteriores. Los valores iniciales de ast y est son 7 y 35 respectivamente, definidos en la figura 3-4. El valor máximo es 70, aunque en el momento en que un grupo cumpla las condiciones se detiene el incremento. Tanto los valores iniciales, como el máximo, fueron determinados empíricamente.

Para aquellos grupos de tres regiones que no hayan sido descartados, ya sea porque inicialmente cumplen las condiciones con los umbrales ast y est a 7 y 35, o porque el incremento automático de los umbrales ha permitido la obtención de un grupo que cumpla las ecuaciones 3.4 y 3.5, se llevan a cabo las siguientes acciones:

- (a) A partir del *centroide* de cada región, se obtiene la distancia euclídea existente entre los centroides de todas las regiones que forman el grupo, es decir, se calculan $l1$, $l2$ y $l3$. Posteriormente, se calculan las razones $l1/l2$, $l3/l2$ y $l3/l1$ y se restan con los valores estimados en el punto 3 de la leyenda de la figura 3-4, es decir, $|l1/l2 - 72\%|$, $|l3/l2 - 69\%|$ y $|l3/l1 - 97\%|$. Dada la asimetría de la figura, y usando los valores $l1/l2$, $l3/l2$, $l3/l1$ definidos en la leyenda de la figura 3-4, en conjunción con el valor absoluto obtenido en dichas restas, se identifican las elipses E1 y E3 para cada grupo de tres regiones.
- (b) Usando la propiedad *orientación*, definida como el ángulo en radianes $[-\pi/2, \pi/2]$ existente entre el eje de abscisas y el eje principal de la elipse, se calcula el valor absoluto de la diferencia entre las orientaciones de E1 y E3. Obviamente, el resultado de esta sustracción idealmente debe ser cero, dado que la orientación de ambas elipses es teóricamente idéntica.
- (c) Usando la propiedad *área*, se calcula la media aritmética de las áreas para cada grupo de elipses candidatas, mA , con el fin de obtener la razón que representa esa área respecto a la región candidata a ser la base de la plataforma, es decir, $A = mA / (h \times w)$, donde h y w son el alto y el ancho de la base de la plataforma, cuyos valores aparecen en la figura 3-4. De este modo, usando la ratio $ar1=2.87$ y el umbral $et2=\pm 20\%$, se comprueba si A cumple con las siguientes condiciones: $(A/mA)*100 \geq ar1*(1 - (et2/100))$; $(A/mA)*100 \leq ar1*(1+(et2/100))$. En caso afirmativo, se obtiene la distancia euclídea entre el centro de la región candidata a ser la base de la plataforma y el punto medio de la distancia entre las elipses E1-E3 ($l2$).

Entonces, para cada grupo de tres regiones, se suman los resultados de las tres ratios obtenidas en los pasos anteriores, esto es: a , b y c . De este modo, el grupo cuya suma resulte ser la más próxima a cero, se identifica como el grupo de regiones constitutivas de la plataforma (elipses E1, E2, E3), y con la región que representa la base de la plataforma (papel A3 en nuestro caso).

El algoritmo que se acaba de describir, y que sirve para identificar las elipses E1, E2 y E3, se representa gráficamente a través del diagrama de flujo que se muestra en la figura 3-8:

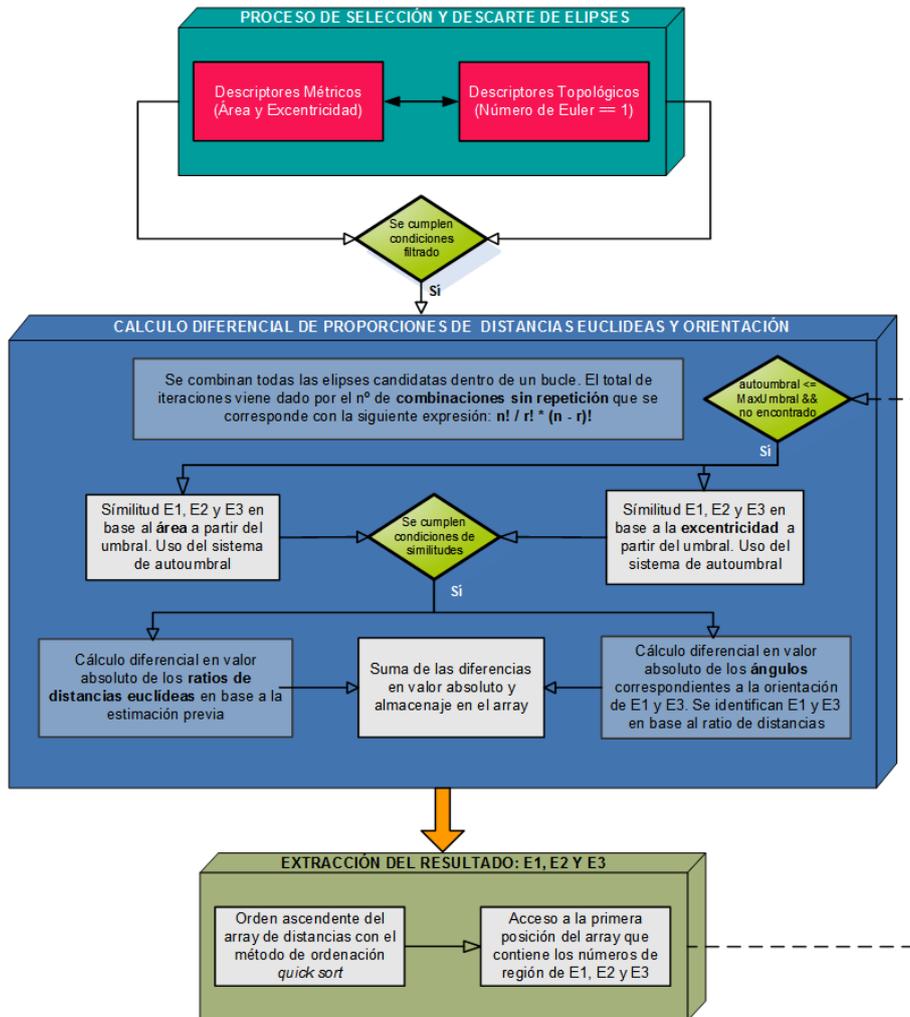


Figura 3-8 – Diagrama de flujo del algoritmo de identificación de elipses

- Usando las propiedades *métricas*: área (número de píxeles), centroide, excentricidad, orientación y el número de Euler como propiedad *topológica*, se identifican los círculos C1, C2, C3 y C4 del siguiente modo:

Para considerar que una región es candidata a círculo, se deben cumplir las siguientes restricciones de valores en los tres rangos especificados: $R_{el} \in \{-2, -1, 0, 1\}$; $R_a \in [5, 45000]$; $R_e \in [0, 0.8]$, donde R_{el} es el número de Euler, R_a es el área y R_e representa la excentricidad. Con las regiones obtenidas, se identifican los círculos en dos fases, de forma que en la primera se identifican C1 y C2, y en la segunda C3 y C4.

Fase 1: inicialmente se identifican los círculos C1 y C2 a través del procedimiento que se describe a continuación:

C1 es identificado, de un modo análogo a como se hizo en el proceso de detección de elipses, es decir, usando la ratio que relaciona al área de cada región con la media aritmética del área de las elipses. El valor teórico de dicha ratio según la figura 3-4, es $ar2 = 50\%$. Sin embargo, para dar más flexibilidad a otras proyecciones de perspectiva en la captura de la imagen distintas a la cenital de la figura 3-4, se usa el umbral $et7 = \pm 45\%$ que aparece definido en la leyenda de dicha figura. En caso de que con un valor del $\pm 45\%$ no se haya identificado círculo alguno, entonces el umbral $et7$ se incrementa de uno en uno (análogamente a los umbrales ast y est descritos en el proceso anterior de detección de elipses), hasta un máximo del 70%. No obstante, el incremento se detendrá en el momento en que se halle un círculo, aunque todavía no se haya llegado a dicho máximo del 70% determinado empíricamente durante la fase experimental.

En base al diseño de la figura de la plataforma, puede observarse como los centros de los círculos C1 y C2, se encuentran solapados en el centro geométrico de la propia plataforma, y además dicho punto coincide con la mitad de la distancia Euclídea entre los centros de las elipses E1 y E3 (I2). Usando las propiedades orientación y centroide de las elipses E1 y E3, se obtienen las coordenadas cartesianas X e Y de dicho punto. A partir de esta información, se aplica a todas las regiones el proceso de selección anterior basado en el umbral $et7$, descrito en el párrafo de arriba, y se calcula la distancia Euclídea comprendida desde el centro de cada región hasta dicho punto. La región con un valor más próximo a cero se identifica como C1.

C2 se determina usando la ratio relativa al área de cada región con respecto al círculo C1. Para su identificación, se toma como valor teórico la ratio $ar6 = 4.6\%$ que aparece en la leyenda de la figura 3-4. Aquí, al igual que como se hizo con la identificación de C1, se vuelve a usar de nuevo el umbral $et7$ exactamente del mismo modo, con el fin de obtener aquellas regiones que tengan una mayor similitud con respecto al área estimada de C1, usada en la ratio $ar6$. Para todas aquellas regiones candidatas seleccionadas, se halla la distancia Euclídea entre el centro de cada región y el punto medio relativo a la línea recta imaginaria que une los centros de las elipses E1 y E3 (I2). La región con un valor más próximo a cero se identifica como C2.

Fase 2: a continuación, se describe el algoritmo que se ha llevado a cabo para la identificación de los círculos C3 y C4:

Su identificación se basa en un proceso de selección y descarte de regiones, análogo al que se acaba de describir en la *fase 1*. Es decir, se basa en relacionar el área de cada región con el área del círculo C1 previamente identificado. Por consiguiente, se procede al cálculo de las ratios $ar4$ y $ar5$. Una vez calculadas, se usan las ratios teóricas $ar4 = 3.34\%$ y $ar5 = 3.34\%$, en conjunción con el umbral $et7 = \pm 45\%$ (ambos definidos en la figura 3-4), con el fin de realizar el proceso de selección y descarte de regiones. Dicho proceso

es el mismo que el que se ha descrito en la *fase 1*, salvo que en este caso se busca que haya un mínimo de dos regiones, en lugar de una.

Para todas aquellas regiones no descartadas, se calcula la distancia Euclídea entre el centroide de la región y el centro de C1, obteniéndose por tanto $l4$ y $l5$. Entonces, se determina la ratio de las distancias ($l4$ y $l5$) con la distancia Euclídea entre los centros de las elipses E1 y E3 ($l2$). Finalmente, a esta ratio se le restan otras dos ratios, cuyos valores son en ambos casos el 51% ($l4/l2$ y $l5/l2$), tal y como se define en el punto 6 de la leyenda de la figura 3-4. Las dos primeras regiones que tengan el valor más próximo a cero, serán identificadas como C3 y C4 respectivamente.

Una vez determinada la orientación de la plataforma, y conocido el ángulo existente entre el centro de C3 y C4 con respecto a C1, se identifican los círculos C3 y C4 usando la propiedad orientación.

Este algoritmo para detectar los círculos C1, C2, C3 y C4 se representa de forma gráfica por medio del siguiente diagrama de flujo, figura 3-9:

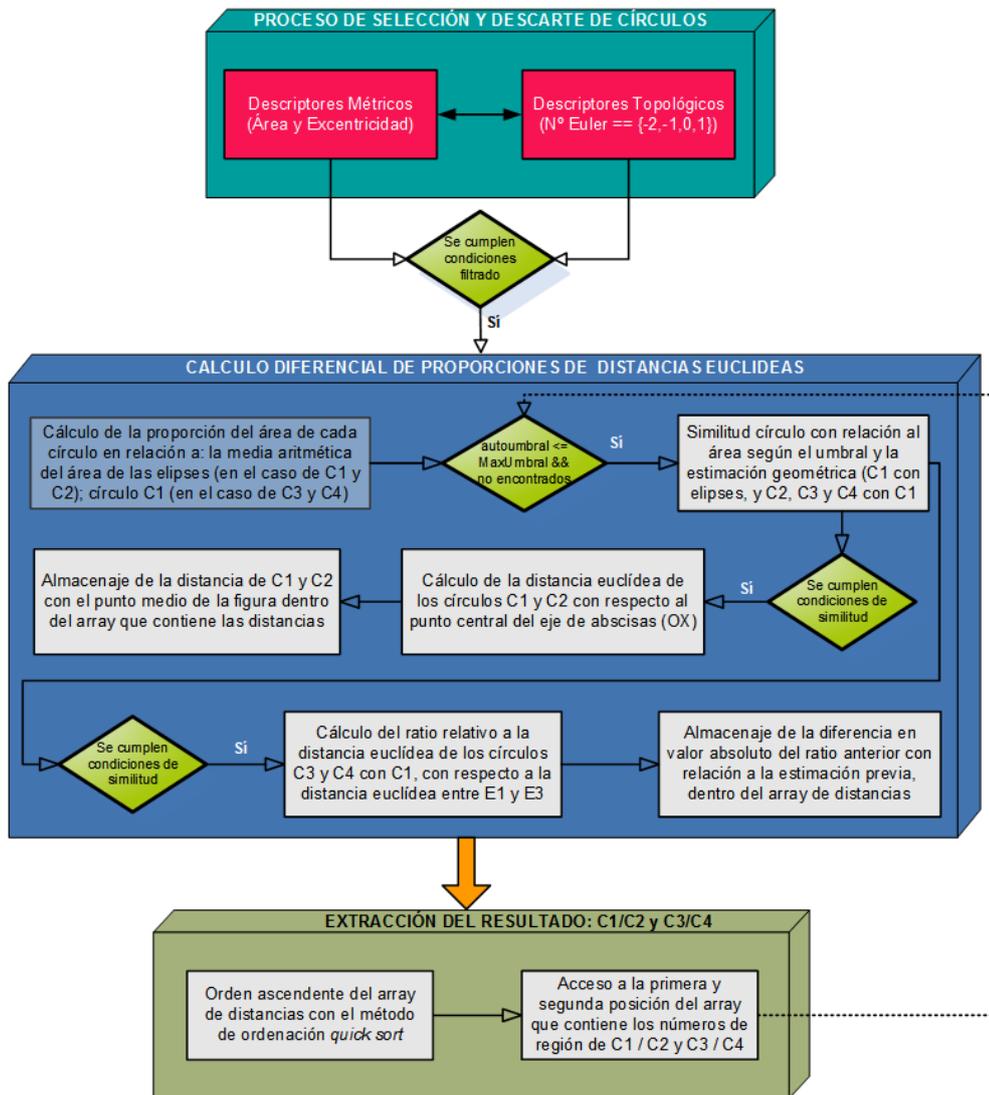


Figura 3-9 – Diagrama de flujo del algoritmo de identificación de círculos

3.4.5 – Reconocimiento de la imagen

8. Una vez identificadas, tanto la base de la plataforma, como las figuras E1, E2, E3, C1, C2, C3 y C4, el sistema dibuja sobre la imagen el centro y los perímetros de dichas regiones usando la ecuación general de la elipse y del círculo. Esto resulta necesario para evaluar el desempeño del sistema en el análisis de los resultados.
9. Se lleva a cabo cada medida de similitud (APC) descrita en la tabla 3-1, usando tanto la orientación de la figura (rotación respecto a la perspectiva cenital de la figura 3-4), y las regiones obtenidas en el paso anterior (*detección de figuras*). A continuación, se hace una descripción de los campos de la tabla 3-1:
 - a. La columna *ID* proporciona un identificador univoco a cada APC, que agrupa una serie de medidas de similitud.
 - b. La columna *Región* enumera todas las regiones que intervienen en el cómputo de las medidas de similitud.
 - c. La columna *Valor* indica la puntuación que se otorga en el caso de que todas las medidas de similitud se cumplan. Si sólo se cumple alguna, el valor es 0.
 - d. La columna *Medidas de Similitud*, muestra todas las inecuaciones que forman parte de cada APC:

ID	Región	Descripción	Valor	Medidas de Similitud
APC1	Plataforma	Estudio del rectángulo (papel A3 en nuestro caso) donde la figura de aterrizaje está impresa (plataforma).	1	$(\text{Plataforma. ancho} / \text{Plataforma. altura}) \geq A * (1 - (\text{et1} / 100))$ $(\text{Plataforma. ancho} / \text{Plataforma. altura}) \leq A * (1 + (\text{et1} / 100))$ $(\text{Plataforma. area} / \text{Elipses. mediaArea}) * 100 \geq \text{ar1} * (1 - (\text{et2} / 100))$ $(\text{Plataforma. area} / \text{Elipses. mediaArea}) * 100 \geq \text{ar1} * (1 - (\text{et2} / 100))$
APC2	E1 E2 E3	Estudio de los ángulos que forman las líneas rectas que conectan los centros de las elipses menos el valor relativo a la orientación de la plataforma.	1	$\text{Plataforma. orientacion} - \text{E1_E3_Angulo} \leq \text{a3} + \text{et3}$ $\text{Plataforma. orientacion} - \text{E1_E3_Angulo} \geq \text{a3} - \text{et3}$ $\text{Plataforma. orientacion} - \text{E2_E3_Angulo} \geq \text{a1} * (1 - (\text{et3} / 100))$ $\text{Plataforma. orientacion} - \text{E2_E3_Angulo} \leq \text{a1} * (1 + (\text{et3} / 100))$ $\text{Plataforma. orientacion} - \text{E1_E2_Angulo} \geq \text{a2} * (1 - (\text{et3} / 100))$ $\text{Plataforma. orientacion} - \text{E1_E2_Angulo} \leq \text{a2} * (1 + (\text{et3} / 100))$
APC3	E1 E2 E3	Estudio de las ratios de las distancias Euclídeas entre las elipses. Se proporciona flexibilidad adicional mediante el uso de un umbral.	1	$(\text{E1_E3_Distancia} / \text{E2_E3_Distancia}) * 100 \geq 12/13 * (1 - (\text{et4} / 100))$ $(\text{E1_E3_Distancia} / \text{E2_E3_Distancia}) * 100 \leq 12/13 * (1 + (\text{et4} / 100))$ $(\text{E1_E2_Distancia} / \text{E1_E3_Distancia}) * 100 \geq 11/12 * (1 - (\text{et4} / 100))$ $(\text{E1_E2_Distancia} / \text{E1_E3_Distancia}) * 100 \leq 11/12 * (1 + (\text{et4} / 100))$ $(\text{E2_E3_Distancia} / \text{E1_E2_Distancia}) * 100 \geq 13/11 * (1 - (\text{et4} / 100))$ $(\text{E2_E3_Distancia} / \text{E1_E2_Distancia}) * 100 \leq 13/11 * (1 + (\text{et4} / 100))$
APC4	E1 E2 E3	Estudio de la similitud del área de las tres elipses. El área de cada elipse es comparada con las otras dos elipses que forman parte del grupo. Se proporciona flexibilidad adicional mediante el uso de un umbral.	1	$\text{E1. area} \geq \text{E3. area} * (1 - (\text{et5} / 100))$ $\text{E1. area} \geq \text{E2. area} * (1 - (\text{et5} / 100))$ $\text{E2. area} \geq \text{E3. area} * (1 - (\text{et5} / 100))$ $\text{E2. area} \geq \text{E1. area} * (1 - (\text{et5} / 100))$ $\text{E3. area} \geq \text{E2. area} * (1 - (\text{et5} / 100))$ $\text{E3. area} \geq \text{E1. area} * (1 - (\text{et5} / 100))$ $\text{E1. area} \leq \text{E3. area} * (1 + (\text{et5} / 100))$ $\text{E1. area} \leq \text{E2. area} * (1 + (\text{et5} / 100))$ $\text{E2. area} \leq \text{E3. area} * (1 + (\text{et5} / 100))$ $\text{E2. area} \leq \text{E1. area} * (1 + (\text{et5} / 100))$ $\text{E3. area} \leq \text{E2. area} * (1 + (\text{et5} / 100))$ $\text{E3. area} \leq \text{E1. area} * (1 + (\text{et5} / 100))$
APC5	E1 E2 E3	Estudio de similitud de la excentricidad de las tres elipses. La excentricidad de cada elipse es comparada con las otras dos elipses que forman parte del grupo. Se proporciona flexibilidad adicional mediante el uso de un umbral.	1	$\text{E1. excentricidad} \geq \text{E3. excentricidad} * (1 - (\text{et6} / 100))$ $\text{E1. excentricidad} \geq \text{E2. excentricidad} * (1 - (\text{et6} / 100))$ $\text{E2. excentricidad} \geq \text{E3. excentricidad} * (1 - (\text{et6} / 100))$ $\text{E2. excentricidad} \geq \text{E1. excentricidad} * (1 - (\text{et6} / 100))$ $\text{E3. excentricidad} \geq \text{E2. excentricidad} * (1 - (\text{et6} / 100))$ $\text{E3. excentricidad} \geq \text{E1. excentricidad} * (1 - (\text{et6} / 100))$ $\text{E1. excentricidad} \leq \text{E3. excentricidad} * (1 + (\text{et6} / 100))$ $\text{E1. excentricidad} \leq \text{E2. excentricidad} * (1 + (\text{et6} / 100))$ $\text{E2. excentricidad} \leq \text{E3. excentricidad} * (1 + (\text{et6} / 100))$ $\text{E2. excentricidad} \leq \text{E1. excentricidad} * (1 + (\text{et6} / 100))$ $\text{E3. excentricidad} \leq \text{E2. excentricidad} * (1 + (\text{et6} / 100))$ $\text{E3. excentricidad} \leq \text{E1. excentricidad} * (1 + (\text{et6} / 100))$
APC6	C1 E1	Estudio del Círculo1 con respecto a las elipses	1	$\text{Plataforma. orientacion} - \text{C1_E3_Angulo} \leq \text{a3} + \text{et10}$ $\text{Plataforma. orientacion} - \text{C1_E3_Angulo} \geq \text{a3} - \text{et10}$

	E2 E3	usando los siguientes descriptores métricos: área, ángulos y distancias		$C1_E3_Distancia \geq (E1_E3_Distancia / 2) * (1 - (et9 / 100))$ $C1_E3_Distancia \leq (E1_E3_Distancia / 2) * (1 + (et9 / 100))$ $(C1.area / Elipses.mediaArea) * 100 \geq ar2 * (1 - (et8 / 100))$ $(C1.area / Elipses.mediaArea) * 100 \leq ar2 * (1 + (et8 / 100))$
APC7	C2 E1 E2 E3	Estudio del Círculo2 con respecto a las elipses usando los siguientes descriptores métricos: área, ángulos y distancias	1	$Plataforma.orientacion - C2_E3_Angulo \leq a3 + et10$ $Plataforma.orientacion - C2_E3_Angulo \geq a3 - et10$ $C2_E3_Distancia \geq (E1_E3_Distancia / 2) * (1 - (et9 / 100))$ $C2_E3_Distancia \leq (E1_E3_Distancia / 2) * (1 + (et9 / 100))$ $(C2.rea / Elipses.mediaArea) * 100 \geq ar3 * (1 - (et8 / 100))$ $(C2.area / Elipses.mediaArea) * 100 \leq ar3 * (1 + (et8 / 100))$
APC8	C3 E1 E2 E3	Estudio del Círculo3 con respecto a las elipses usando los siguientes descriptores métricos: área, ángulos y distancias	1	$Plataforma.orientacion - C3_Plataforma.centro_Angulo \leq a6 * (1 + (et10 / 100))$ $Plataforma.orientacion - C3_Plataforma.centro_Angulo \geq a6 * (1 - (et10 / 100))$ $C3_Plataforma.centro_Distancia \geq l4/2 * (1 - (et9 / 100))$ $C3_Plataforma.centro_Distancia \leq l4/2 * (1 + (et9 / 100))$ $(C3.area / Elipses.mediaArea) * 100 \geq ar4 * (1 - (et8 / 100))$ $(C3.area / Elipses.mediaArea) * 100 \leq ar4 * (1 + (et8 / 100))$
APC9	C4 E1 E2 E3	Estudio del Círculo4 con respecto a las elipses usando los siguientes descriptores métricos: área, ángulos y distancias	1	$Plataforma.orientacion - C4_Plataforma.centro_Angulo \leq a5 * (1 + (et10 / 100))$ $Plataforma.orientacion - C4_Plataforma.centro_Angulo \geq a5 * (1 - (et10 / 100))$ $C4_Plataforma.centro_Distancia \geq l5/2 * (1 - (et9 / 100))$ $C4_Plataforma.centro_Distancia \leq l5/2 * (1 + (et9 / 100))$ $(C4.area / Elipses.mediaArea) * 100 \geq ar5 * (1 - (et8 / 100))$ $(C4.area / Elipses.mediaArea) * 100 \leq ar5 * (1 + (et8 / 100))$
APC10	C1 C2 C3 C4	Estudio general de los círculos en su conjunto mediante el estudio de la coherencia con relación a los siguientes descriptores métricos: área, ángulos y distancias	1	$Plataforma.orientacion - C1_C3_Angulo \geq a6 * (1 - (et10 / 100))$ $Plataforma.orientacion - C1_C3_Angulo \leq a6 * (1 + (et10 / 100))$ $Plataforma.orientacion - C1_C4_Angulo \geq a6 * (1 - (et10 / 100))$ $Plataforma.orientacion - C1_C4_Angulo \leq a6 * (1 + (et10 / 100))$ $Plataforma.orientacion - C2_C3_Angulo \geq a5 * (1 - (et10 / 100))$ $Plataforma.orientacion - C2_C3_Angulo \leq a5 * (1 + (et10 / 100))$ $Plataforma.orientacion - C2_C4_Angulo \geq a5 * (1 - (et10 / 100))$ $Plataforma.orientacion - C2_C4_Angulo \leq a5 * (1 + (et10 / 100))$ $C1_C3_Distancia \geq l4/2 * (1 - (et9 / 100))$ $C1_C3_Distancia \leq l4/2 * (1 + (et9 / 100))$ $C1_C4_Distancia \geq l5/2 * (1 - (et9 / 100))$ $C1_C4_Distancia \leq l5/2 * (1 + (et9 / 100))$ $C2_C3_Distancia \geq l4/2 * (1 - (et9 / 100))$ $C2_C3_Distancia \leq l4/2 * (1 + (et9 / 100))$ $C2_C4_Distancia \geq l5/2 * (1 - (et9 / 100))$ $C2_C4_Distancia \leq l5/2 * (1 + (et9 / 100))$

Tabla 3-1 – Análisis Parciales Comparativos (APC). Umbrales y constantes se definen en la figura 3-4

10. Tanto los umbrales como las constantes aparecen definidas en la figura 3-4. Sin embargo, ciertos valores como: Plataforma.ancho, Plataforma.alto, Plataforma.area, Plataforma.orientacion, Elipses.mediaArea, CX.area y CX.excentricidad, se calculan una vez se han detectado las figuras. El símbolo guion bajo “_” se usa para delimitar regiones, por ejemplo, E1_E3_Distancia hace referencia a la distancia existente entre los centros de las elipses E1 y E3.

11. A partir de los resultados obtenidos en cada APC definido en la tabla 3-1, que puede ser *verdadero* o *falso*, o lo que es lo mismo, 1 ó 0 respectivamente, se determina el resultado final. Dicho resultado, expresa de una forma numérica cual es el grado de reconocimiento, que indica en qué medida la imagen procesada contiene la plataforma de aterrizaje: $P = (sumaTotalAciertosAPC / 10) * 100$.

12. Determinación final del resultado. Si $P \geq 0.6$ (que es un valor aceptable) la figura se da por reconocida; en caso contrario se da por no identificada, y comienza de nuevo el proceso (otra iteración gracias al uso de la recursividad) con otro tipo de técnica de umbralización siempre y cuando se encuentre activada la función de *autoumbrales* definida a través de la sección de configuración del sistema.

3.5 – Resultados

En la figura 3-10 se muestra un ejemplo ilustrativo sobre los resultados obtenidos en cada uno de los pasos del procesamiento de la imagen que se llevan a cabo durante el reconocimiento.

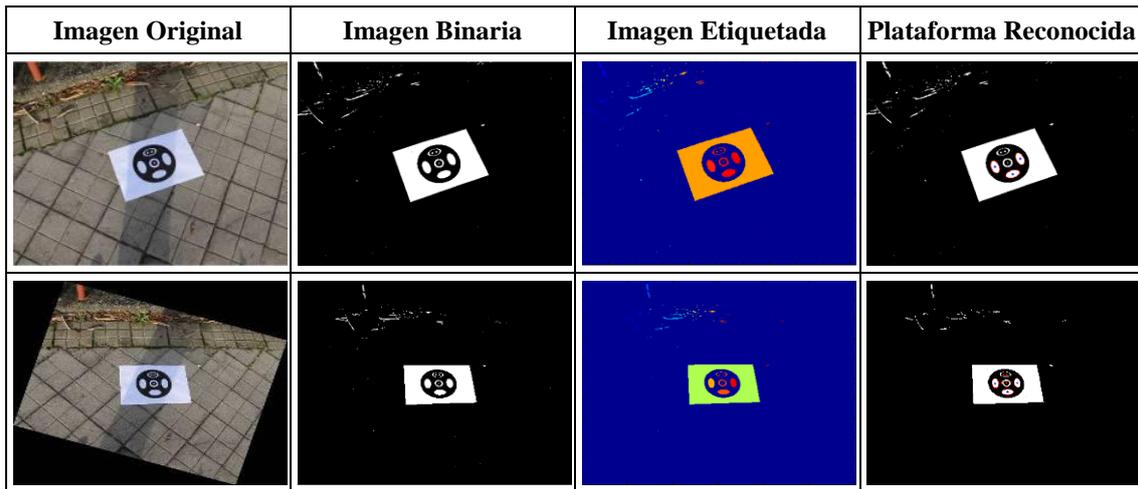


Figura 3-10 – Ejemplo ilustrativo de los resultados obtenidos en cada proceso

A continuación, se describe brevemente la relación entre los procesos que componen el sistema, así como los módulos definidos en su arquitectura a través de la figura 3-7:

- (a) Imagen Original: muestra la imagen original sin procesado, es decir, la imagen que se genera en el proceso de adquisición.
- (b) Imagen Binaria: muestra la imagen binaria (blanco y negro) que se ha generado en el proceso de segmentación a partir del tipo de umbral usado. Es la imagen que sirve de entrada al proceso de extracción de regiones.
- (c) Imagen Etiquetada: muestra las regiones en que se ha descompuesto la imagen binaria una vez se ha llevado a cabo el proceso de etiquetado de regiones conexas. Cada color representa una región.
- (d) Plataforma Reconocida: el sistema dibuja sobre la imagen binaria, los resultados del proceso de identificación de elipses y círculos a partir de las ecuaciones generales de la elipse y del círculo.

La mitad de las imágenes (80) se tomaron con un móvil Samsung Galaxy S6, el mismo que va incorporado en el UAV, figura 3-10. Si bien, con el fin de independizar el comportamiento del método respecto de las condiciones de vuelo, cabe reseñar, que las imágenes usadas en la fase experimental se obtuvieron en varias sesiones de emulación de determinadas condiciones del vuelo, a saber: altura, ángulo de inclinación, condiciones ambientales de iluminación, usando para ello la escalera de incendios de un edificio.

Además, con el fin de determinar diferencias con relación a la calidad de la cámara durante el proceso de pruebas, se usaron dos móviles diferentes que se detallan en el apartado siguiente, replicándose por consiguiente las imágenes en ambos dispositivos.

3.5.1 – Entorno de adquisición de imágenes

Todas las imágenes fueron adquiridas teniendo en cuenta las siguientes premisas que se indican a continuación:

1. La plataforma de aterrizaje usada durante la fase experimental fue impresa en una hoja de papel blanca A3 (297 mm x 420 mm). Sin embargo, el diseño original de dicha plataforma patentada [2] es de 1 m x 1 m. De hecho, dado que una imagen proporcionalmente más pequeña emula condiciones de mayor distancia, contribuye positivamente a encontrar los límites y debilidades del método.
2. La profundidad de color usada es de 3 bytes (24 bits), usando 8 bits por cada canal RGB. Además, se usó una compresión estándar JPEG.
3. Para tener en consideración qué factor desempeña la calidad de la cámara, todas las imágenes fueron tomadas por dos móviles distintos: un (a) Samsung Galaxy Ace GT-S5830 (5MP, F/2.6), (b) un Samsung Galaxy S6 (16MP, F/1.9).
4. Todas las imágenes fueron tomadas con una resolución de 4M, con dimensiones de 2560×1944 píxeles. Sin embargo, el sistema aplica procesos de escalado que son totalmente configurables.
5. Se tomaron 160 fotografías en diferentes condiciones (consultar Anexo I). Estas imágenes fueron procesadas usando un ordenador personal con MATLAB [77] R2018a, y los resultados obtenidos se analizaron en base a los siguientes tipos de experimentos: distancia, inclinación y condiciones ambientales de iluminación.
6. El escenario donde se realizaron las sesiones de simulación de captura del vuelo se corresponde con el patio de un edificio de viviendas en un área residencial. Se usaron las ventanas de las escaleras de incendios para simular las diferentes condiciones del vuelo. Todas las imágenes fueron tomadas sin zoom ni flash.

Para determinar la eficiencia del método se han tenido en cuenta las siguientes consideraciones: efecto relativo a la calidad del sensor, distancia del sistema de visión, ángulo de inclinación con respecto a la plataforma y las condiciones de iluminación. Se usaron cuatro configuraciones internas con cada una de las ciento sesenta imágenes que constituyen la batería de experimentos, variando la técnica de umbral y la resolución como se indica a continuación: 1024×768 con umbral directo, 1024×768 con el umbral Otsu, 2592×1944 con umbral directo y 2592×1944 con umbral Otsu. En el caso de que alguna configuración resulte exitosa (en dicho orden) con relación a la detección de la plataforma, las otras ya no se prueban.

Las figuras 3-11a / 3-13a / 3-15a, muestran resúmenes de los resultados generales para las ciento sesenta imágenes utilizadas, donde una prueba se considera un acierto si con cualquiera de las cuatro configuraciones anteriores se consigue reconocer con éxito la plataforma. Por tanto, su resultado coincide con el grado final de reconocimiento. Los gráficos 3-11b / 3-13b / 3-15b, muestran los resultados de la configuración para cada imagen.

3.5.2 – Pruebas relativas a la distancia

Se usaron ciento sesenta imágenes con distancias de separación entre la cámara y la plataforma de aproximación variando de 0.6 m a 10 m. En este sentido, se debe señalar, que la distancia desempeña un impacto significativo en lo que concierne a la efectividad

del reconocimiento. La distancia se analiza utilizando la proporción (Pr) definida como *área en píxeles de la plataforma* dividida por el *área en píxeles de la imagen completa*. Cuanto mayor sea el valor de este cociente, más efectiva y potencialmente útil será la imagen, y viceversa, desde el punto de vista de su reconocimiento. Todos los resultados obtenidos se resumen en la figura 3-11. Las gráficas 3-11a y 3-11b muestran la efectividad, definida como el porcentaje promedio de éxito en el reconocimiento de la plataforma, para diferentes distancias medidas desde el centro de la plataforma hasta el plano donde supuestamente se sitúa la lente del sistema de captura, teniendo en consideración el tipo de umbral usado: directo y Otsu.

Las gráficas indican que existe una efectividad en el reconocimiento menor para aquellas imágenes tomadas en el rango de 4 m a 8 m, que, para las comprendidas en el intervalo de 8 m en adelante, lo cual puede parecer inconsistente. Sin embargo, este hecho se debe al ángulo de inclinación, ya que, en las imágenes tomadas en el rango de 8 m en adelante, este ángulo era en promedio notablemente más pequeño, tal y como se muestra en las tablas 3-3 a 3-6.

La calidad del sistema de captura de la imagen influye significativamente en la efectividad, puesto que el Galaxy S6 obtiene unos resultados sensiblemente mejores a los resultados que presenta el Galaxy Ace, en todos los rangos de distancias. De hecho, se observó un 100% de éxito en distancias de hasta 10 m con un ángulo de inclinación inferior al 35% para las imágenes tomadas con el Galaxy S6. Sin embargo, se observó un 79.75% de éxito cuando este ángulo era inferior a 60°. Si el ángulo de inclinación era menor de 40°, entonces el sistema se comportaba perfectamente hasta los 8 m. Más allá de esta distancia, el sistema ya no es capaz de reconocer la plataforma de aterrizaje de forma correcta.

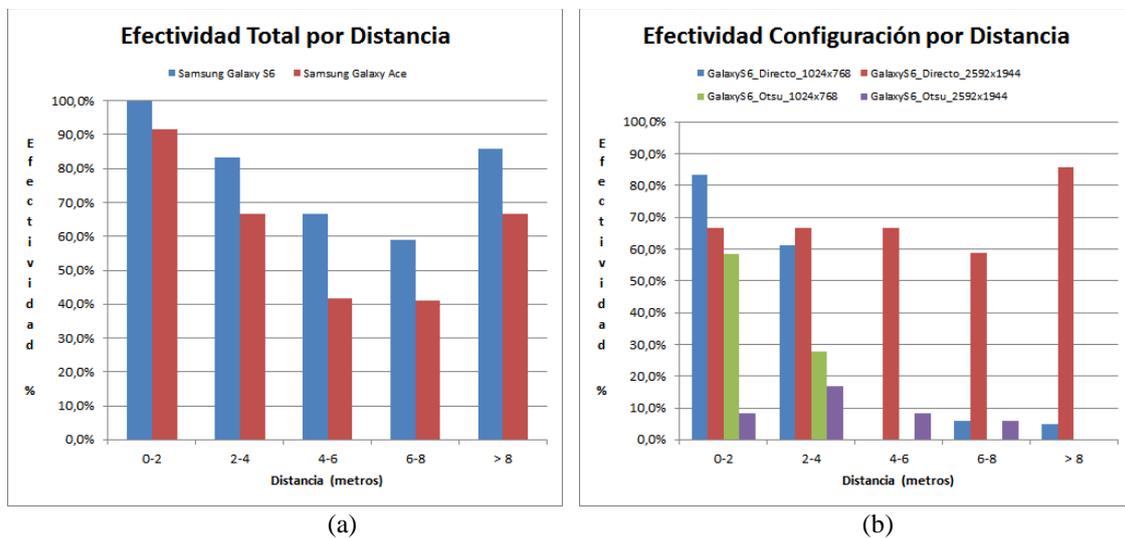


Figura 3-11 – Efectividad con relación a la distancia (m) para las dos cámaras. (a) Efectividad general por tipo de cámara. (b) Efectividad por tipo de configuración para el Samsung Galaxy S6

Para las distancias comprendidas en el rango de 0 m a 4 m, el reconocimiento es efectivo cuando se utilizan resoluciones espaciales bajas (1024×768 píxeles). A medida que aumenta la distancia entre la lente de la cámara y la plataforma de aterrizaje, y por lo tanto disminuye Pr , los mejores resultados se obtienen usando una resolución alta (2592×1944 píxeles). Sin embargo, utilizando este tipo de resolución más elevada con

distancias menores a 4 m, el número de regiones que se generan a través del proceso de segmentación aumenta considerablemente.

Esto repercute en un incremento del número de regiones candidatas con atributos similares, lo que afecta de una forma negativa al proceso de reconocimiento, ya que la discriminación entre regiones se complica en exceso. Por ende, una de las conclusiones más relevantes que se obtienen a partir de estos experimentos, es que la adaptación de la resolución de la imagen en función de la distancia es un factor muy importante.

3.5.2.1 – Ejemplos ilustrativos con relación a la distancia

En la figura 3-12 se muestran dos imágenes con condiciones de adquisición muy diferentes en lo que respecta a la distancia. Ambas se obtuvieron bajo unas condiciones de iluminación similares, sin embargo, la distancia varía (6.3 m y 0.66 m). La imagen 3-12A se tomó a una distancia sensiblemente superior a la de la imagen 3-12B, lo que se traduce en que el valor de Pr es sensiblemente menor. Sin embargo, la plataforma se reconoce correctamente en ambas imágenes, lo que sirve para constatar la versatilidad y la eficiencia del método de detección en términos de distancia.

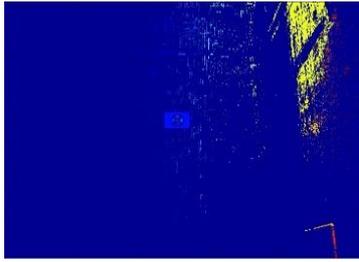
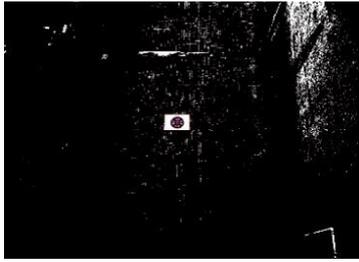
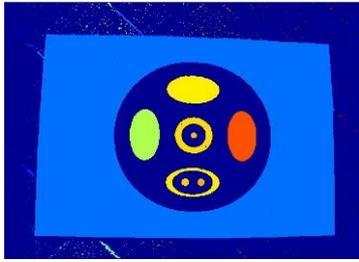
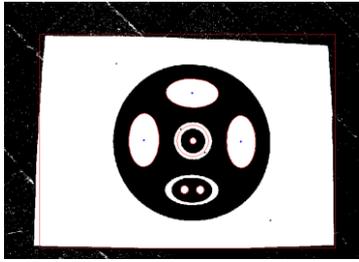
#	Imagen Original	Imagen Etiquetada	Plataforma Reconocida
A			
B			

Figura 3-12 – Ejemplos ilustrativos con relación a distancias antagónicas bajo las mismas condiciones de iluminación: (A) a 6.3 m; (B) a 0.66 m

3.5.3 – Pruebas relativas al ángulo de inclinación

Se analizaron ciento sesenta imágenes variando los ángulos de inclinación entre 3° y 61°. Este ángulo se define como el ángulo en grados que forma el eje óptico del sistema de visión con el centro de la figura, con respecto a una línea recta imaginaria perpendicular al suelo, que sigue el eje óptico, y que pasa por el centro del plano de la imagen.

Los resultados, que aparecen representados en forma de diagramas de barras, se muestran en la figura 3-13, en la cual se lleva a cabo una comparativa por tipo de cámara, y por tipo de configuración usada (con relación al tipo de umbral y resolución), siempre

con respecto al ángulo de inclinación que aparece representado en la leyenda inferior de las gráficas.

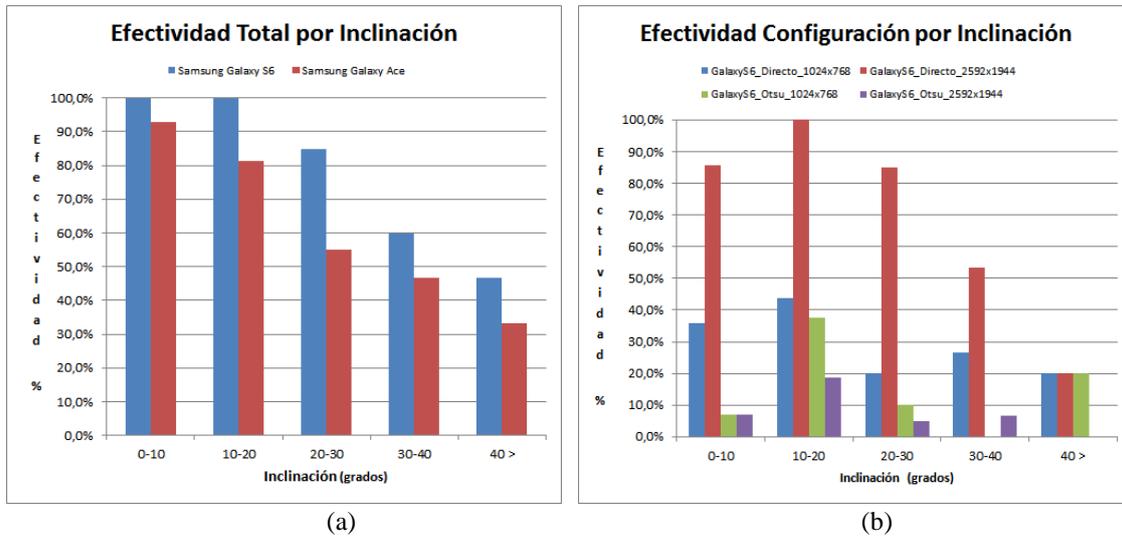


Figura 3-13 – Efectividad con relación al ángulo de inclinación. (a) Efectividad general por tipo de cámara. (b) Efectividad por tipo de configuración para el Samsung Galaxy S6

Para la cámara del Galaxy S6, el promedio de éxito es de un 100% en el rango de 0° a 20° con relación al ángulo de inclinación. Sin embargo, para rangos de ángulos más altos, el promedio de efectividad comienza a disminuir del siguiente modo: 0° - 30° (94%), 0° - 35° (89.66%), 0° - 40° (86.15%), 0° - 45° (82.86%), 0° - 50° (81.33%), 0° - 55° (81.57%) y 0° - 60° (79.74%).

Se observa claramente cómo ángulos de inclinación elevados comprometen la efectividad general del reconocimiento en mayor medida que la distancia. Esto se debe a que, según la perspectiva, y, por ende, el ángulo de inclinación, la distorsión en el plano se hace más evidente. Esta distorsión provoca que un círculo comience a ser percibido como una elipse, afectando significativamente a la excentricidad y, en menor medida, al área de las regiones. El uso de umbrales que aporten flexibilidad para gestionar diferentes proyecciones de perspectivas causadas por el ángulo de inclinación resulta esencial para mitigar esta limitación.

3.5.3.1 – Ejemplos ilustrativos en relación con el ángulo de inclinación

Las dos imágenes de la figura 3-14 sirven para ilustrar la versatilidad del algoritmo ante diferentes tipos de proyecciones de perspectiva. Este método propuesto resultó ser efectivo en ángulos de inclinación elevados, siempre que dichos ángulos no sean tan acusados, que causen que la excentricidad de un círculo aumente de tal modo que éste sea percibido como una elipse. La imagen 3-14B sufre este problema: ante una inclinación demasiado elevada, el sistema confunde las elipses con los círculos C3 y C4, y, por tanto, el proceso de reconocimiento falla, algo que se confirma también a través de la puntuación de reconocimiento del 40% que el sistema otorga a dicha imagen.

Sin embargo, en el experimento que ilustra la figura 3-14A, a pesar de que también posee un grado de inclinación bastante acusado (50.71°), el sistema es capaz de identificar correctamente círculos y elipses como se denota por las líneas rojas generadas por el

sistema de reconocimiento que incorpora el algoritmo. Sin embargo, en este caso, el sistema reconoce correctamente la figura impresa sobre la plataforma con un grado de reconocimiento del 90%.

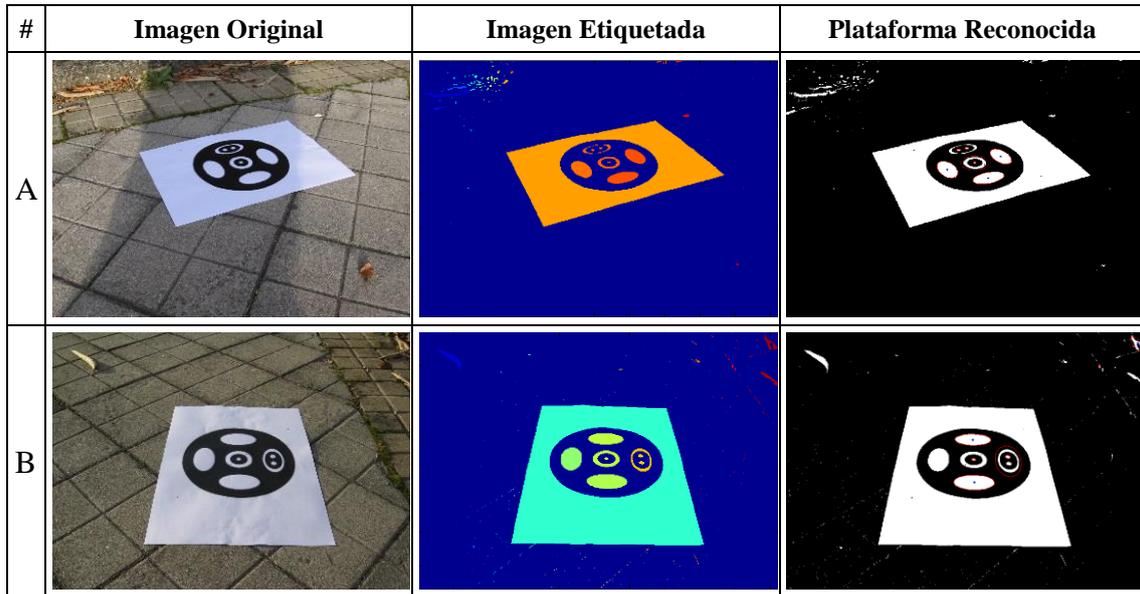


Figura 3-14 – Ejemplos ilustrativos con relación al ángulo de inclinación: (A) reconocimiento exitoso con 50.71°; (B) reconocimiento fallido con 56.31°

3.5.4 – Pruebas relativas a las condiciones de iluminación

Se adquirieron ciento sesenta imágenes, pero en este caso, las condiciones de adquisición relativas a la iluminación de cada imagen se determinaron manualmente durante los experimentos. Las condiciones de iluminación se representaron a través de una variable categórica que contempla los siguientes estados: {soleado, nublado, sol y sombra, luz artificial}. Los resultados se muestran en la figura 3-15.

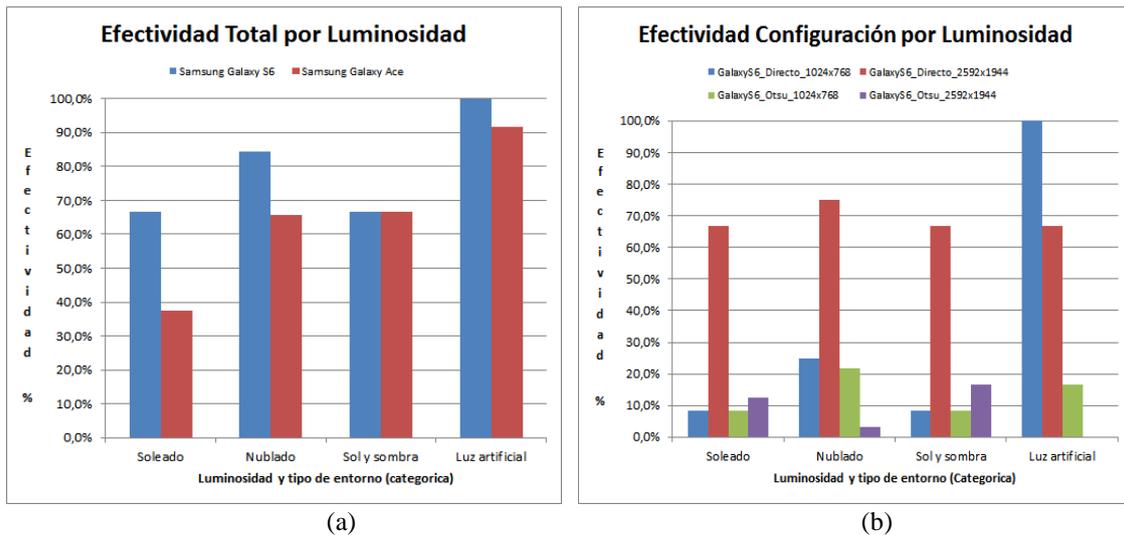


Figura 3-15 – Efectividad con relación a las condiciones lumínicas. (a) Efectividad general por tipo de cámara. (b) Efectividad por tipo de configuración para el Samsung Galaxy S6

Tal y cómo ya se observó previamente, la calidad de la cámara influye de una forma bastante significativa en el éxito del reconocimiento. Sin embargo, este factor tiene

una influencia todavía mayor bajo condiciones de iluminación intensa, es decir, en días soleados donde existe una probabilidad mayor de que aparezcan falsas regiones sobre la plataforma. Con relación a la figura 3-15, la barra más larga es siempre azul o roja, ambas representando el método de umbralización directa. Por tanto, si el parámetro de resolución no se tiene en cuenta, el método de umbralización directa [76] superó al método de Otsu [78] en todas las condiciones (en la figura 3-15b la barra azul siempre supera a la barra verde, y la barra roja supera a la barra morada). En condiciones soleadas el ángulo de inclinación es particularmente significativo, porque la luz solar que impacta de forma directa en la plataforma genera reflejos, que pueden causar la desaparición de regiones durante el proceso de binarización.

En las pruebas donde se utilizó luz artificial, se observa claramente cómo el uso de una resolución más elevada mejora los resultados. Sin embargo, es la distancia la que realmente influye en la efectividad, puesto que las imágenes tomadas bajo este tipo de condiciones lumínicas se encontraban a una distancia promedio más corta. Las pruebas diurnas generalmente mostraron una efectividad peor que las llevadas a cabo durante la noche bajo luz artificial. Por la noche, dado que las condiciones de iluminación pueden controlarse, la calidad de la imagen tiene una influencia menor con respecto a los experimentos analizados con anterioridad.

3.5.4.1 – Ejemplos ilustrativos con relación a condiciones de iluminación diversas

La imagen 3-16A fue obtenida en condiciones soleadas, pero con una sombra que atraviesa la plataforma por el centro del dibujo, lo que provoca que su clasificación sea considerada como condiciones lumínicas de *sol y sombra*. A pesar de que la sombra incide notablemente sobre la figura, el sistema la reconoce perfectamente con un 100%. Por otro lado, la figura 3-16B, tiene un problema de iluminación que causa que algunas regiones no aparezcan debido a los reflejos generados por la luz del sol a consecuencia del ángulo de inclinación. Sin embargo, aunque hay regiones inexistentes, el sistema reconoció la plataforma correctamente con una puntuación del 70%, ya que las tres elipses (regiones obligatorias para el reconocimiento) no se vieron afectadas por los reflejos. Las elipses E1, E2 y E3 se consideran imprescindibles, puesto que el resto de las figuras, es decir, los círculos C1, C2, C3 y C4, dependen en gran medida de la geometría de las elipses.

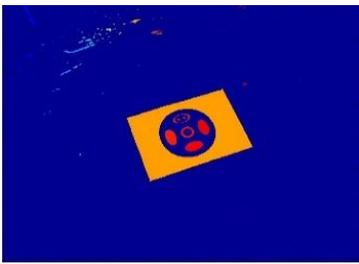
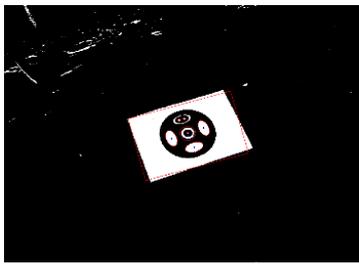
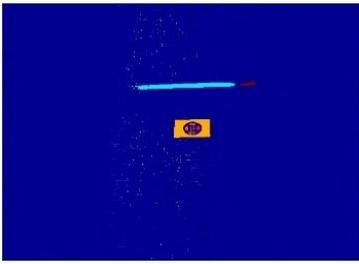
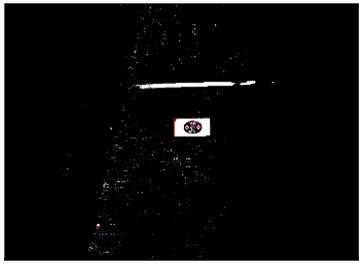
#	Imagen Original	Imagen Etiquetada	Plataforma Reconocida
A			
B			

Figura 3-16 – Ejemplos ilustrativos con relación a las condiciones lumínicas: (A) sol y sombra; (B) soleado

3.5.5 – Evaluación del método

Un aspecto muy importante a tener en cuenta es el relativo al valor del grado de reconocimiento de la plataforma. Pues bien, a la hora de evaluar la puntuación de reconocimiento, aspecto fundamental para determinar la fiabilidad del método [1], y por lo tanto decidir qué nivel de credibilidad se le puede otorgar, ha sido necesario llevar a cabo un tipo de inspección visual (realizado por un humano).

Este proceso de supervisión consiste en hacer una inspección visual del resultado, que dictamine si el sistema de reconocimiento ha detectado como mínimo tres regiones significativas de la plataforma (marcadas de color rojo), y que éstas coincidan con alguna de las siete figuras {E1, E2, E3, C1, C2, C3, C4} que forman parte de la plataforma de aterrizaje. A pesar de que se puede emplear una gran variedad de criterios para decidir lo que es realmente un acierto, éste permite evaluar de una forma objetiva, si el método propuesto tiene un comportamiento adecuado, es decir, comprobar que, para valores bajos sobre el grado de reconocimiento, no se detectan como mínimo tres regiones que se corresponden con alguna de las figuras {E1, E2, E3, C1, C2, C3, C4}, mientras que para valores altos sí.

Un criterio análogo a éste también ha sido utilizado en la evaluación del grado de reconocimiento del método 2 que se describe en el siguiente capítulo. De este modo, se puede establecer una comparativa entre los resultados de ambos métodos de una forma más objetiva. Finalmente, con el fin de sintetizar toda esta información relativa a la evaluación del resultado, se ha decidido mostrar inicialmente una tabla resumen en la que se recoge el porcentaje de aciertos según el grado de reconocimiento, es decir, la ratio *aciertos test / test totales*:

Adquisición			Aciertos en % (Grado de Reconocimiento)										
Cámara	Umbral	Escalado	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Samsung Galaxy S6	Directo	1024×768	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100	0.0	100	100	100	100
		2592×1944	0.0	20.0	9.1	0.0	100	57.1	100	100	100	100	100
	Otsu	1024×768	20.0	9.1	0.0	0.0	0.0	50.0	100	100	100	100	100
		2592×1944	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	12.5	0.0	100	0.0	0.0	100
Samsung Galaxy ACE	Directo	1024×768	0.0	0.0	14.3	0.0	0.0	100	0.0	100	100	100	100
		2592×1944	50.0	0.0	14.3	8.3	33.3	54.5	85.7	100	100	100	100
	Otsu	1024×768	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	25.0	100	100	0.0	100	100
		2592×1944	0.0	0.0	3.8	0.0	16.7	50.0	0.0	75.0	66.7	0.0	100
TOTAL			7.9	2.9	4.7	1.4	9.4	46.8	84	96	93.3	100	100

Tabla 3-2 – Matriz de resultado de evaluación del grado de reconocimiento

Para concluir con este apartado, se muestra una gráfica basada en columnas verticales que representan de manera visual los valores recogidos en la tabla 3-2, es decir, el porcentaje de aciertos existente por cada valor de resultado final obtenido:

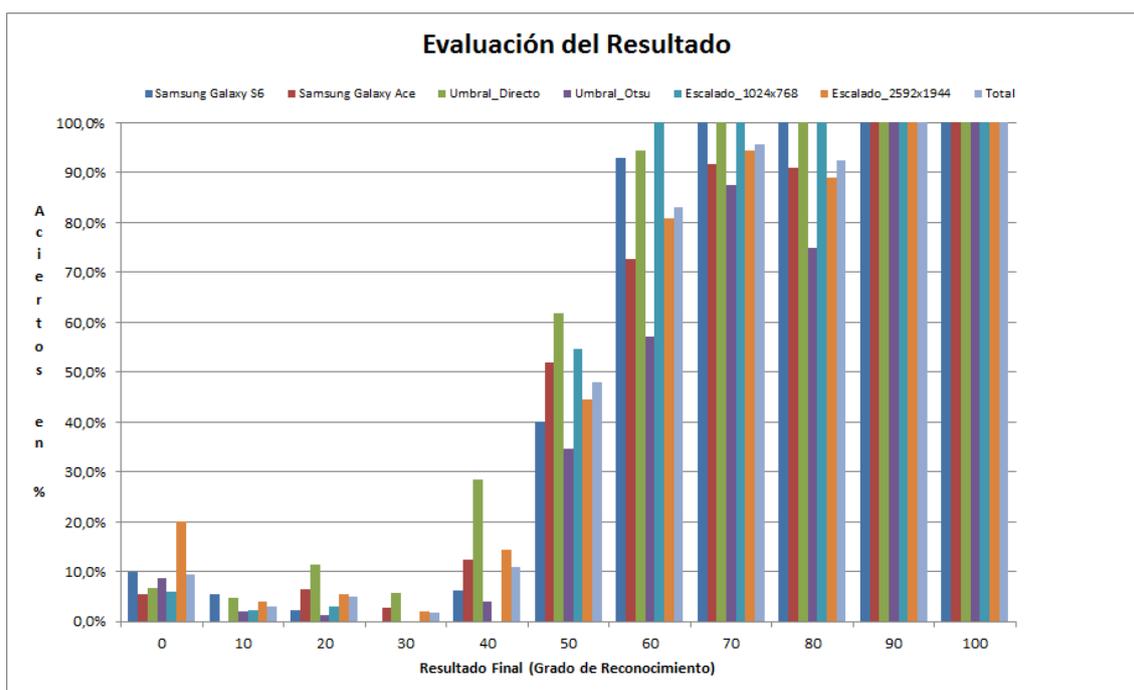


Figura 3-17 – Fiabilidad real del grado de reconocimiento devuelto por el método 1

Tal y como se desprende de la gráfica 3-17, la fiabilidad del resultado mostrada como un valor numérico en el grado de reconocimiento es elevada, dando así crédito al resultado que proporciona el algoritmo. Por consiguiente, el reconocimiento resulta coherente con el resultado proporcionado por el método de detección basado en las medidas de similitud implementada en los análisis parciales comparativos (APC).

3.5.6 – Resumen global de los resultados

Finalmente, en las tablas 3-3 a 3-6, se muestran los resultados que han sido utilizados para construir las figuras 3-11 / 3-13 / 3-15. La tabla 3-3, establece la relación de la distancia entre la lente de la cámara y el centro de la figura que forma parte de la plataforma. También muestra el ángulo de inclinación, la altura y la distancia.

		Distancia (metros)					Inclinación (grados)				
		0 - 2	2 - 4	4 - 6	6 - 8	> 8	0 -10	10 -20	20 -30	30 -40	>40
Cámara	Galaxy S6	100	83.3	66.7	58.8	85.7	100	100	85.0	60.0	46.7
	Galaxy Ace	91.7	66.7	41.7	41.2	66.7	92.9	81.3	55.0	46.7	33.3
Umbral	Otsu	81.3	59.7	25.0	26.5	36.9	57.1	64.1	40.0	38.3	25.0
	Directo	33.3	19.4	6.3	2.9	4.8	14.3	25.0	7.5	3.3	11.7
Resolución	1024x768	64.6	40.3	0.0	1.5	1.2	19.6	34.4	11.3	13.3	20.0
	2560x1920	50.0	38.9	31.3	27.9	40.5	51.8	54.7	36.3	28.3	16.7
TOTAL		70.1	51.4	28.5	26.5	39.3	56.0	59.9	39.2	31.7	25.6

Tabla 3-3 – Resumen de la tasa de éxito (%) en función de la distancia y la inclinación.

El valor numérico de cada una de las celdas de la tabla 3-3 se obtiene de forma distinta, atendiendo al tipo de clasificación que se lleve a cabo:

- a. Clasificación por tipo de cámara: es el porcentaje derivado de la proporción de imágenes exitosas / imágenes totales. Entendiendo por

imágenes exitosas aquéllas en las que se reconoce la plataforma que existe realmente en la imagen.

- b. Clasificación por tipo de umbral y por resolución: es el porcentaje derivado de la proporción de *configuraciones realizadas / pruebas totales*.

En ambos casos se concluye que el resultado es exitoso, cuando la supervisión visual del usuario determina que existen al menos tres regiones reales (marcadas en rojo en la imagen original), y que dichas regiones coinciden con las figuras de la plataforma. Sin embargo, en el caso de las celdas de la tabla correspondientes a la clasificación por tipo de cámara, se registra un éxito si al menos una configuración (de las cuatro que se realizan con la imagen) es exitosa según los criterios anteriores.

La tabla 3-4 es similar a la anterior, pero ahora se consideran las condiciones de iluminación y el entorno. Cada valor de la celda en la tabla 3-4 se obtuvo de la misma manera que para la tabla 3-3:

		Soleado	Nublado	Sol y sombra	Luz artificial
Cámara	Galaxy S6	66.7	84.4	66.7	100.0
	Galaxy Ace	37.5	65.6	66.7	91.7
Umbral	Otsu	26.0	46.9	35.4	85.4
	Direct	13.5	12.5	16.7	4.2
Resolución	1024×768	8.3	20.3	8.3	50.0
	2560×1920	31.3	39.1	43.8	39.6
TOTAL		30.6	44.8	39.6	61.8

Tabla 3-4 – Resumen de la tasa de éxito (%) en función de las condiciones de iluminación

Finalmente, las tablas 3-5 y 3-6, permiten establecer las relaciones entre los datos usando intervalos agregados y excluyentes. Para el caso de los intervalos excluyentes, los rangos nunca se solapan entre sí, es decir, se excluyen: [0, 10), [10, 20), [20, 30) y así sucesivamente. Sin embargo, para el caso de los intervalos agregados, los valores de dichos intervalos se solapan, es decir, se van acumulando: [0, 10], [0, 20], [0, 30] y así sucesivamente.

En la tabla 3-5 se relaciona la distancia y el ángulo de inclinación de una manera en que los intervalos se excluyen entre sí. En todos los casos, se usaron las imágenes de la cámara del Samsung Galaxy S6 para realizar el análisis de los intervalos:

Samsung Galaxy S6 / Todas las condiciones lumínicas	Distancia (metros)				
Inclinación (grados)	0 - 2	2 - 4	4 - 6	6 - 8	>8
0 - 10	100	NA	100	NA	100
10 - 20	100	100	100	NA	100
20 - 30	100	100	NA	75	100
30 - 40	NA	72.7	NA	100	0
>40	100	100	42.9	0	NA

Tabla 3-5 – Resumen de la tasa de éxito (%) para la distancia y el ángulo de inclinación de una manera en que los intervalos se excluyen entre sí. "NA" indica datos no disponibles

La tabla 3-6 es similar a la tabla 3-5, pero en este caso se usa el agregado para los intervalos:

Samsung Galaxy S6 / Todas las condiciones lumínicas	Distancia (metros)				
	0 - 2	0 - 4	0 - 6	0 - 8	0 - >8
Inclinación (grados)					
0 - 10	100	100	100	100	100
0 - 20	100	100	100	100	100
0 - 30	100	100	100	90,6	94
0 - 40	100	88.5	90.3	86.4	86.2
0 - >40	100	90	83.3	76.3	78.8

Tabla 3-6 – Resumen de la tasa de éxito (%) con relación a la distancia y el ángulo de inclinación. Se usan intervalos agregados

A partir de los resultados mostrados en las tablas 3-5 y 3-6, es posible realizar el análisis excluyendo unos parámetros de otros, en lo que respecta a la distancia y a los ángulos de inclinación. Si se hace un análisis de los datos de dichas tablas, usando unos rangos razonables (sin usar valores extremos) con relación a la distancia y al ángulo de inclinación, los resultados son generalmente aceptables. Sin embargo, cuando el ángulo de inclinación aumenta significativamente, la tasa de éxito disminuye. Los ángulos de inclinación grandes comprometen la efectividad del reconocimiento general mucho más que la distancia. Esta problemática, fue por tanto tenida en consideración en el método 2 que se expone en el siguiente capítulo.

Capítulo 4 - Método 2: Combinación de color y relaciones geométricas

4.1 – Consideraciones preliminares

Como se ha comentado previamente, el diseño y la metodología desarrollada en el capítulo previo entraña dificultades intrínsecas respecto al reconocimiento mediante las técnicas de visión por computador propuestas. En efecto, dado que el UAV opera en entornos de exterior, donde las condiciones de iluminación son altamente cambiantes, apareciendo brillos o cambios bruscos de tonalidades, aumentan las situaciones en que se originan reconocimientos erróneos o incluso la falta de reconocimiento. De hecho, en la propia figura 3-2, puede verse cómo la tonalidad negra en (a) cambia a azul en (b) como consecuencia de los efectos derivados de la captura. Además, debido a esos cambios adversos de iluminación y brillos, a veces determinadas zonas negras u oscuras aparecen blancas, por lo que el reconocimiento se complica en demasía.

Por otra parte, el enfoque propuesto en este segundo método, basado en la combinación de color y relaciones geométricas, aborda de forma satisfactoria las deficiencias observadas en la descripción del estado del arte detallado en el capítulo dos.

Éstas son las razones principales que motivan y sustentan el planteamiento del método 2, cuya finalidad es el diseño de una plataforma dotada de la mayor robustez posible, desde el punto de vista de su reconocimiento mediante la aplicación de técnicas específicas de procesamiento de imágenes, para efectuar su posterior reconocimiento en el ámbito de la visión por computador, a la vez que aborda la problemática existente en los entornos de exterior, no resueltos hasta el momento.

4.2 – Contribuciones

El desarrollo de este método 2 contempla las contribuciones específicas que se detallan a continuación:

- (a) Uso de información espectral basada en diferentes colores, con el fin de paliar en la medida de lo posible la saturación de intensidades de gris debido a la luz solar directa e indirecta, y la alta variabilidad en entornos al aire libre. Al tener una diversidad de colores, si un color se satura y no resulta visible, es posible que haya otro distinto que todavía pueda ser percibido, aumentando así la probabilidad de identificación respecto a cuando se utiliza un único color.
- (b) El diseño de la nueva plataforma tiene en cuenta la problemática inherente a la gestión de posibles regiones inexistentes. De esta manera, la nueva plataforma de aterrizaje puede ser reconocida incluso cuando solo se identifiquen la mitad de los marcadores, tres en este caso, y los tres que quedan solo se perciben parcialmente. Se entiende por un marcador, a cada una de las seis subfiguras que constituyen la plataforma de la figura 4-1. A partir de este instante, se usará indistintamente el término marcador y subfigura, por lo que harán alusión al mismo concepto.

- (c) Combinación de información espectral y geométrica bajo una estrategia combinada de *Toma de decisiones* que se basa en la combinación de un número de figuras detectadas por color y sus relaciones geométricas.
- (d) El reconocimiento puede llevarse a cabo en diferentes rangos de distancias y ángulos de inclinación entre el sistema de visión y la plataforma. De esta forma, se minimiza el impacto producido por tales configuraciones, las cuales producen distorsiones geométricas debido a la proyección en perspectiva, como sucedía en el método 1.

4.3 – Descripción de la plataforma y sus características

La nueva plataforma de aterrizaje, figura 4-1, contiene seis figuras de colores con formas específicas, denominados marcadores, siendo muy improbable su existencia, y menos en su conjunto en zonas naturales. Su identificación se realiza con las etiquetas que se indican para facilitar la descripción del proceso de identificación, a saber: LEB, LE, REB, RE, N y M. Estos marcadores están impresos en una superficie de papel A3 blanca. Cada figura se caracteriza por un color único y diferente, para facilitar así el procedimiento de detección de regiones, y abordar los problemas que ocurren cuando faltan algunas de dichas regiones.

El centro de masas (centroide) de la región azul (N) está ubicado en el centro de la plataforma. Éste es el punto donde los ocho triángulos rectángulos idénticos (marcados con líneas de puntos negros en la imagen inferior), convergen como resultado de dividir los cuadrados en partes iguales. Este patrón geométrico está diseñado para obtener la orientación del UAV con respecto a la imagen, y para tratar de simplificar las relaciones geométricas que serán necesarias para determinar el grado de reconocimiento.

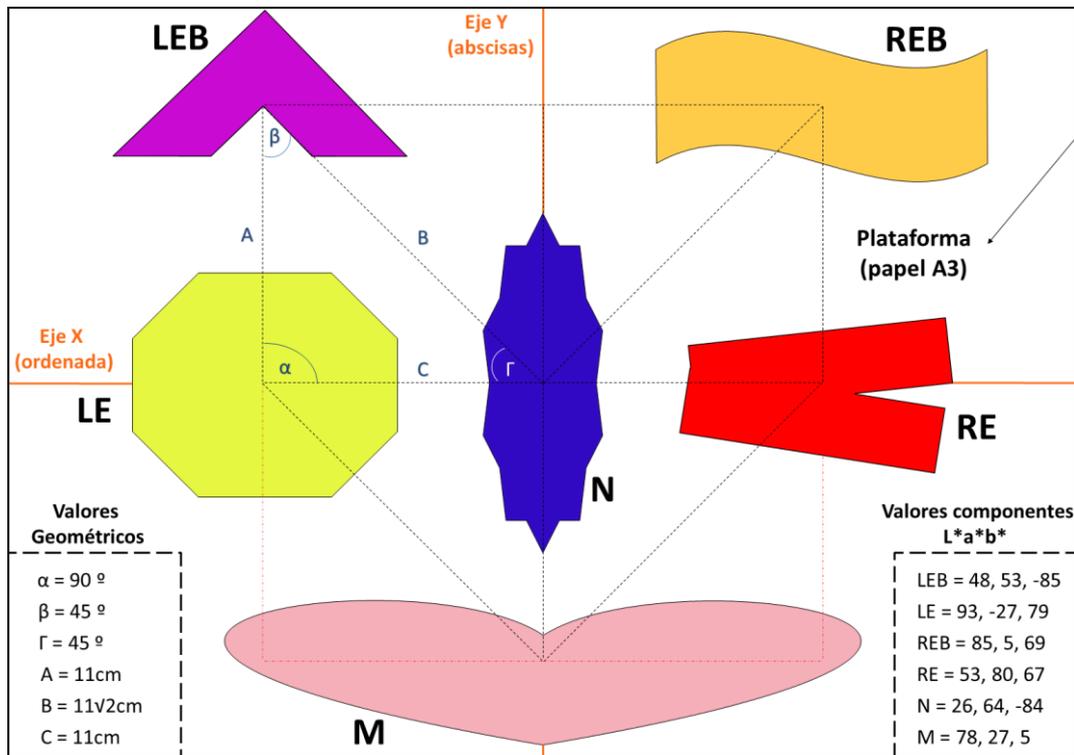


Figura 4-1 – Plataforma de aterrizaje con subfiguras y relaciones geométricas

Cuando se utilizan cámaras de captura operando en el espectro visible, y por tanto RGB, el color es un atributo excelente en el procesamiento de imágenes [83]. Por consiguiente, el uso de colores en la plataforma resulta esencial porque proporciona dos ventajas importantes. Por un lado, al usar colores diferentes, se aumenta la probabilidad de tener más regiones visibles: si algún color (región) no es claramente detectable, todavía existen otros con posibilidad de ser percibidos y reconocidos adecuadamente, incluso si la plataforma es parcialmente visible.

Además, el uso de un color diferente para cada marcador permite que el sistema realice una clasificación adicional, que también es invariante a la distorsión en el plano como consecuencia de la orientación, la rotación, o el escalado. En este sentido, cabe reseñar, que al igual que sucedía en el método 1, esta distorsión también se ve afectada profundamente por la proyección de perspectiva con la que se genera la imagen a partir de la escena, según sea el ángulo de inclinación con respecto a la horizontal.

4.4 – Estrategia propuesta

Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores, la estrategia propuesta se plantea bajo los siguientes aspectos:

- (1) Plataforma de aterrizaje compuesta por seis marcadores con colores únicos y bien diferenciados en lo que respecta al espacio de color utilizado, figura 4-1, CIELAB, que ha resultado el más eficiente.
- (2) Combinación de enfoques de identificación de color y descriptores de forma basados en los momentos Hu [84], que son invariantes a traslaciones, rotaciones y cambios de escala.
- (3) Proceso de reconocimiento que combina los colores y las formas de las figuras aisladas, así como sus relaciones geométricas basadas en una estrategia específica de Toma de Decisiones [85].
- (4) Aplicación de un procedimiento de Análisis Geométrico de Distancia Euclídea (EDGA), que en definitiva determina la posibilidad de que las regiones candidatas adquieran la categoría de marcadores, descrito con detalle en el apartado 4.4.4.2 de este mismo capítulo.

4.4.1 – Arquitectura

La estrategia propuesta sigue la arquitectura mostrada en la figura 4-2, basada en el razonamiento humano de acuerdo con el procedimiento estándar de segmentación de imágenes: preprocesamiento, extracción de características y reconocimiento.

Finalmente, el grado de reconocimiento de la plataforma se obtiene como resultado del análisis de los colores de los marcadores y sus relaciones geométricas, en ambos casos conocidos en la realidad y esperados en la imagen.

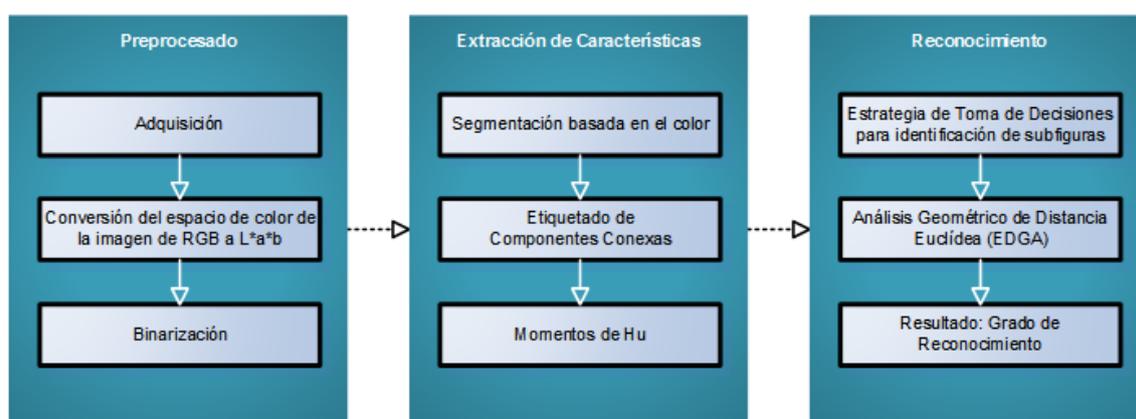


Figura 4-2 – Diseño y arquitectura del método 2 basado en el color y relaciones geométricas

Los procesos que aparecen en la figura 4-1 constituyen la base del planteamiento general, dividiéndose en tres grandes bloques: procesado, extracción de características y reconocimiento, los cuales se analizan con más detalle en las secciones 4.4.2, 4.4.3 y 4.4.4 respectivamente. La clave de los mismos se focaliza en los dos aspectos siguientes:

- (1) Cálculo de los momentos de Hu [84], que permiten la obtención de descriptores robustos por su invariancia para tratar las distorsiones de las regiones como consecuencia de la proyección en perspectiva de la imagen y las inclinaciones del dispositivo de captura respecto de la cámara.
- (2) Un nuevo método de toma de decisiones (EDGA) que combina color $L^*a^*b^*$ * con descriptores obtenidos por los momentos de Hu. Esto evita las complejidades que aparecen en la figura 4-3.

4.4.2 – Preprocesado

Adquisición: la hipótesis que se plantea, en lo que respecta a la captura de las imágenes, se basa en el hecho de que, durante la fase de aterrizaje, el UAV toma una imagen de la plataforma con la cámara digital del teléfono móvil (*Samsung Galaxy S6*) que lleva a bordo. La imagen es adquirida en el espacio de color RGB.

Espacios de color: en todos los casos, la imagen RGB se transforma al espacio de color *CIE 1976 L * a * b ** [44]. Este espacio de color contiene la luminosidad como un componente separado, lo que minimiza en gran medida el impacto producido por las reflexiones de la luz, ya que tal componente no se utiliza durante el reconocimiento. En este sentido, el uso del espacio de color CIELAB se justifica por medio de las siguientes consideraciones técnicas:

- (a) Pertenece a la categoría de espacios de color uniformes, donde los cambios en las coordenadas de color se corresponden con cambios similares o idénticos en lo que respecta a los tonos de colores visibles o a la saturación [83].
- (b) Es independiente del dispositivo y ha sido suficientemente probado para tratar con valores de componentes espectrales similares. Esto ocurre en condiciones de iluminación adversas, como las que se encuentran en

ambientes al aire libre, donde los altos niveles de iluminación conducen a la saturación con bajo contraste de colores.

Binarización: este proceso consiste en obtener una imagen binaria pura, es decir, en blanco y negro, a partir de la imagen RGB original que ha sido transformada al espacio de color CIELAB en el paso anterior. En este método, la binarización se realiza por tanto usando la imagen ya transformada al espacio de color CIELAB mediante la aplicación del *algoritmo 1* que se describe en el apartado siguiente.

4.4.3 – Extracción de características

El objetivo de esta etapa es identificar en la imagen el grupo de regiones de interés (segmentación), junto con sus propiedades topológicas. Las regiones obtenidas se utilizan en la etapa de reconocimiento para hacer coincidir una sola región con cada marcador definido en la figura 4-1. Por lo tanto, todas estas regiones que surgen del proceso de segmentación se usarán como *regiones candidatas* a marcadores.

- (1) *Segmentación basada en el color*: descrita formalmente en el *algoritmo 1*, y basada en el espacio de color CIELAB seleccionado [86] con segmentación en primer plano [87] (*foreground*):

Algoritmo 1. Segmentación de la imagen por color. Extracción del primer plano.

Input: I_{RGB} imagen.

Output: I_{binary} imagen (1: foreground, 0: background).

Convertir imagen RGB al espacio de color $L^*a^*b^*$ para obtener los canales L^* (I_L), a^* (I_a) y b^* (I_b)

Seleccionar TI_a , TI_b y TI para cada región (LEB, LE, REB, RE, N, M) de acuerdo con los valores de la tabla 4-1, y para cada pixel ubicado en (x,y) hacer:

$$d_a = I_a(x,y) - TI_a; d_b = I_b(x,y) - TI_b; d = \sqrt{d_a^2 + d_b^2}$$

if $((d < TI) \text{ and } (d_a < TI) \text{ and } (d_b < TI)) \text{ or } (I_{binary}(x, y) == 1)$ **then**

$$I_{binary}(x, y) = 1; \text{ else } I_{binary}(x, y) = 0$$

end

end

Operación morfológica de apertura [88] en I_{binary} para eliminar regiones espurias y píxeles aislados

return I_{binary}

El *algoritmo 1* devuelve una imagen binaria que es utilizada durante el proceso de etiquetado de componentes conexas descrito en el punto 2 de este mismo apartado. Tanto el umbral (TI), como los valores estimados (TI_a , TI_b) utilizados para la detección de cada marcador aparecen en la tabla 4-1. Dichos valores, que son promediados, se han determinado a través de un proceso de entrenamiento supervisado basado en un clasificador *Naïve Bayes* mediante el uso de 40 imágenes obtenidas a diferentes distancias y ángulos de inclinación de la cámara con respecto a la plataforma, y bajo diversas condiciones ambientales de iluminación, a saber: nublado, soleado, sol y sombra, luz artificial. En este aspecto, también se consideraron diferentes rotaciones y escalas con respecto al UAV para dar soporte a una mayor heterogeneidad de imágenes.

La tabla 4-1 contiene por tanto los valores numéricos usados en el proceso de segmentación que se lleva a cabo en el *algoritmo 1* a fin de generar la imagen binaria a partir de la imagen en color que fue transformada con anterioridad al espacio de color CIELAB. Los valores numéricos de la tabla 4-1 son diferentes para cada marcador, puesto que cada uno está definido con un color diferente y único. Así, de este modo, cada fila contiene los valores asociados a cada marcador con relación a las componentes a^* y b^* del espacio de color CIELAB que aparecen reflejadas en sus respectivas columnas, es decir TI_a y TI_b . La componente L^* no

está en la tabla porque representa la luminosidad, que no se utiliza durante el reconocimiento. Por último, la columna TI indica el umbral que aporta flexibilidad durante el proceso de segmentación.

Marcador (r)	a^* (TI_a)	b^* (TI_b)	Threshold (TI)
LEB	45.0	-35.0	23.0
LE	-16.0	33.5	23.6
REB	-3.0	30.68	23.6
RE	48.0	6.0	28.0
N	15.0	-42.0	26.0
M	22.6	-6	19.8

Tabla 4-1 – Valores numéricos CIELAB y umbral para llevar a cabo la segmentación por color

El valor numérico para las componentes a^* y b^* de cada marcador (r), es decir, la determinación de los valores relativos a las columnas TI_a y TI_b , se llevó a cabo mediante el uso de 40 imágenes de entrenamiento, por lo que los valores surgen del promedio de los 40 marcadores con relación a los valores de los colores de sus píxeles. En lo que se refiere al umbral, TI , se determinó con las mismas imágenes mediante un proceso de ajuste fino basado en un método heurístico de ensayo y error. Concretamente, se iban probando diferentes valores de umbral TI , al mismo tiempo que se observaba el resultado final del proceso de segmentación. El objetivo es obtener los mejores valores para el total de las 40 imágenes que forman el conjunto de entrenamiento.

- (2) *Etiquetado de componentes conexas*: basado en vncidad-8 [80, 81], para cada región binaria se obtienen cuatro propiedades (área, centroide, orientación y cuadro delimitador o *bounding box*).
- (3) *Momentos de Hu*: para cada región binaria se determinan cada uno de los siete momentos invariantes de Hu [89]. Al igual que antes, se usa el enfoque de entrenamiento supervisado basado en el clasificador *Naïve Bayes* con las mismas 40 imágenes, con el fin de calcular los valores promediados para cada momento y para cada marcador. Dichos valores se muestran en la tabla 4-2.

Figura (r)	Φ_1	Φ_2	Φ_3	Φ_4	Φ_5	Φ_6	Φ_7
LEB	-1.2837	-3.7150	4.3979	-6.8821	-12.8082	-8.9511	-13.4887
LE	-1.8081	-7.1000	-14.7351	-18.2484	-35.1690	-22.4804	-35.5544
REB	-1.2838	-3.0417	-12.3622	-14.6235	-28.6950	-16.8482	-28.3050
RE	-1.5137	-4.0205	-7.0933	-10.0107	-18.5817	-12.0440	-20.6703
N	-1.4001	-3.3519	-15.0324	-16.3327	-32.0414	-18.1191	-33.5053
M	-0.8704	-2.1921	-5.3414	-7.5967	-14.8185	-8.7103	-15.2624

Tabla 4-2 – Promedio de valores numéricos para los siete momentos de Hu por marcador

4.4.4 – Reconocimiento

En base a las propiedades de las regiones binarias obtenidas con anterioridad. El objetivo es identificar cada marcador de forma unívoca ($r = \text{LEB, LE, REB, RE, N y M}$).

4.4.4.1 – Identificación individual de los marcadores

Usando una combinación de las propiedades relativas al espacio CIELAB (color) y a los momentos de Hu (forma), se lleva a cabo la identificación de cada marcador comparando las regiones candidatas a marcador (regiones binarias), con los valores proporcionados en las tablas 4-1 y 4-2. De esta manera, a cada región binaria (figura candidata a marcador) se le asigna la etiqueta que posea una mayor similitud, según el criterio de distancia (euclidiana) [90] mínima.

Las distorsiones de color y forma aparecen frecuentemente debido a condiciones ambientales adversas en entornos de exterior, lo que conduce a fallos durante el proceso de identificación de los marcadores. Con el objetivo de minimizar estas clasificaciones erróneas frecuentes, las propiedades de color y forma se combinan, teniendo en cuenta los colores (tabla 4-1), y las formas (tabla 4-2) esperadas. Se determinan entonces los valores de similitud/desemejanza, utilizando para ello un proceso de toma de decisiones que se define de la siguiente manera:

1. Para cada región binaria que tenga un área comprendida en el rango de los 50 - 80000 píxeles, se calculan los valores espectrales medios \bar{c}_a y \bar{c}_b para los canales **a** * y **b** *, respectivamente, y los siete momentos de Hu (Hu).
2. Se calcula la distancia espectral D_C , usando los valores de referencia $TI_a(r)$ y $TI_b(r)$ para cada figura según los valores de la tabla 4-1, como sigue:

$$Dc_a(r) = |\bar{c}_a - TI_a(r)|; \quad Dc_b(r) = |\bar{c}_b - TI_b(r)| \quad (4.1)$$

$$Dc(r) = \sqrt{(Dc_a(r))^2 + (Dc_b(r))^2}$$

Las regiones candidatas deben cumplir con las siguientes restricciones:

$$Dc_a(r) < Tl(r); \quad Dc_b(r) < Tl(r); \quad Dc(r) < Tl(r) \quad (4.2)$$

3. Se halla la distancia en función a la forma D_{Hu} , usando los valores de referencia para los momentos de Hu para cada región, (r) (según los valores de la tabla 4-2), del siguiente modo:

$$DHu(r) = \sqrt{\sum_{i=1}^7 (Hu - \phi_i(r))^2} \quad (4.3)$$

4. Por último, se obtiene la distancia total $D(r)$ para cada región binaria candidata con respecto a cada marcador r , tal y como se muestra en la siguiente ecuación:

$$D(r) = \left(\frac{\left(\frac{Dc_a(r)}{\max(Dc_a(r))} \right) + \left(\frac{Dc_b(r)}{\max(Dc_b(r))} \right)}{2} \right) + \left(\frac{DHu(r)}{\max(DHu(r))} \right) \quad (4.4)$$

El valor mínimo $D(r)$ con respecto a r , permite la clasificación de la región binaria candidata desconocida con uno de los posibles marcadores que forman parte del dibujo de la plataforma de aproximación, es decir, $r = \{\text{LEB}, \text{LE}, \text{REB}, \text{RE}, \text{N}, \text{M}\}$.

Se pone de manifiesto, que cada marcador tendrá ninguna, una o varias regiones candidatas asociadas. Si no hay alguna, quiere decir, que un candidato dado no ha podido ser detectado. Cuando existen varias regiones, la región con el valor $D(r)$ más bajo se asignará finalmente al marcador r , ya que una distancia más pequeña significa una mayor similitud. Considérese el siguiente ejemplo pedagógico para una mejor comprensión: LEB: {1, 2, 3}; LE: {10, 11}; REB: {22, 23, 24, 25}; RE: {37, 38, 39}; N: {}; M: {45}.

Los números en rojo hacen alusión a regiones candidatas con el mínimo valor $D(r)$ con respecto a r para cada marcador. De este modo, el marcador LEB tiene las regiones candidatas {1, 2, 3}, LE tiene las regiones candidatas {10, 11}, el marcador N no pudo ser detectado, y así sucesivamente. Por consiguiente, para este ejemplo, el grupo base (G_B) de regiones obtenidas es $G_B = \{\text{LEB}: 1, \text{LE}: 10, \text{REB}: 22, \text{RE}: 37, \text{M}: 45\}$. Nótese que el marcador N no aparece porque para este ejemplo no ha logrado ser detectado. Bajo esta consideración, el número total de elementos agrupados para este ejemplo es tM , con $tM = 5$.

4.4.4.2 – Análisis geométrico de distancia euclídea (EDGA)

Una vez que las regiones ya han sido identificadas, y por tanto asignadas a los marcadores, se crean grupos de regiones candidatas. El objetivo consiste en determinar coherencias en el grupo que sean compatibles con la figura completa dibujada sobre la plataforma de aproximación. Esto se lleva a cabo calculando las compatibilidades entre los centroides de las regiones agrupadas, de acuerdo con la agrupación de marcadores que existe en la plataforma real impresa. Las distancias geométricas entre los centroides se obtienen para llevar a cabo la comparación. Este enfoque supone que la plataforma está compuesta por un grupo de marcadores:

1. *Grupos de regiones/marcadores*: los grupos se generan usando todas las regiones candidatas que teóricamente pueden formar parte de un grupo, bajo las siguientes reglas que se indican a continuación:
 - a. El número de elementos que componen cada grupo será siempre el mismo y debe coincidir con las figuras totales, tM . No existe un límite inferior con respecto al valor de tM para la construcción de grupos, pero el valor máximo es 6.
 - b. Por lo menos, un número de miembros determinado por la siguiente expresión: $(tM/2) + 1$ debe coincidir con los miembros del grupo base, es decir, G_B . Por lo tanto, cada grupo debe contener al menos, $(tM/2) + 1$ regiones que tengan el mínimo valor de $D(r)$ con relación a su respectivo marcador. De este modo se generan tantos grupos como permutaciones puedan ser obtenidas con las regiones ya etiquetadas como marcadores específicos, es decir, $(tM/2) - 1$ regiones no coinciden con los elementos en G_B . Si se vuelve a tomar consideración el ejemplo anterior, cada grupo debe poseer al menos 3 miembros que pertenezcan a G_B , y se hacen las

permutaciones para el resto. Algunos grupos válidos serán los que se indican a continuación:

$$G_1 = \{\text{LEB: 1, LE: 10, REB: 22, RE: 38, M: 45}\}$$

$$G_2 = \{\text{LEB: 1, LE: 10, REB: 22, RE: 39, M: 45}\}$$

$$G_3 = \{\text{LEB: 2, LE: 11, REB: 22, RE: 37, M: 45}\}$$

$$G_4 = \{\text{LEB: 2, LE: 10, REB: 23, RE: 37, M: 45}\}$$

El color negro indica las regiones candidatas que coinciden con G_B , mientras que el color rojo hace alusión a las regiones candidatas que se permutan porque no forman parte del grupo base G_B , pero están etiquetadas como marcadores específicos.

- c. Una región candidata debe pertenecer únicamente a un marcador. El grupo no debe contener regiones repetidas.
2. Se calculan y suman todas las distancias euclídeas (distancia total) entre los centroides (de dos en dos) de todas las regiones que pertenecen a cada grupo.
3. El grupo con la distancia total mínima se elige finalmente como el candidato más probable, cuyas regiones representarán los marcadores que forman parte de la plataforma.
4. Una vez que el grupo más probable (G_C) ha sido determinado, se lleva a cabo una reasignación de regiones, si es que los miembros G_C son distintos a los miembros de G_B . El número máximo de reasignaciones viene determinado por la siguiente expresión: $(tM/2) - 1$. Todas las regiones con discrepancias entre G_B con respecto a G_C se reemplazan por los de este último grupo.

Siguiendo con el ejemplo didáctico anterior, si G_C es $G_2 = \{\text{LEB: 1, LE: 10, REB: 22, RE: 39, M: 45}\}$, y considerando que $G_B = \{\text{LEB: 1, LE: 10, REB: 22, RE: 37, M: 45}\}$, la región correspondiente con el marcador RE es reasignada, cambiando de 37 a 39.

Este enfoque basado en EDGA mejora en gran medida la precisión del proceso de reconocimiento y, por ende, la determinación de la puntuación con relación al grado de reconocimiento. Funciona correctamente incluso en situaciones muy adversas. De hecho, siguiendo con las explicaciones pedagógicas, EDGA puede reconocer correctamente los grupos de marcadores, incluso cuando hay regiones con colores y formas prácticamente idénticas.

Esto último se demuestra en la figura 4-3, en donde una puerta de cristal muy próxima a la plataforma provoca reflejos sobre dicho cristal haciendo que varias figuras se encuentren duplicadas. Es decir, tenemos regiones “reales”, y otras que no lo son. Sin embargo, el algoritmo es capaz de identificar la imagen correcta y rechazar las regiones que nacen de los reflejos en el cristal. En este sentido, cabe reseñar, que este tipo de situaciones podrían producirse por reflejo en entornos acuáticos, donde tal vez aparezca reflejada la plataforma en el agua, aunque en primera instancia pueda resultar en cierto modo improbable.

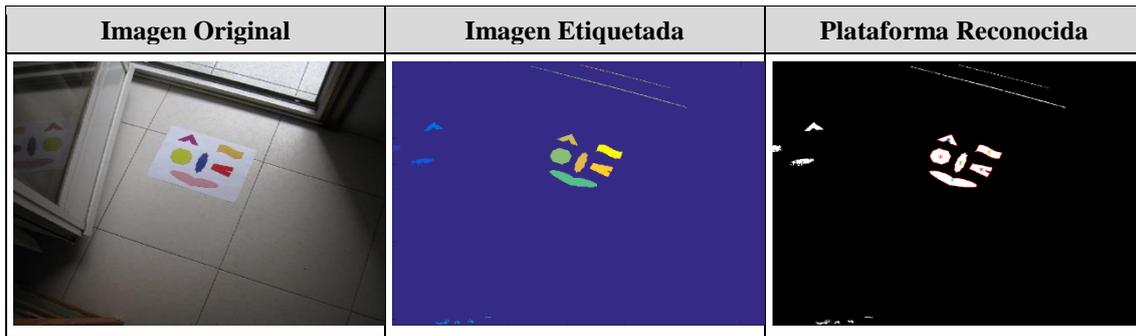


Figura 4-3 – Ejemplo ilustrativo para resolver problemas, incluso con reflexiones especulares

En el ejemplo de la figura 4-3, las regiones LEB y M aparecen dos veces debido a la reflexión en el cristal de la puerta. Sin EDGA, el reconocimiento habría detectado cinco regiones correctamente, pero habría fallado en el marcador LER, puesto que hubiera detectado el reflejado, que aparece más a la izquierda. Sin embargo, después de aplicar este proceso, todos los elementos del grupo coinciden con los marcadores. Por lo tanto, la región relacionada con el marcador LEB se ha reasignado al número de región establecido en el grupo EDGA. Sin este paso, el reconocimiento se habría realizado con un porcentaje del 80%, en lugar del 100%.

Este ejemplo, más ilustrativo que probable, muestra su utilidad. Sin embargo, su gran alcance de aplicación se produce cuando se generan cientos de regiones candidatas, figura 4-5a, y algunas de ellas tienen coincidencias con los marcadores, de modo que son visibles parcialmente o están muy distorsionadas. Aquí, el enfoque EDGA garantiza que estas regiones, que debido a su gran similitud ya no pueden discernirse, estén asignadas correctamente. Téngase en cuenta, que los colores de las regiones que se muestran en la imagen de la columna “*Imagen Etiquetada*” con relación a la figura 4-3, son solo para fines de visualización y no se corresponden con los colores reales de los marcadores.

4.4.5 – Cálculo del grado de reconocimiento

El objetivo de esta etapa es obtener una puntuación en el rango [0,1] que indique cuantitativamente el grado de reconocimiento de la plataforma de aterrizaje de forma global, considerando para ello todos los elementos individuales y grupales existentes en dicha plataforma. Por lo tanto, se ha de determinar si el número total de marcadores y sus características/relaciones geométricas son similares a los valores esperados.

4.4.5.1 – Descriptores métricos

En la etapa de reconocimiento, se llevan a cabo una serie de análisis basados en descriptores métricos que sirven para establecer las relaciones geométricas entre los marcadores que se muestran en la figura 4-1. Se usan los siguientes descriptores: área, distancias entre centroides y ángulos entre las líneas rectas que conectan los centroides con respecto a la base de la imagen, es decir, la línea horizontal inferior de la imagen. Tanto las áreas como las distancias se ven muy afectadas por la resolución de la imagen, así como por las diferentes distancias existentes desde el objetivo de la cámara hasta el centro de la plataforma de aproximación.

Por lo tanto, en lugar de realizar el análisis utilizando solo valores absolutos, se establecen valores relativos entre las figuras mediante el uso de una técnica análoga a la de los Análisis Parciales Comparativos (APC) que ya fue usada con anterioridad en el método 1 basado en sistema experto [1]. Sin embargo, este nuevo enfoque se encuentra afinado, ya que el método de detección, que usa las medidas de similitud, debe considerar dos sucesos independientes basados en la independencia de la teoría de probabilidades.

En este sentido, el método considera todas las combinaciones posibles entre las regiones para garantizar que se tenga un número adecuado de medidas de similitud. De esta manera, se obtienen suficientes mediciones incluso si hay marcadores no detectados, tal y como sucede con el marcador N en el ejemplo pedagógico creado en la descripción del algoritmo de identificación individual de marcadores; es, por lo tanto, más robusto y preciso. Cada combinación genera una medida de similitud a partir de dos relaciones que se implementan por medio de dos inequaciones. Todas las relaciones se muestran en las tablas B1-B3 del Anexo II.

En estas relaciones, todos los valores numéricos se calculan usando la posición cenital con respecto a la plataforma, es decir, usando la misma perspectiva que aparece en la figura 4-1. Sin embargo, al igual que sucede en el *método 1*, se requiere de una cierta flexibilidad adicional para soportar distorsiones en los marcadores como consecuencia de la proyección de perspectiva con la que se obtiene la imagen. Esto se logra considerando tres umbrales ArT , DT , AgT , que se estimaron mediante un proceso de ajuste fino usando la batería de 40 imágenes de entrenamiento utilizadas para la elaboración de las tablas 4-1 y 4-2 que fueron tomadas con diferentes poses y distancias. Todos los valores de estos umbrales aparecen definidos en las tablas B1 a B3 respectivamente, que forman parte del Anexo II.

La tabla B1 muestra las relaciones de similitud para hacer la comparación del área entre las regiones, la tabla B2 establece las relaciones de las distancias entre los centroides de las regiones, y por último la tabla B3 compara la diferencia de los ángulos generados por la intersección de la línea recta que une el centro de las regiones con respecto a la horizontal eje-x de la imagen. Las tablas B1, B2 y B3, contienen por lo tanto todas las relaciones posibles que involucran áreas, distancias y ángulos respectivamente para el conjunto completo de marcadores con la flexibilidad indicada anteriormente en base a los tres umbrales. El hecho de obtener todas las relaciones posibles, combinando entre si los seis marcadores, se debe a que, en el caso de alguno de dichos marcadores falte (no se haya podido detectar, como el caso del marcador N en el ejemplo pedagógico anterior), todavía exista un número significativo de relaciones que permitan el reconocimiento.

Entonces, el número de medidas de similitud posibles cuando se detectan todos los marcadores es 15 para el área ($Ar_i, i = 1, \dots, 15$), 105 para las distancias comprendidas entre los centroides ($Dst_{j,j} = 1, \dots, 105$), y 105 para las diferencias entre los ángulos ($Ang_k, k = 1, \dots, 105$).

4.4.5.2 – Grado de reconocimiento

El grado de reconocimiento permite determinar una puntuación cuantificada en el rango $[0, 1]$ utilizando los marcadores. El grado de reconocimiento se podría asimilar con una medida de certidumbre asociada al evento de la existencia o no de la plataforma, y, por lo tanto, bajo este planteamiento, considerar dicho grado como una probabilidad,

término que se usará indistintamente de aquí en adelante para hacer alusión al grado de reconocimiento. En primer lugar, considera la relación entre los marcadores totales que podrían identificarse teniendo en cuenta el número total de marcadores. Este evento está representado por A , y se calcula como:

$$P(A) = \frac{tMR}{tM} \quad (4.5)$$

donde tMR es el total de marcadores totalmente reconocidos, y tM es el número total de marcadores posibles, es decir, el número total de marcadores existentes en la plataforma de aterrizaje, que supone un total de seis en el diseño propuesto.

Por otro lado, también se considera la correspondencia en el reconocimiento en función de las relaciones geométricas entre todas las regiones que forman parte del grupo candidato, G_C . Esta probabilidad se calcula aplicando las relaciones geométricas definidas en las inequaciones de las tablas B1 a B3 que forman parte del Anexo II. A este respecto, es necesario tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- (a) El número de relaciones posibles para cada propiedad (área, distancia, ángulos) se define según el número total de marcadores detectados. Siguiendo el ejemplo pedagógico anterior con respecto al grupo G_C donde falta el marcador N, se puede ver que dicho marcador está involucrado en cuatro relaciones en la tabla B1, por lo que el número de relaciones posibles en este caso es 10. Es 10 porque esas son las filas de la tabla B1 donde no aparece el marcador N, es decir, el conjunto basado en las siguientes filas: {Ar01, Ar02, Ar03, Ar05, Ar06, Ar07, Ar09, Ar10, Ar12, Ar14}.

Esto es también aplicable para el resto de las relaciones, es decir, 45 y 45 si se toma en consideración el mismo ejemplo, en lo que se refiere a las tablas B2 y B3 respectivamente, puesto que ése es el total de filas para cada tabla donde no aparece el marcador N. En base a esto, el número de relaciones posibles para cada grupo se identifica como aT_p (área), dT_p (distancia) y agT_p (ángulos).

- (b) El número de relaciones que se cumplen para cada propiedad entre todas las posibles, queda definido por aT_s (área), dT_s (distancia) y agT_s (ángulos). La probabilidad del evento B , bajo las consideraciones anteriores se define de la siguiente manera:

$$P(B_a) = \frac{aT_s}{aT_p}; \quad P(B_d) = \frac{dT_s}{dT_p}; \quad P(B_{ag}) = \frac{agT_s}{agT_p} \quad (4.6)$$

$$P(B) = \frac{P(B_a) + P(B_d) + P(B_{ag})}{3}$$

La probabilidad final de los eventos A y B se modela como la intersección bajo la suposición de que son dos eventos independientes, es decir, basados en la teoría de probabilidades [91]. Por lo tanto, la probabilidad total de detectar la plataforma de aterrizaje se corresponde con la siguiente expresión:

$$P_d = P(A \cap B) = P(A) \cdot P(B) \quad (4.7)$$

La suposición de independencia es suficiente para este enfoque, aunque los eventos podrían considerarse parcialmente dependientes, porque si falta un marcador, esto podría considerarse que afecta al evento A , y también afectaría en cierto modo al evento B debido a que se usa un número diferente de relaciones (ecuaciones). Inspirados en la teoría de conjuntos difusos [92], se ha modelado $P(A)$ y $P(B)$ como grados de pertenencia para combinarlos como t -norms y t -conorms para diferentes combinaciones, incluyendo sumas y productos drásticos, entre los que se incluyen los conocidos como de Einstein o Hamacher, por cierto, sin aparente mejora con respecto a los resultados proporcionados por la ecuación (4.7).

4.5 – Resultados

Para la fase de pruebas se han utilizado 800 imágenes, que han sido adquiridas siguiendo el mismo esquema de diseño de los experimentos realizados en el método 1 expuesto en el capítulo anterior. Por lo tanto, 80 de las 800 imágenes fueron capturadas usando una configuración idéntica en lo que se refiere a ángulos, distancias y condiciones de iluminación. Las otras 720 nuevas imágenes, utilizadas para la fase experimental, se capturaron bajo similares condiciones. Todas las pruebas se realizaron exactamente en el mismo entorno que las realizadas para el método 1.

Para este enfoque se decidió, por consiguiente, reproducir con gran similitud las condiciones adversas de adquisición que fueron detectadas en el método 1. Se propuso analizar nuevamente los parámetros usados en [1] (distancia, ángulo de inclinación y condiciones de iluminación) con el fin de comparar de la forma más objetiva posible, el rendimiento entre los métodos 1 y 2.

Desde el punto de vista comparativo, y con el fin de realizar las pruebas bajo unas condiciones análogas a las del método 1, se llevó a cabo el mismo proceso de supervisión para cada imagen, tal y como se describió en el capítulo tres. Por lo tanto, un resultado se considera exitoso cuando la supervisión visual del experto determina que hay al menos tres regiones identificadas en la imagen original, y que la línea de color rojo que delimita los perímetros de las regiones detectadas coincide con los marcadores que forman parte de la plataforma.

4.5.1 – Entorno de adquisición de imágenes

Todas las imágenes fueron adquiridas a través de varias sesiones de simulación de vuelo respecto del sistema de captura de imágenes, usando un teléfono móvil (Samsung Galaxy S6). Los experimentos llevados a cabo para probar el enfoque propuesto se realizaron de la siguiente manera:

1. Plataforma de aproximación. Los marcadores que se muestran en la figura 4-1 se imprimieron sobre un fondo blanco en un papel A3.
2. Todas las imágenes fueron adquiridas usando la cámara del dispositivo móvil Galaxy S6 (16MP, F / 1.9) en modo automático sin usar el zum óptico o digital.

3. Se adquirieron 800 imágenes en diferentes entornos y condiciones ambientales: distancias, inclinaciones y condiciones de iluminación (al aire libre: soleado, nublado, sol y sombra, interior: luz artificial).
4. Cada imagen fue tomada usando la siguiente configuración técnica: 3 bytes (24 bits) para profundidad de color; 1 byte (8 bits) por cada canal RGB; resolución de 4 MP con unas dimensiones de 2560×1944 píxeles; y JPEG como una compresión estándar.
5. El escenario de pruebas donde se llevó a cabo la simulación de vuelo es el patio de un edificio de un área residencial. Se usaron las ventanas de las escaleras de incendios para simular las diferentes alturas del vuelo.
6. Todas las imágenes adquiridas fueron descargadas y procesadas mediante el uso de un ordenador personal con el software MATLAB [77] R2018a y el toolbox correspondiente de *Image Processing*.

El objetivo de la fase de pruebas es determinar la robustez y la precisión del método propuesto bajo las tres diferentes condiciones siguientes: distancia entre el sistema de captura y la plataforma, ángulos de inclinación bajo diferentes perspectivas e iluminación.

Desde el punto de vista de la eficiencia computacional, se han considerado tres resoluciones internas para cada imagen, mediante el correspondiente escalado de la imagen original (2592×1944 píxeles) a resoluciones de 640×480, 1024×768 y 1707×1280 píxeles. La estrategia con respecto a estas resoluciones es como sigue.

Inicialmente se realiza un primer intento de reconocimiento usando la resolución más baja que se ha planteado, es decir, 640×480 píxeles. Si la identificación tiene éxito el proceso concluye; en caso contrario se hace un segundo intento de reconocimiento con la segunda resolución menos pesada, es decir, 1024×768. Si el reconocimiento tiene éxito, el proceso se detiene; en caso contrario, se hace un tercer intento con la tercera resolución planteada, esto es, 1707×1280 píxeles.

Si con esta tercera resolución el sistema tampoco ha tenido éxito, entonces se realiza un último intento de reconocimiento con la resolución nativa de la imagen original, es decir, sin escalar, usando 2592×1944 píxeles. Si tampoco se ha tenido éxito, entonces la imagen se da finalmente por no reconocida, y el reconocimiento tiene que llevarse a cabo nuevamente desde el inicio, pero con una imagen nueva y por lo tanto diferente.

4.5.2 – Pruebas relativas a la distancia

Se usaron ochocientas imágenes con distancias que variaban desde 0.6 m a 12 m entre la cámara y la plataforma de aproximación. Los resultados obtenidos se sintetizan en la figura 4-4, donde se establece una relación entre el porcentaje de efectividad, es decir, el grado de reconocimiento y las distancias en metros. Además, también se lleva a cabo una comparativa gráfica entre sendos métodos 1 [1] y 2. Conviene recordar que, aunque los dibujos de las plataformas son en ambos casos diferentes, el tamaño de la base de la plataforma sobre el que está impreso es idéntico, es decir un papel del tipo A3. Por

consiguiente, el hecho de usar plataformas de igual tamaño físico en ambos métodos garantiza que no se creen situaciones ventajosas que pudieran influir de algún modo en los resultados con relación a la distancia. En la figura 4-4a, los intervalos de distancia son excluyentes entre sí (es decir, 0-2, 2-4, 4-6, 6-8, y mayor que 8). Sin embargo, en la figura 4-4b, los intervalos de distancia son agregados (0 a 2, 0 a 4, 0 a 6, 0 a 8, y de 0 a más de 8). El nuevo enfoque logra, en promedio, un rendimiento aceptable y mejorado (95%) en comparación con la estrategia llevada a cabo en el método anterior [1], etiquetada como "Otros" en los gráficos. En general se observa que, a distancias más cortas, se consigue un mejor rendimiento, tal y como era de esperar.

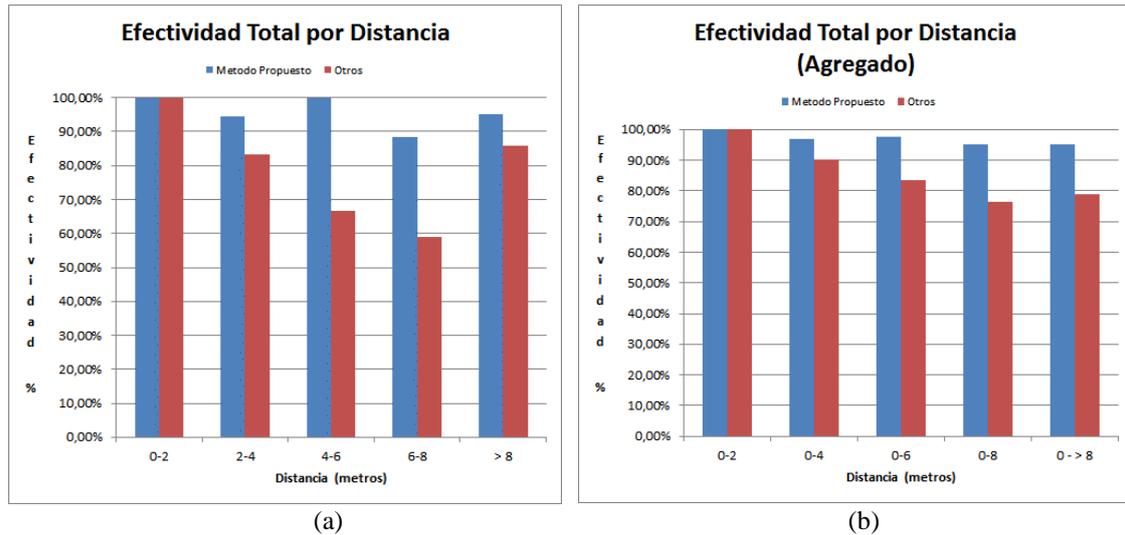


Figura 4-4 – Efectividad con relación a la distancia (m) para el método 2 y el método 1: (a) Intervalos exclusivos; (b) intervalos agregados (acumulativos)

Aunque la distancia tiene un impacto significativo en la efectividad, el método propuesto reconoce con éxito un número aceptable de imágenes de hasta 12 m, que resulta ser la distancia máxima que se ha utilizado en toda la fase experimental. Por consiguiente, el enfoque propuesto es más efectivo que el método 1 [1].

4.5.2.1 – Ejemplos ilustrativos con relación a la distancia

En la figura 4-5 se observan dos imágenes que demuestran la versatilidad del método propuesto en términos de la distancia. Ambas imágenes se obtuvieron bajo unas condiciones de iluminación similares, pero con distancias de 8.94 m, y 0.67 m, en A, y B, respectivamente. Para estas dos imágenes el reconocimiento se llevó a cabo con éxito, obteniéndose un grado de reconocimiento del 91.11% y 100%, respectivamente. Por contra, el método 1 falla en el reconocimiento para distancias superiores a 8 m.

A pesar de que en la imagen 4-5A la plataforma de aproximación se observa con cierta dificultad como consecuencia de la distancia a la que se ha tomado la imagen, si se amplía o se hace un pequeño esfuerzo visual, se puede observar como en el centro de la imagen situada debajo de la tercera columna "Plataforma Reconocida", aparecen unas líneas rojas que delimitan el perímetro de los marcadores de la plataforma. Por lo tanto, las líneas rojas se corresponden con marcadores, y no con otras regiones que no tienen nada que ver con la plataforma, sino con elementos del entorno donde está situada.

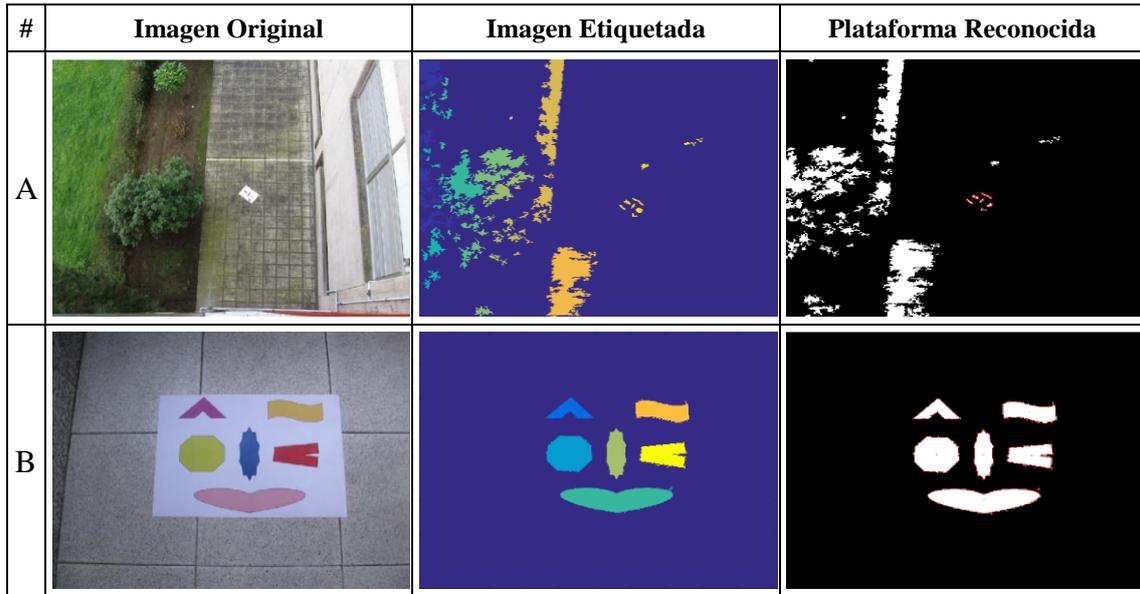


Figura 4-5 – Ejemplos ilustrativos con relación a distancias antagónicas bajo las mismas condiciones de iluminación: (A) a 8.94 m; (B) a 0.67 m

4.5.3 – Pruebas relativas al ángulo de inclinación

Se capturaron ochocientas imágenes, las mismas que antes, con unos ángulos de inclinación variando desde 1° a 68°, bajo las distancias descritas anteriormente. Este ángulo se define, en grados, entre una línea supuestamente perpendicular al suelo y la línea recta imaginaria que conecta el centro de la lente de la cámara con el centroide del marcador N (centro geométrico de la figura). Al igual que antes, los resultados se muestran gráficamente en la figura 4-6 que vincula el porcentaje de efectividad con la inclinación en grados para ambos métodos. En la figura 4-6a los intervalos son mutuamente excluyentes (es decir, 0-10, 10-20, 20-30, 30-40, y mayor que 40). Sin embargo, en la figura 4-6b, los intervalos aparecen agregados (de 0 a 10, de 0 a 20, de 0 a 30, de 0 a 40, y de más de 40). Nuevamente, los resultados muestran un desempeño aceptable para este enfoque (95%) que supera al del método 1. En general se logra un mejor rendimiento con ángulos de inclinación más bajos.

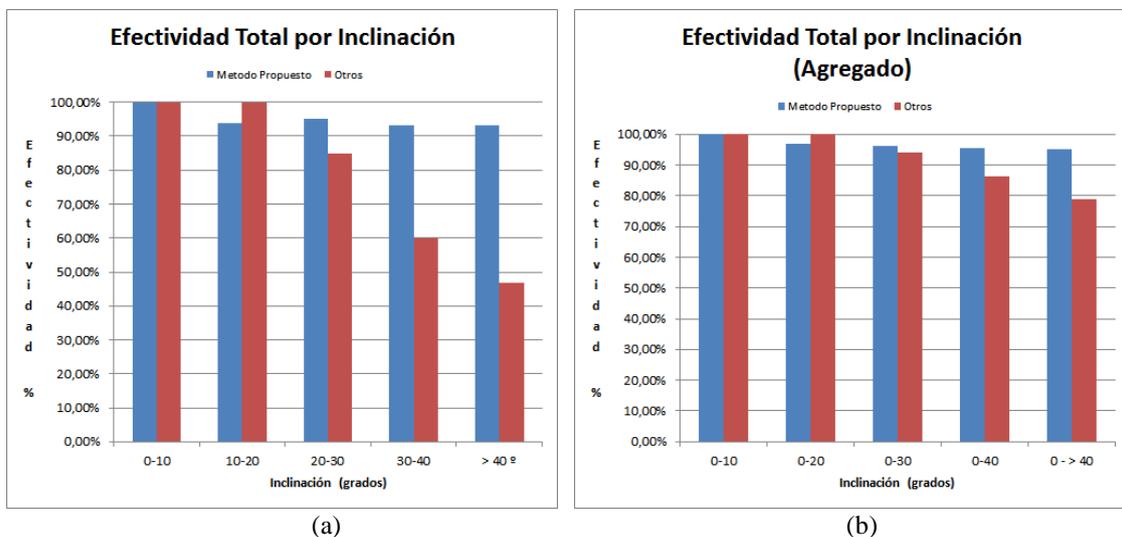


Figura 4-6 – Efectividad con relación al ángulo de inclinación (grados) para el método 2 y el método 1: (a) Intervalos exclusivos; (b) intervalos agregados (acumulativos)

4.5.3.1 – Ejemplos ilustrativos con relación al ángulo de inclinación

La figura 4-7 contiene dos imágenes ilustrativas diferentes que sirven para poner de manifiesto la versatilidad del método propuesto en términos de valores altos en lo que respecta al ángulo de inclinación (A: 59.78° y B: 61.17°), donde el efecto de la proyección en perspectiva de la imagen se percibe muy notablemente. En ambos casos, el enfoque propuesto reconoce con éxito la plataforma. Esto contrasta positivamente con el método 1, donde los experimentos fallaron con estos mismos ángulos. Los resultados expuestos a través de este ejemplo son representativos, puesto que tratan de ilustrar la mejora con respecto al *método 1*, en el que en ningún caso se llevó a cabo un reconocimiento exitoso más allá de los 56° de inclinación.

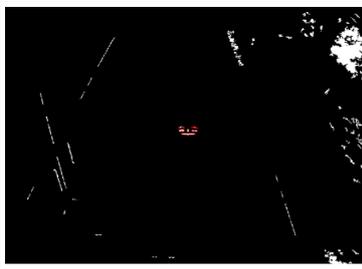
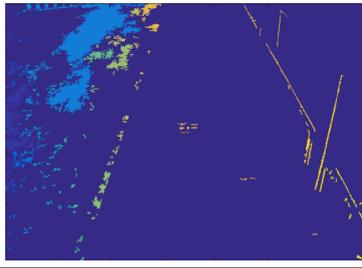
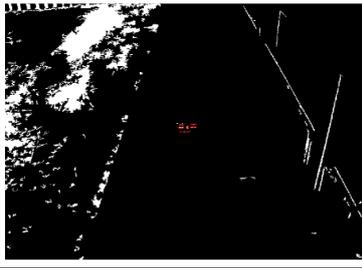
#	Imagen Original	Imagen Etiquetada	Plataforma Reconocida
A			
B			

Figura 4-7 – Ejemplos ilustrativos con relación a ángulos de inclinación elevados bajo las mismas condiciones de iluminación: (A) 59.78°; (B) 61.17°

4.5.4 – Pruebas relativas a las condiciones de iluminación

Se utilizaron las mismas ochocientas imágenes que antes, y por tanto tomadas en diversos días y bajo diferentes condiciones de iluminación diurna en ambientes al aire libre (soleado, nublado, sol y sombra), e interiores con iluminación artificial. La figura 4-8 muestra gráficamente los valores promedio sobre el número total de imágenes utilizadas para esta prueba.

En la imagen se ve con claridad, cómo este enfoque supera el método anterior en entornos al aire libre, pero con resultados similares en lo que respecta a los entornos de interior, puesto que en ambos casos se ha obtenido una efectividad del reconocimiento del 100%. Esto se debe a que en el entorno de interior el brillo es estable, lo que permite un contraste suficiente entre la figura negra y el fondo blanco de la plataforma, algo que sirve para compensar la contribución adicional que aportan las figuras coloreadas en los entornos exteriores.

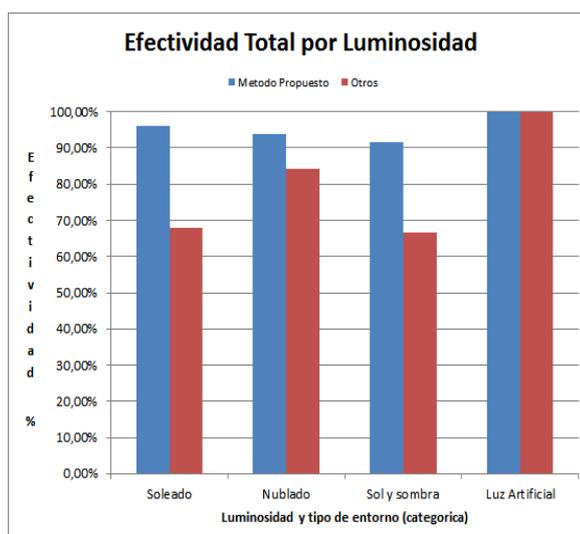


Figura 4-8 – Efectividad con relación a diferentes condiciones lumínicas

4.5.4.1 – Ejemplos ilustrativos con relación a condiciones lumínicas diversas

La figura 4-9 contiene dos imágenes ilustrativas que sirven para demostrar la versatilidad del método propuesto en términos de condiciones de iluminación. La imagen 4-9A fue adquirida en un entorno interior iluminado artificialmente, donde las reflexiones causadas por este tipo de luz y el alto ángulo de inclinación ocasionan un exceso de luminosidad que dificulta el reconocimiento de la plataforma de aterrizaje. Por contra, la imagen 4-9B, fue adquirida en un entorno exterior, aunque también se ha visto afectada por la reflexión causada por la intensidad de la luz solar.

En la figura 4-9A todos los marcadores de la plataforma fueron identificados de forma correcta, detectándose con un grado de reconocimiento del 83,49%. No se llega a obtener el 100%, porque el marcador M aparece parcialmente. Aunque en dicha imagen la plataforma de aproximación se observa con cierta dificultad, dada la distancia y el alto ángulo con el que fue tomada, si se amplía o se hace un esfuerzo visual, puede observarse cómo hacia el centro de la imagen situada debajo de la columna “*Plataforma Reconocida*”, aparecen unas líneas rojas que delimitan el perímetro de todas las regiones que sirven para representar los marcadores de la plataforma. Por tanto, tales líneas rojas simbolizan los límites de todos los marcadores de la plataforma, y no otras regiones ajenas a la misma que pertenecen a elementos del entorno donde está posada, y que surgen también como consecuencia del proceso de segmentación de la imagen.

La puntuación de reconocimiento más baja obtenida en la imagen B se debe a que el marcador M está ausente en su totalidad, y por lo tanto no pudo ser detectado. En la figura 4-9B, el marcador M no ha sido detectado, por lo que el máximo valor con respecto al grado de reconocimiento es el que se pueda realizar con sólo cinco marcadores, es decir, $5/6 \approx 83,33\%$. Aunque dicho marcador no pudo ser detectado, y el reconocimiento con los cinco restantes no fue del todo perfecto, la plataforma consiguió ser detectada de forma exitosa con una puntuación del 80,56%. Este tipo de comportamiento demuestra la solidez del método propuesto, incluso con marcadores totalmente desaparecidos, lo cual es una prueba bastante concluyente con relación a las nuevas mejoras que presenta este enfoque.

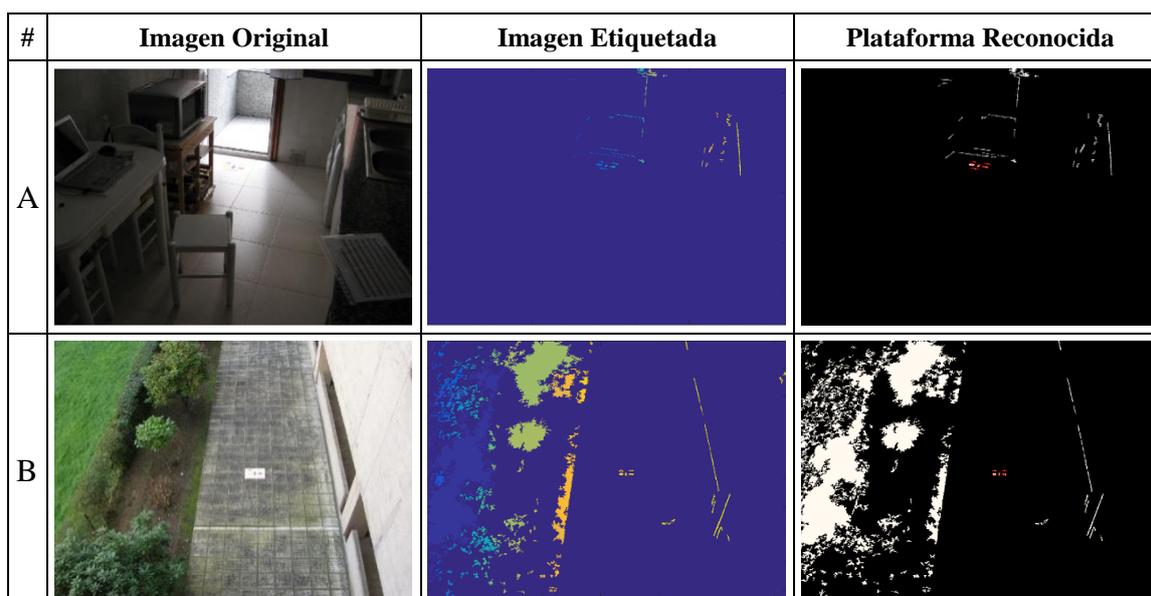


Figura 4-9 – Ejemplos ilustrativos bajo diferentes condiciones de iluminación entornos de interior (A) y exterior (B).

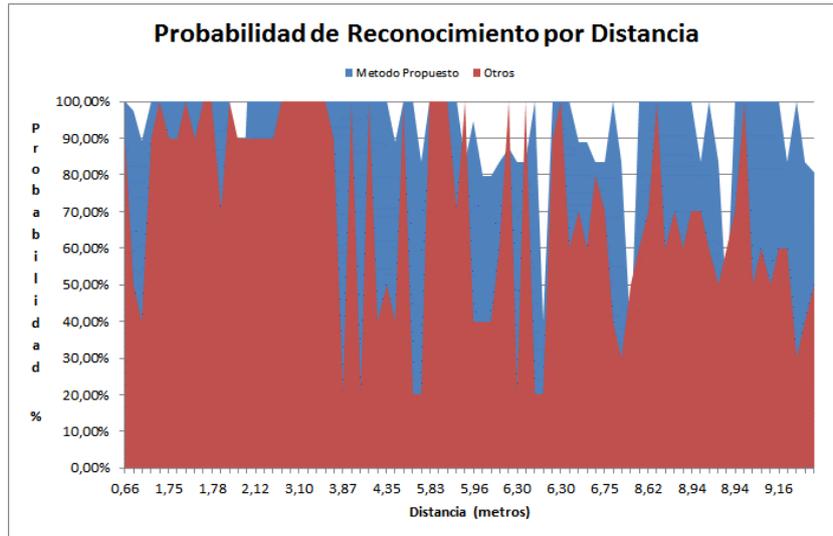
4.5.5 – Evaluación del resultado según el grado de reconocimiento

Tal y como se describe para el *método 1* en el apartado 3.5.5, es importante verificar la fiabilidad del método de reconocimiento desarrollado, es decir, es necesario evaluar el grado de reconocimiento en forma de resultado numérico que viene dado en el rango $[0, 1]$ para poder decidir qué nivel de credibilidad se le puede otorgar al resultado proporcionado por el método.

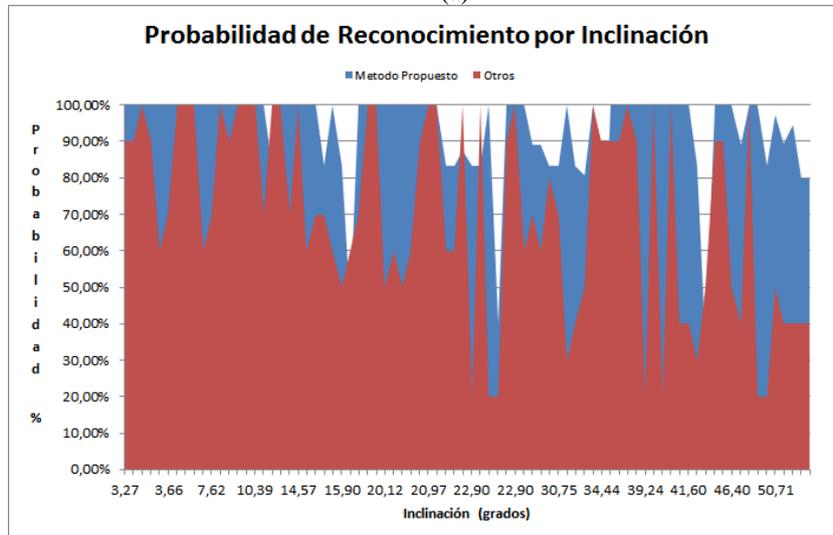
Para llevar a cabo este proceso, y, por tanto, realizar una evaluación del grado de reconocimiento, se efectuó una inspección visual supervisada de cada resultado para saber si el sistema de reconocimiento había detectado al menos tres regiones (marcadas en rojo), y que estas regiones coinciden con las figuras que realmente tienen que representar, es decir, los marcadores que forman parte de la plataforma. Es, por lo tanto, exactamente el mismo criterio que el utilizado en apartado 3.5.5 del capítulo anterior.

Además del estudio que se acaba de comentar, también se proporcionan detalles sobre las probabilidades de reconocimiento obtenidas de acuerdo con la ecuación (4.7) para diferentes distancias, ángulos y condiciones de iluminación, tal y como se llevó a cabo en el *método 1*. En este sentido, conviene reseñar, que aunque las imágenes no son exactamente las mismas para ambos métodos, puesto que las sesiones de simulación de vuelo en las que se tomaron dichas imágenes se realizaron en días diferentes, se ha tratado de que las condiciones de adquisición fuesen lo más similares posibles: mismo tamaño para la base de la proforma (papel A3), mismo entorno de pruebas; así como distancias, ángulos y condiciones de iluminación usadas en el método 1, tal y como se describen en el capítulo anterior.

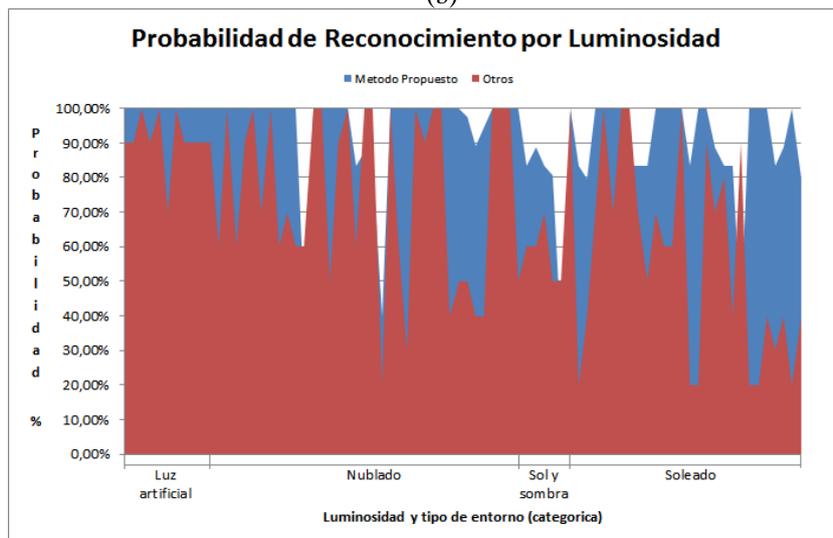
La comparativa reflejada en la figura 4-10, tiene en cuenta todos estos factores para conseguir la mayor objetividad posible, y a partir de ella se desprende que, para este método, la puntuación más baja con relación al grado de reconocimiento fue del 35%, mientras que el promedio asciende al 92,94%.



(a)



(b)



(c)

Figura 4-10 – Puntuación devuelta por el método de reconocimiento. (a) Puntuación por distancia. (b) Puntuación por ángulo de inclinación. (c) Puntuación según las condiciones de iluminación

Con el fin de valorar la fiabilidad del resultado expuesta como un valor numérico en el grado de reconocimiento, se muestra la gráfica 4-11, en la que aparece el porcentaje de aciertos existente por cada valor de resultado final obtenido. Tal y como se infiere a partir de dicha gráfica, la fiabilidad del método es elevada, puesto que todas las imágenes con un grado de reconocimiento mayor del 50% han sido detectadas correctamente. Por otro lado, aquellos valores donde no existe barra azul (0, 10, 20, 50, 60 y 70), indican que no han sido otorgados por el sistema, lo que permite afirmar, que el método 2 se comporta mucho mejor que el uno, puesto que su tasa de acierto es mucho mayor dado que el grueso de los valores devueltos por el sistema en forma de resultado final se sitúa entre el 80% y el 100%.

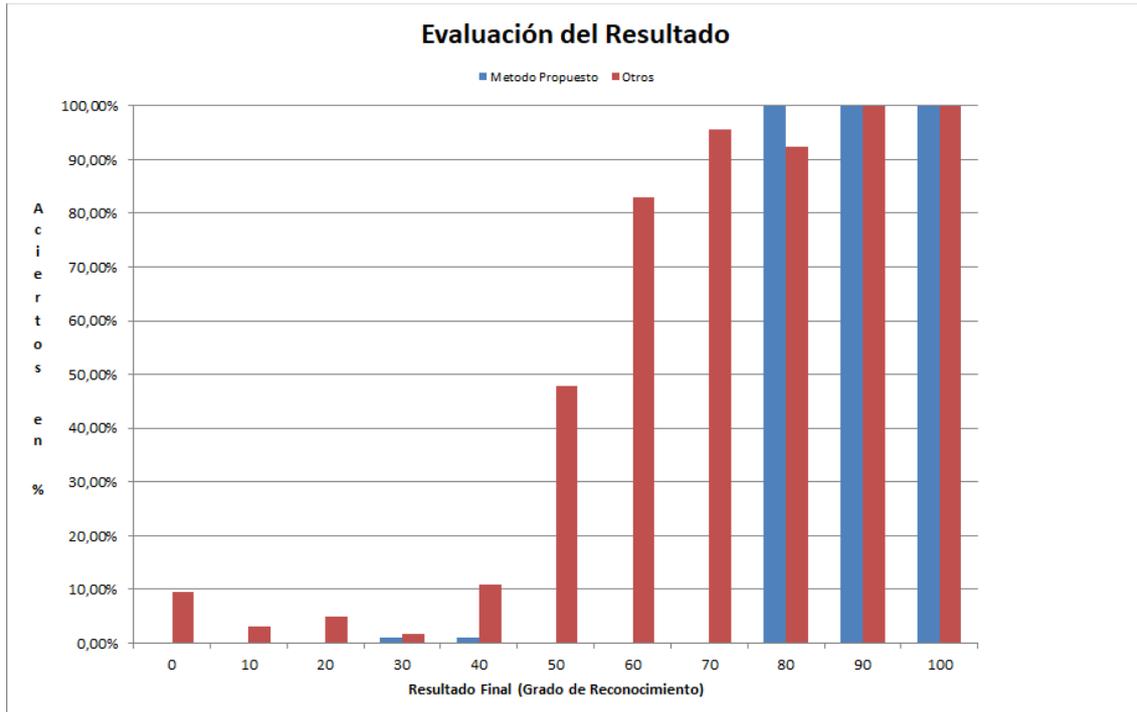


Figura 4-11 – Fiabilidad real del grado de reconocimiento devuelto por el método 2

Por consiguiente, como conclusión relativa al proceso de supervisión e inspección visual de los resultados comentados con anterioridad, se desprende que en todas aquellas imágenes en las que se obtiene un porcentaje inferior al 50%, se detectan dos figuras o menos, mientras que en aquellos resultados que tienen una puntuación superior al 50%, aparecen siempre tres figuras como mínimo correctamente identificadas.

Finalmente, a modo de resumen se puede inferir, como el resultado proporcionado por el método de reconocimiento es coherente con los criterios definidos en la inspección visual, lo que evidencia una correspondencia clara con la realidad. Además, también se ha observado, que aquellas imágenes que presentan determinados problemas relacionados con las condiciones de iluminación (áreas parcialmente visibles y grandes deformaciones en el plano como consecuencia de perspectivas inclinadas), presentan las puntuaciones más bajas. Cabe reseñar, que este comportamiento coincide con las imágenes que también obtuvieron unas puntuaciones más bajas en el *método 1*, tal y como se puede observar en la figura 4-10, dado que, en líneas generales, el área correspondiente a la silueta de picos azules y rojos de la gráfica tienen un perfil similar.

Capítulo 5 - Conclusiones y trabajo futuro

En la investigación desarrollada y plasmada en esta memoria de tesis se ha realizado una revisión general sobre el estado del arte con respecto a la problemática inherente al reconocimiento de una plataforma para aterrizaje de UAVs en imágenes captadas por un sistema de visión a bordo. Se ha analizado la problemática existente, y se ha dado solución al problema mediante el diseño y análisis de dos métodos que atienden a unas técnicas de visión por computador muy diferentes. El primer enfoque se basa en identificar una plataforma en blanco y negro patentada [2] mediante un enfoque basado exclusivamente en la similitud de regiones y en el estudio de las relaciones geométricas que se establecen entre ellas.

El método 1, basado en sistema experto [1], se comporta de forma apropiada cuando se obtienen imágenes a diferentes alturas, o a una altura determinada con distintos niveles de resolución de las imágenes. En un entorno real y operativo, lo importante es que el ángulo de inclinación y el porcentaje que ocupa el área de la figura respecto al tamaño total de ésta sea constante. Esto facilita en gran medida la asignación de umbrales para una resolución determinada que permite mantener el proceso de adquisición dentro de un entorno controlado.

A raíz del diseño que tiene la plataforma patentada [2], el entorno donde ésta se ubique puede ser determinante desde el punto de vista del reconocimiento, principalmente debido a factores tales como hojas que pueden dar lugar a elipses, árboles que generan zonas de sombra, o frutos naturales en el suelo que pueden llegar a tener formas elípticas o circulares. Se considera por lo tanto muy importante, que la plataforma de aproximación del UAV, se encuentre impresa en una superficie que sea lo más uniforme posible en lo que al color y las formas se refiere, asfalto, por ejemplo. Todas las pruebas e imágenes obtenidas han tomado como base un papel blanco de tamaño A3 sobre el que se ha impreso la figura de aproximación.

Con el fin de superar las limitaciones detectadas en el primer método, así como las observadas en los métodos ya existentes en la literatura, se desarrolló una nueva plataforma basada en figuras sencillas con colores y formas únicas. La técnica que permite su identificación es diferente, ya que se basa en el uso de descriptores y técnicas invariantes a las deformaciones producidas en el plano como consecuencia de las diversas perspectivas con las que una imagen puede ser obtenida. De este modo, el reconocimiento se realiza de una manera más robusta que representa los distintos escenarios que se pueden dar en el mundo real, pudiendo operar, por lo tanto, ante una amplia variedad de situaciones: múltiples distancias, ángulos de inclinación, diferentes tipos de condición de iluminación (soleado, nublado, sol y sombra, etc.), de escenarios (interiores, exteriores) y con marcadores inexistentes en la escena. Robustez y precisión, son, por lo tanto, las principales características que definen el método 2, y que supera en este ámbito al anterior.

El *método 2* ha demostrado ser notablemente más eficaz que el método 1 en términos de efectividad general, puesto que se obtiene una tasa de éxito, en lo que al reconocimiento se refiere, del 95%, mientras que el método 1, logra una efectividad del 78,75%, usándose para su valoración, los mismos parámetros y condiciones similares en la adquisición de imágenes: idéntico tamaño de plataforma (papel A3), idéntico entorno

de pruebas, similares distancias, ángulos y condiciones ambientales de iluminación. Todo ello de cara a reproducir similares situaciones.

Aunque la sensibilidad relativa al ángulo de inclinación que surge como consecuencia de las perspectivas podría llegar a ser un factor limitante en la explotación del método 2, las mejoras con respecto al *método 1* son evidentes. Mientras que el método 1 no es capaz de reconocer una imagen con éxito más allá de los 56° de inclinación, el método 2 reconoce imágenes de forma satisfactoria con un ángulo de inclinación de hasta 73°. Por lo tanto, esto lo hace susceptible de ser apto para operar con cualquier modelo de UAVs del tipo rotores con capacidad de despegue vertical.

También se ha demostrado que el proceso de reconocimiento propuesto en el método 2 se puede llevar a cabo con imágenes que presentan problemas de visualización de la plataforma, y, por ende, en el que uno o varios marcadores no estén presentes ya sea parcial o totalmente. En algunos casos extremos, donde la mitad de los marcadores (tres de seis) de la plataforma no aparecen en la imagen, bien por un fallo en el proceso de segmentación, o por verse parcialmente, el sistema logró perpetrar el reconocimiento ante estas condiciones con una puntuación del 50%, ya que los otros tres marcadores todavía pudieron ser identificados de manera apropiada.

Otra de las ventajas que presenta este segundo enfoque es que no hay que escoger entre dos opciones de umbralización como ocurre con el primer método [1], donde el sistema debe elegir entre el método de Otsu o el directo. La segmentación se basa en una umbralización por color. No obstante, a pesar de basarse en un método único, puede resultar necesario volver a determinar los valores relativos a los colores de los marcadores que aparecen recogidos en la tabla 4-1, en el caso en que el resultado de la impresión no se corresponda exactamente con los colores reales que se obtienen de aplicar dichos valores en el espacio de color CIELAB.

5.1– Líneas de actuación futura

Las líneas de actuación futura deben tratar de mejorar en la medida de lo posible la fiabilidad del segundo método [2]. Uno de los objetivos principales se basa en usar otros enfoques de reconocimiento adicionales, tal vez similares a los que se utilizan en el reconocimiento facial [93], pero aplicados al reconocimiento de la figura 4-1. En este sentido, cabe reseñar, que la función de detección de rostros que incorpora el móvil conectado al UAV, enmarcaba la plataforma dentro del recuadro que usa en la detección de rostros humanos. Esto quiere decir, que la plataforma en color usada en el segundo método, cuyo diseño atiende al de un rostro, ya es detectada por el sistema de detección facial del móvil. No obstante, para mejorar la efectividad en este aspecto que se acaba de comentar, puede que resulte necesario llevar a cabo modificaciones adicionales sobre el diseño del dibujo de la plataforma.

Por otro lado, dado que el objetivo de esta tesis consiste en reconocer un objeto específico (plataforma) en una imagen, puede resultar factible profundizar en el ámbito de las Redes Neuronales Convolucionales (CNN) del tipo R-CNN, teniendo en cuenta las mejoras ya propuestas en [39, 40]. Otra posible línea de actuación puede consistir en utilizar el *Deep Learning* mediante la aplicación de las redes neuronales profundas [94]. En este aspecto, se debe tener en cuenta el planteamiento llevado a cabo en el aterrizaje autónomo de un UAV propuesto en [95]. No obstante, tanto para la mejora basada en

detectores, como para las basadas en redes R-CNN y *Deep Learning*, se van a requerir profundos procesos de aprendizaje con cantidades ingentes de imágenes.

Además, dada la mejora evidente que se ha llevado a cabo en el reconocimiento con relación al ángulo de inclinación comentado previamente, se propone realizar un estudio acerca de la viabilidad de incorporar el sistema de reconocimiento del método 2 en UAVs de ala fija. En este sentido, cabe reseñar, que se deberían estudiar y analizar las características físicas para el aterrizaje de algún modelo de UAV de ala fija, y ver si sería viable su aplicación, teniendo en cuenta que, con la batería de pruebas realizadas en la fase experimental, el sistema de reconocimiento se ha comportado de forma estable con ángulos de inclinación de hasta los 73°. Si fuera necesario superar dicho límite, sería muy recomendable diseñar una nueva batería experimental que haga hincapié específicamente en ángulos superlativos.

En lo que atañe a las líneas de mejora relativas al método 1 [1], se proponen las siguientes líneas de actuación. Por un lado, implementar un algoritmo que establezca un vínculo entre los umbrales y el porcentaje que representa el área de la figura con relación al número total de píxeles que posee la imagen. Cuando la imagen proporciona un indicio de cercanía, es decir, el cociente entre el área de la figura y el área total de la imagen tiende a 1, se obtienen mejores resultados con resoluciones más bajas, es decir, con un valor cercano al megapíxel (por ejemplo, 1024x768). Sin embargo, cuando en la imagen se percibe una sensación de lejanía, es decir, el cociente entre el área de la figura y el área total de la imagen tiende a 0, se obtienen buenos resultados cuando se trabaja con unas resoluciones elevadas (superiores a 3 megapíxeles).

Por otro lado, el algoritmo desarrollado para la identificación y reconocimiento de la figura 3-4 arroja buenos resultados cuando el ángulo de inclinación sobre la horizontal no excede de los 50°. Cuando se excede dicho ángulo, las deformaciones en el plano son demasiado acusadas, provocando grandes cambios en las excentricidades de círculos y elipses, que afectan incluso hasta el área, de tal modo que no pueden ser gestionadas por los valores definidos en la figura 3-4. Por tanto, para los ángulos de inclinación superiores a los 50°, el sistema no se comporta de manera adecuada, puesto que las distorsiones en el plano respecto a la perspectiva cenital no pueden ser gestionadas de forma adecuada. De este modo, una línea de actuación futura que mejore el reconocimiento con grados de inclinación superiores a 50°, dará soporte a una de las grandes limitaciones en la detección de la plataforma.

Bibliografía

- [1] García-Pulido J.A., Pajares G., Dormido S., de la Cruz J.M. (2017). Recognition of a landing platform for unmanned aerial vehicles by using computer vision-based techniques. *Expert Systems with Applications*, vol. 76, pp. 152–165.
- [2] Cruz J.M., Sánchez B., Pajares G. (2012). System for guiding an unmanned vehicle towards a platform using visual analysis. Patente nº 201001592, 2013.
- [3] SALACOM (2013). Sistema Autónomo para la Localización y Actuación ante Contaminantes en el Mar, DPI2013-46665-C1.
- [4] Peña J.M., Torres-Sanchez J., de Castro A.I., Kelly M., López-Granados F. (2013). Weed mapping in early-season maize fields using object-based analysis of unmanned aerial vehicle (UAV) images. *PLoS ONE* 8(10): e77151.
- [5] Jiang T., Geller J., Ni D., Collura J. (2016). Unmanned aircraft system traffic management: concept of operation and system architecture. *International Journal of Transportation Science and Technology*, vol. 5, no. 3, pp. 123–135.
- [6] Popescu D., Ichim L., Stoican F. (2017). Unmanned aerial vehicle systems for remote estimation of flooded areas based on complex image processing. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 17(3), 446.
- [7] Pajares G. (2015). Overview and current status of remote sensing applications based on unmanned aerial vehicles (UAVs). *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 81(4), pp. 281–329.
- [8] Menéndez O., Pérez M., Auat Cheein F. (2019). Visual-Based Positioning of Aerial Maintenance Platforms on Overhead Transmission Lines. *Applied Sciences*. 2019. Volume 9, Issue 1.
- [9] Amazon Prime Air. Disponible en línea: <https://www.amazon.com/Amazon-Prime-Air/b?ie=UTF8&node=8037720011>. (accedido el 20 de febrero de 2019).
- [10] Kong W., Hu T., Zhang D., Shen L., Zhang J. (2017). Localization framework for real-time UAV autonomous landing: An On-Ground Deployed Visual Approach. *Sensors* 2017, 17, 1437.
- [11] Nguyen P.H., Kim K.W., Lee Y.W., Park K.R. (2017). Remote marker-based tracking for UAV landing using visible-light camera sensor. *Sensors* 2017, 17, 1987.
- [12] Anitha G., Kumar R.N.G. (2012). Vision based autonomous landing of an unmanned aerial vehicle. *Procedia Eng.* 2012, 38, pp. 2250–2256.
- [13] Xu G., Zhang Y., Ji S., Cheng Y., Tian Y. (2009). Research on computer vision-based for UAV autonomous landing on a ship. *Pattern Recognit. Lett.* 2009, 30, pp. 600–605.
- [14] Xu G., Qi X., Zeng Q., Tian Y., Guo R., Wang B. (2013). Use of land's cooperative object to estimate UAV's pose for autonomous landing. *Chin. J. Aeronaut.* 2013, 26, pp. 1498–1505.

- [15] Gui Y., Guo P., Zhang H., Lei Z., Zhou X., Du J., Yu Q. (2013). Airborne vision-based navigation method for UAV accuracy landing using infrared lamps. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, vol. 72, no. 2, pp. 197, 2013.
- [16] Yang T., Li G., Li J., Zhang Y., Zhang X., Zhang Z., Li Z. (2016). A ground-based near infrared camera array system for UAV auto-landing in GPS-denied environment. *Sensors* 2016, 16, pp. 1–20.
- [17] Kong W., Zhang D., Wang X., Xian Z., Zhang J. (2013). Autonomous landing of an UAV with a ground-based actuated infrared stereo vision system. In *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Tokyo, Japan, 3–7 November 2013; pp. 2963–2970.
- [18] Zhou D., Zhong Z., Zhang D., Shen L., Yan C. (2015). Autonomous landing of a helicopter UAV with a ground-based multisensory fusion system. *Seventh International Conference on Machine Vision (ICMV 2014)*. International Society for Optics and Photonics, 2015, 94451R.
- [19] Tang D., Hu T., Shen L., Zhang D., Kong W., Low K.H. (2016). Ground stereo vision-based navigation for autonomous take-off and landing of UAVs: A Chan-Vese Model Approach. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 13, no. 2, pp. 67, 2016.
- [20] Martínez C., Campoy P., Mondragón I., Olivares-Méndez M.A. (2009). Trinocular ground system to control UAVs. In *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, St. Louis, MO, USA, 10–15 October 2009, pp. 3361–3367.
- [21] Kong W., Zhou D., Zhang Y., Zhang D., Wang X., Zhao B., Yan C., Shen L., Zhang J. (2014). A ground-based optical system for autonomous landing of a fixed wing UAV. In *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems (IROS 2014)* September 14–18, Chicago, IL, USA, pp. 1–8.
- [22] Al-Sharman M.K., Emran B.J.M., Jaradat A., Najjaran H., Al-Husari R., Zweiri, Y. (2018). Precision landing using an adaptive fuzzy multi-sensor data fusion architecture. *Applied soft computing*, 69, pp. 149–164.
- [23] Al-Sharman M., Al-Jarrah M.A., Abdel-Hafez M. (2018). Auto Takeoff and Precision Terminal-Phase Landing using an Experimental Optical Flow Model for GPS/INS Enhancement. *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part B: Mechanical Engineering*.
- [24] Asadzadeh M., Palaiahnakote S., Idris M.Y.I., Anisi M.H., Lu T., Blumenstein M., Noor N.M. (2019). An Automatic Zone Detection System for Safe Landing of UAVs. *Expert Systems with Applications*. Volume 122, pp. 319–333.
- [25] Patterson T., McClean S., Morrow P., Parr G., Luo C. (2014). Timely autonomous identification of UAV safe landing zones. *Image and Vision Computing*, vol. 32, no. 9, pp. 568–578.
- [26] Li X. (2013). A software scheme for UAV's safe landing area discovery. *AASRI Procedia* 2013, 4, pp. 230–235.
- [27] Forster C., Faessler M., Fontana F., Werlberger M., Scaramuzza D. (2015). Continuous on-board monocular-vision-based elevation mapping applied to autonomous landing of micro aerial vehicles. *Proc. in Robotics and Automation (ICRA)*, 2015 IEEE International Conference on. IEEE, pp. 111–118.

- [28] Johnson A., Montgomery J., Matthies L. (2005). Vision guided landing of an autonomous helicopter in hazardous terrain. IEEE Intl. Conf. on Robotics and Automation (ICRA), 2005.
- [29] Bosch S., Lacroix S., Caballero F. (2006). Autonomous detection of safe landing areas for an UAV from monocular images. IEEE/RSJ Intl. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2006.
- [30] Desaraju V., Michael N., Humenberger M., Brockers R., Weiss S., Matthies L. (2015). Vision-based landing site evaluation and trajectory generation toward rooftop landing. *Autonomous Robots* 2015, vol. 39, no. 3, pp. 445–463.
- [31] Davide F., Alessio Z., Alessandro S., Jeffrey D., Scaramuzza D. (2017). Vision-based autonomous quadrotor landing on a moving platform. *Journal of Intelligent & Robotic Systems* February 2017, vol. 85, no. 2, pp. 369–384.
- [32] Lee D., Ryan T., Kim H.J. (2012). Autonomous landing of a vtol uav on a moving platform using image-based visual servoing. *Robotics and Automation (ICRA), 2012 IEEE International Conference on.* IEEE, 2012, pp. 971–976.
- [33] Lee H., Jung S., Shim D.H. (2016). Vision-based UAV landing on the moving vehicle. In *Proceedings of the International Conference on Unmanned Aircraft System, Arlington, MA, USA*, pp. 1–7.
- [34] Feng Y., Zhang C., Baek S., Rawashdeh S., Mohammadi A. (2018). Autonomous Landing of a UAV on a Moving Platform Using Model Predictive Control. *Drones* 2018. Volume 2, Issue 34.
- [35] Line V. (2018). Autonomous Landing of a Multirotor UAV on a Platform in Motion. Master Thesis, Norwegian University of Science and Technology. Noruega. Disponible en línea: <https://brage.bibsys.no/xmlui/handle/11250/2558185>. (accedido el 23 de febrero de 2019).
- [36] Rodríguez-Ramos A., Sampedro C., Bavle H., Milosevic Z., García-Vaquero A., Campoy P. (2017). Towards fully autonomous landing on moving platforms for rotary Unmanned Aerial Vehicle. *Unmanned Aircraft Systems (ICUAS) 2017 International Conference on*, pp. 170–178.
- [37] Polvara R., Sharma S., Wan J., Manning A., Sutton R. (2017). Towards autonomous landing on a moving vessel through fiducial markers. *IEEE European Conference on Mobile Robotics (ECMR). IEEE.* 2017.
- [38] Lin S., Garratt M.A., Lambert A.J. (2017). Monocular vision-based real-time target recognition and tracking for autonomously landing an uav in a cluttered shipboard environment. *Autonomous Robots*, vol. 41, no. 4, pp. 881–901, 2017.
- [39] Chen J., Miao X., Jiang H., Chen J., Liu X. (2017). Identification of Autonomous Landing Sign for Unmanned Aerial Vehicle Based on Faster Regions with Convolutional Neural Network. *IEEE International Conference on Chinese Automation Congress (CAC)*, pp. 2019–2114.
- [40] Polvara R., Patacchiola M., Sharma S., Wan J., Manning A., Sutton R., Cangelosi A. (2017). Autonomous quadrotor landing using deep reinforcement learning. *arXiv preprint arXiv:1709.03339*.
- [41] Wang L., Yang Q., Guo X. (2016). Recognition Algorithm of the Apron for Unmanned Aerial Vehicle Based on Image Corner Points. *Laser Journal* (08), pp. 71–74.

- [42] Nyein E.E., Tun H.M., Naing Z.M., Moe W.K. (2015). Implementation of vision-based landing target detection for VTOL UAV using raspberry Pi. *International Journal of Scientific & Technology Research*, vol. 4, no. 8, pp. 184–188.
- [43] Sharp C.S., Shakernia O., Sastry S.S. (2001). A vision system for landing an unmanned aerial vehicle. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1720–1727.
- [44] Pajares G., Cruz J.M. (2007). *Visión por computador: imágenes digitales y aplicaciones Fundamentos de Robótica*. Madrid: RA-MA., Segunda Edición.
- [45] Zhao Y.J., Pei H.L. (2013). An improved vision-based algorithm for unmanned aerial vehicles autonomous landing. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, vol. 273, pp. 560–565.
- [46] Bay H., Ess A., Tuytelaars T., Van Gool L. (2008). SURF: Speeded Up Robust Features. *Computer Vision and Image Understanding*, 110(3), pp. 346–359.
- [47] Saavedra-Ruiz M., Pinto-Vargas A.M., Romero-Cano V. (2018). Detection and tracking of a landing platform for aerial robotics applications. *IEEE 2nd Colombian Conference on Robotics and Automation (CCRA)*, Barranquilla, pp. 1–6.
- [48] Saripalli S., Montgomery J.F., Sukhatme G.S. (2002). Vision-based autonomous landing of an unmanned aerial vehicle. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 11–15, pp. 2799–2804.
- [49] Saripalli S., Sukhatme G. (2006). Landing on a moving target using an autonomous helicopter. *Field and service robotics*. Springer Tracts in Advanced Robotics, 2006, pp. 277–286.
- [50] Cocchioni F., Mancini A., Longhi S. (2014). Autonomous navigation, landing and recharge of a quadrotor using artificial vision. *International conference on unmanned aircraft systems (ICUAS)*, pp. 418–429.
- [51] Li Y., Wang Y., Luo H., Chen Y., Jiang Y. (2012). Landmark recognition for UAV autonomous landing based on vision. *Application Research of Computers* (07), pp. 2780–2783.
- [52] Vega J.A., Dormido-Canto S. (2010). *Máquinas de Vectores Soporte. Aprendizaje Automático* (Pajares G. y de la Cruz J.M., Eds.). RA-MA, Madrid.
- [53] Guili X., Yong Z., Shengyu J., Yuehua CH., Yupeng T. (2009). Research on computer vision-based for UAV autonomous landing on a ship. *Pattern Recognition Letters*, 30(6), pp. 600–605.
- [54] Lange S., Sünderhauf N., Protzel P. (2008). Autonomous landing for a multicopter uav using vision. *Workshop Proc. of SIMPAR 2008 Intl. Conf. on Simulation, Modelling and Programming for Autonomous Robots*, pp. 482–491.
- [55] Lange S., Sunderhauf N., Protzel P. (2009). A vision based onboard approach for landing and position control of an autonomous multicopter uav in gps-denied environments. *Advanced Robotics*, 2009. ICAR 2009. International Conference on. IEEE, 2009, pp. 1–6.
- [56] Olson, E. (2011). AprilTag: A robust and flexible visual fiducial system. *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2011.

- [57] AprilTag. Disponible en línea: <https://april.eecs.umich.edu/software/apriltag.html>. (accedido el 23 de febrero de 2019).
- [58] Ling K. (2014). Precision landing of a quadrotor uav on a moving target using low-cost sensors. Master Thesis, University of Waterloo, Canada. UWSpace. Disponible en línea: <https://uwspace.uwaterloo.ca/handle/10012/8803>. (accedido el 23 de febrero de 2019).
- [59] Kyristsisis S., Antonopoulos A., Chanielakis T., Stefanakis E., Linardos C., Tripolitsiotis A., Partsinevelos P. (2016). Towards autonomous modular UAV missions: The detection, geolocation and landing paradigm. *Sensors* 2016, vol. 16, no. 11, 1844.
- [60] Garrido-Jurado S., Muñoz-Salinas R., Madrid-Cuevas F.J., Marín-Jiménez M.J. (2014). Automatic generation and detection of highly reliable fiducial markers under occlusion. *Pattern Recognition* 2014, vol. 47, no. 6, pp. 2280–2292.
- [61] Sani F., Karimian G. (2017). Automatic navigation and landing of an indoor AR. drone quadrotor using ArUco marker and inertial sensors. *International Conference on Computer and Drone Applications (ICoNDA)*, pp. 102–107.
- [62] Detection of ArUco Markers. Disponible en línea: http://docs.opencv.org/trunk/d5/dae/tutorial_aruco_detection.html. (accedido el 23 de febrero de 2019).
- [63] Chaves S.M., Wolcott R.W., Eustice R.M. (2015). NEEC research: Toward GPS-denied landing of unmanned aerial vehicles on ships at sea. *Nav. Eng. J.* 2015, vol. 127, pp. 23–35.
- [64] Araar O., Aouf N., Vitanov I. (2017). Vision based autonomous landing of multirotor uav on moving platform. *Journal of Intelligent & Robotic System* 2017, vol. 85 pp. 369–384.
- [65] Kalman R.E. (1960). A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems. *Transactions of the ASME. Journal of Basic Engineering Volume* 82, pp. 35–45.
- [66] Rabah M., Rohan A., Talha M., Nam K., Kim S. (2018). Autonomous Vision-based Target Detection and Safe Landing for UAV. *International Journal of Control, Automation and Systems. Volume* 16, pp. 3013–3025.
- [67] Lôbo-Medeiros F.L., Faria-Gomes V.C., Campos de Aquino M.R., Geraldo D., Lopes-Honorato M.E., Moreira-Dias L.H. (2015). A computer vision system for guidance of vtol uavs autonomous landing. *Brazilian Conference on Intelligent Systems (BRACIS)*, pp. 333–338.
- [68] Nguyen P.H., Arsalan M., Koo J.H., Naqvi R.A., Truong N.Q., Park K.R. (2018). LightDenseYOLO: A Fast and Accurate Marker Tracker for Autonomous UAV Landing by Visible Light Camera Sensor on Drone. *Sensors* 2018, vol. 18, no. 6, 1703.
- [69] Cesetti A., Frontoni E., Mancini A., Zingaretti P., Longhi S. (2010). A vision-based guidance system for uav navigation. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 2010, vol. 57(1–4), pp. 233–257.
- [70] Zongji Ch., Lei C., Rui Z., Weiqi L. (2008). Unmanned aircraft landing navigation system based on vision. Disponible en línea: <http://www.google.com/patents/CN101109640A>. (accedido el 6 de marzo de 2019). Patente CN 101109640
- [71] Roy P., Yu J., Linden D.S. (2008). Methods, apparatus and systems for enhanced synthetic vision and multi-sensor data fusion to improve operational capabilities of unmanned aerial

- vehicles. Disponible en línea: <http://www.google.sc/patents/US20080215204>. (accedido el 7 de marzo de 2019). Patente US20080215204
- [72] Blenkhorn K.P., O'Hara S.V. (2009). Vision-based automated landing system for unmanned aerial vehicles. Disponible en línea: <http://www.google.com/patents/US20090306840>. (accedido el 7 de marzo de 2019). Patente US20090306840.
- [73] Grzywna J., Da Frota B., Meuse S. (2007). System and method for onboard vision processing. Disponible en línea: <http://www.google.nl/patents/US20070093945>. (accedido el 8 de marzo de 2019). Patente US20070093945.
- [74] Shin-Je Ch., Jung-Ho M., Seung-Kie Ch., San K., Sung-Sik, S. (2008). Automatic recovery method of a UAV using image information to stably recover the UAV by obtaining real-time image information of a landing symbol on a recovery netting. Disponible en línea: <http://patent.ipexl.com/KR/1020070058957.html>. (accedido el 12 de marzo de 2019). Patente 1020070058957
- [75] Avitzour, D. (1996). Mobile robot location determination employing error-correcting distributed landmarks. Disponible en línea: <http://www.google.com/patents/US5525883>. (accedido el 15 de marzo de 2019). Patente US5525883.
- [76] Asaad A., Al-Salih M, Ahson S.I. (2009). Object detection and features extraction in video frames using direct thresholding. Multimedia, Signal Processing and Communication Technologies. IMPACT '09. International, 221–224.
- [77] The MathWorks. (2019). The Matlab. <https://es.mathworks.com/products/matlab>. (accedido el 15 de marzo de 2019).
- [78] Otsu, N. (1979). A threshold selection method from gray-level histogram. IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics, 9, 62–66.
- [79] Kong T.Y., Rosenfeld A. (1996). Topological Algorithms for Digital Image Processing, Elsevier Science, Inc.
- [80] Dillencourt M.B., Samet H., Tamminen M. (1992). A general approach to connected-component labeling for arbitrary image representations. Journal of the Association for Computing Machinery 39 (2), 252–280.
- [81] Sedgewick R. (1998). Algorithms in C, 3rd Ed., Addison-Wesley, 11-20.
- [82] Haralick R.M., Shapiro G.L. (1992). Computer and Robot Vision, Volume I, Addison-Wesley, pp. 28–48.
- [83] Koschan A., Abido M. (2008). Digital Color Image Processing. John Wiley & Sons.
- [84] Hu M.K. (1962). Visual Problem recognition by Moment Invariant. IRE Trans. Inform. Theory, IT-8, pp.179–187.
- [85] Bohanec M. (2009). Decision making: A computer-science and information-technology viewpoint. Interdisciplinary Description of Complex Systems, vol. 7(2), pp. 22–37.
- [86] The MathWorks. (2016). Color-Based Segmentation Using the L*a*b* Color Space. <https://es.mathworks.com/help/images/examples/color-based-segmentation-using-the-l-a-b-color-space.html>. (accedido el 17 de marzo de 2019).

- [87] Campos Y., Sossa H., Pajares G. (2016). Spatio-temporal analysis for obstacle detection in agricultural videos. *Applied Soft Computing*, vol 45, pp. 86–97.
- [88] Dougherty E.R., Lotufo R.A. (2003). *Hands-on Morphological Image Processing*. SPIE Tutorial Texts in Optical Engineering Vol. TT5. SPIE Publications.
- [89] Mercimek M., Gulez K., Mumcu T.V. (2005). Real object recognition using moment invariants. *IEEE Transactions on Pattern Analysis*, vol. 30, pp. 765–775.
- [90] Theodoridis S., Koutroumbas K. (2009). *Pattern Recognition*. Elsevier Academic Press 4th edition.
- [91] Duda R.O., Hart P.E., Stork D.G. (2006). *Pattern classification* (2nd ed.). New York; New Delhi: Wiley.
- [92] Zimmermann H. J. (1991). *Fuzzy set Theory and its applications*. Kluwer Academic Publishers, Norwell, USA.
- [93] Viola P., Michael J. (2001). Rapid Object Detection using a Boosted Cascade of Simple Features. *Proceedings of the 2001 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Volume: 1, pp.511–518.
- [94] Fan Z., Lu J., Gong M., Xie H., Goodman E.D. (2018). Automatic Tobacco Plant Detection in UAV Images via Deep Neural Networks. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing*, Volume 11, Issue 3, pp. 876–887.
- [95] Bicer Y., Moghadam M., Sahin C., Eroglu B., Üre N.K. (2019). Vision-based UAV Guidance for Autonomous Landing with Deep Neural Networks. *American Institute of Aeronautics and Astronautics*. AIAA Scitech 2019 Forum, AIAA SciTech Forum, (AIAA 2019-0140)

Anexo I

Las tablas A1 y A2 recopilan todos los datos generados durante la fase experimental para la elaboración de los resultados del método 1 que aparecen en el capítulo tres.

Tabla A1

A continuación, se muestra la tabla de imágenes que contiene las principales características de las fotografías usadas en el método 1:

DETALLE DE LAS IMÁGENES EXPERIMENTALES PARA EL MÉTODO 1											
Nombre	Cámara	Tipo	Flash	Inclinación (Angulo °)	Altura (OY m)	Longitud (OX m)	Distancia (Total m.)	Tipo de Luz	Orientación (Figura °)	Zum	Resolución
IMG_A001	Galaxy S6	Exterior	No	10.39	3.00	0.55	3.05	Nublado	180	No	2592×1944
IMG_A002	Galaxy S6	Exterior	No	5.42	5.8	0.55	5.83	Nublado	180	No	2592×1944
IMG_A003	Galaxy S6	Exterior	No	3.66	8.6	0.55	8.62	Nublado	180	No	2592×1944
IMG_A004	Galaxy S6	Exterior	No	20.97	3.00	1.15	3.21	Nublado	180	No	2592×1944
IMG_A005	Galaxy S6	Exterior	No	11.21	5.8	1.15	5.91	Nublado	180	No	2592×1944
IMG_A006	Galaxy S6	Exterior	No	7.62	8.6	1.15	8.68	Nublado	180	No	2592×1944
IMG_A007	Galaxy S6	Exterior	No	46.40	3.00	3.15	4.35	Nublado	180	No	2592×1944
IMG_A008	Galaxy S6	Exterior	No	28.51	5.8	3.15	6.60	Nublado	180	No	2592×1944
IMG_A009	Galaxy S6	Exterior	No	20.12	8.6	3.15	9.16	Nublado	180	No	2592×1944
IMG_A010	Galaxy S6	Exterior	No	59.78	3.00	5.15	5.96	Nublado	180	No	2592×1944
IMG_A011	Galaxy S6	Exterior	No	41.60	5.8	5.15	7.76	Nublado	180	No	2592×1944
IMG_A012	Galaxy S6	Exterior	No	30.91	8.6	5.15	10.02	Nublado	180	No	2592×1944
IMG_A013	Galaxy S6	Exterior	No	14.57	3.00	0.78	3.10	Sombra y Sol	180	No	2592×1944

IMG_A014	Galaxy S6	Exterior	No	7.66	5.8	0.78	5.85	Sombra y Sol	180	No	2592×1944
IMG_A015	Galaxy S6	Exterior	No	5.18	8.6	0.78	8.64	Sombra y Sol	180	No	2592×1944
IMG_A016	Galaxy S6	Exterior	No	48.99	3.00	3.45	4.57	Sombra y Sol	180	No	2592×1944
IMG_A017	Galaxy S6	Exterior	No	30.75	5.8	3.45	6.75	Sombra y Sol	180	No	2592×1944
IMG_A018	Galaxy S6	Exterior	No	21.86	8.6	3.45	9.27	Sombra y Sol	180	No	2592×1944
IMG_A019	Galaxy S6	Exterior	No	61.17	3.00	5.45	6.22	Sombra y Sol	180	No	2592×1944
IMG_A020	Galaxy S6	Exterior	No	43.22	5.8	5.45	7.96	Sombra y Sol	180	No	2592×1944
IMG_A021	Galaxy S6	Exterior	No	32.36	8.6	5.45	10.18	Sombra y Sol	180	No	2592×1944
IMG_A022	Galaxy S6	Exterior	No	10.39	3.00	0.55	3.05	Soleado	180	No	2592×1944
IMG_A023	Galaxy S6	Exterior	No	5.42	5.8	0.55	5.83	Soleado	180	No	2592×1944
IMG_A024	Galaxy S6	Exterior	No	3.66	8.6	0.55	8.62	Soleado	180	No	2592×1944
IMG_A025	Galaxy S6	Exterior	No	20.97	3.00	1.15	3.21	Soleado	180	No	2592×1944
IMG_A026	Galaxy S6	Exterior	No	11.21	5.8	1.15	5.91	Soleado	180	No	2592×1944
IMG_A027	Galaxy S6	Exterior	No	7.62	8.6	1.15	8.68	Soleado	180	No	2592×1944
IMG_A028	Galaxy S6	Exterior	No	46.40	3.00	3.15	4.35	Soleado	180	No	2592×1944
IMG_A029	Galaxy S6	Exterior	No	28.51	5.8	3.15	6.60	Soleado	180	No	2592×1944
IMG_A030	Galaxy S6	Exterior	No	20.12	8.6	3.15	9.16	Soleado	180	No	2592×1944
IMG_A031	Galaxy S6	Exterior	No	59.78	3.00	5.15	5.96	Soleado	180	No	2592×1944
IMG_A032	Galaxy S6	Exterior	No	41.60	5.8	5.15	7.76	Soleado	180	No	2592×1944
IMG_A033	Galaxy S6	Exterior	No	30.91	8.6	5.15	10.02	Soleado	180	No	2592×1944
IMG_A034	Galaxy S6	Exterior	No	46.40	3.00	3.15	4.35	Sombra y Sol	135	No	2592×1944
IMG_A035	Galaxy S6	Exterior	No	28.51	5.8	3.15	6.60	Sombra y Sol	135	No	2592×1944
IMG_A036	Galaxy S6	Exterior	No	20.12	8.6	3.15	9.16	Sombra y Sol	135	No	2592×1944
IMG_A037	Galaxy S6	Exterior	No	46.40	3.00	3.15	4.35	Soleado	225	No	2592×1944
IMG_A038	Galaxy S6	Exterior	No	28.51	5.8	3.15	6.60	Soleado	225	No	2592×1944

IMG_A039	Galaxy S6	Exterior	No	20.12	8.6	3.15	9.16	Soleado	225	No	2592×1944
IMG_A040	Galaxy S6	Exterior	No	39.24	3.00	2.45	3.87	Nublado	225	No	2592×1944
IMG_A041	Galaxy S6	Exterior	No	22.90	5.8	2.45	6.30	Nublado	225	No	2592×1944
IMG_A042	Galaxy S6	Exterior	No	15.90	8.6	2.45	8.94	Nublado	225	No	2592×1944
IMG_A043	Galaxy S6	Exterior	No	39.24	3.00	2.45	3.87	Nublado	180	No	2592×1944
IMG_A044	Galaxy S6	Exterior	No	22.90	5.8	2.45	6.30	Nublado	180	No	2592×1944
IMG_A045	Galaxy S6	Exterior	No	15.90	8.6	2.45	8.94	Nublado	180	No	2592×1944
IMG_A046	Galaxy S6	Exterior	No	39.24	3.00	2.45	3.87	Soleado	180	No	2592×1944
IMG_A047	Galaxy S6	Exterior	No	22.90	5.8	2.45	6.30	Soleado	180	No	2592×1944
IMG_A048	Galaxy S6	Exterior	No	15.90	8.6	2.45	8.94	Soleado	180	No	2592×1944
IMG_A049	Galaxy S6	Exterior	No	39.24	3.00	2.45	3.87	Nublado	45	No	2592×1944
IMG_A050	Galaxy S6	Exterior	No	22.90	5.8	2.45	6.30	Nublado	45	No	2592×1944
IMG_A051	Galaxy S6	Exterior	No	15.90	8.6	2.45	8.94	Nublado	45	No	2592×1944
IMG_A052	Galaxy S6	Exterior	No	39.24	3.00	2.45	3.87	Soleado	45	No	2592×1944
IMG_A053	Galaxy S6	Exterior	No	22.90	5.8	2.45	6.30	Soleado	45	No	2592×1944
IMG_A054	Galaxy S6	Exterior	No	15.90	8.6	2.45	8.94	Soleado	45	No	2592×1944
IMG_A055	Galaxy S6	Exterior	No	39.24	3.00	2.45	3.87	Nublado	45	No	2592×1944
IMG_A056	Galaxy S6	Exterior	No	22.90	5.8	2.45	6.30	Nublado	45	No	2592×1944
IMG_A057	Galaxy S6	Exterior	No	15.90	8.6	2.45	8.94	Nublado	45	No	2592×1944
IMG_A058	Galaxy S6	Exterior	No	39.24	3.00	2.45	3.87	Soleado	45	No	2592×1944
IMG_A059	Galaxy S6	Exterior	No	22.90	5.8	2.45	6.30	Soleado	45	No	2592×1944
IMG_A060	Galaxy S6	Exterior	No	15.90	8.6	2.45	8.94	Soleado	45	No	2592×1944
IMG_A061	Galaxy S6	Exterior	No	22.90	5.8	2.45	6.30	Nublado	180	Si	2592×1944
IMG_A062	Galaxy S6	Exterior	No	15.90	8.6	2.45	8.94	Nublado	180	Si	2592×1944
IMG_A063	Galaxy S6	Exterior	No	12.33908728	1.6	0.35	1.637833935	Nublado	0	No	2592×1944

IMG_A064	Galaxy S6	Exterior	No	16.38954033	1.7	0.50	1.772004515	Nublado	180	No	2592×1944
IMG_A065	Galaxy S6	Exterior	No	8.746162263	0.65	0.10	0.657647322	Nublado	180	No	2592×1944
IMG_A066	Galaxy S6	Exterior	No	50.71059314	0.45	0.55	0.71063352	Nublado	315	No	2592×1944
IMG_A067	Galaxy S6	Exterior	No	20.13630343	1.5	0.55	1.597654531	Nublado	315	No	2592×1944
IMG_A068	Galaxy S6	Exterior	No	56.30993247	0.4	0.60	0.721110255	Nublado	90	No	2592×1944
IMG_A069	Galaxy S6	Interior	Si	9.727578551	1.75	0.30	1.77552809	Luz artificial	0	No	2592×1944
IMG_A070	Galaxy S6	Interior	Si	12.87500156	1.75	0.40	1.795132307	Luz artificial	270	No	2592×1944
IMG_A071	Galaxy S6	Interior	Si	3.27	1.75	0.1	1.75	Luz artificial	45	No	2592×1944
IMG_A072	Galaxy S6	Interior	Si	3.27	1.75	0.1	1.75	Luz artificial	135	No	2592×1944
IMG_A073	Galaxy S6	Interior	Si	3.27	1.75	0.1	1.75	Luz artificial	225	No	2592×1944
IMG_A074	Galaxy S6	Interior	Si	3.27	1.75	0.1	1.75	Luz artificial	315	No	2592×1944
IMG_A075	Galaxy S6	Interior	Si	34.44	1.75	1.2	2.12	Luz artificial	45	No	2592×1944
IMG_A076	Galaxy S6	Interior	Si	34.44	1.75	1.2	2.12	Luz artificial	135	No	2592×1944
IMG_A077	Galaxy S6	Interior	Si	34.44	1.75	1.2	2.12	Luz artificial	225	No	2592×1944
IMG_A078	Galaxy S6	Interior	Si	34.44	1.75	1.2	2.12	Luz artificial	315	No	2592×1944
IMG_A079	Galaxy S6	Interior	Si	45.00	1.75	1.75	2.47	Luz artificial	180	No	2592×1944
IMG_A080	Galaxy S6	Interior	Si	45.00	1.75	1.75	2.47	Luz artificial	45	No	2592×1944
IMG_B001	Galaxy Ace	Exterior	No	10.39	3.00	0.55	3.05	Nublado	180	No	2560×1920
IMG_B002	Galaxy Ace	Exterior	No	5.42	5.8	0.55	5.83	Nublado	180	No	2560×1920
IMG_B003	Galaxy Ace	Exterior	No	3.66	8.6	0.55	8.62	Nublado	180	No	2560×1920
IMG_B004	Galaxy Ace	Exterior	No	20.97	3.00	1.15	3.21	Nublado	180	No	2560×1920
IMG_B005	Galaxy Ace	Exterior	No	11.21	5.8	1.15	5.91	Nublado	180	No	2560×1920
IMG_B006	Galaxy Ace	Exterior	No	7.62	8.6	1.15	8.68	Nublado	180	No	2560×1920
IMG_B007	Galaxy Ace	Exterior	No	46.40	3.00	3.15	4.35	Nublado	180	No	2560×1920
IMG_B008	Galaxy Ace	Exterior	No	28.51	5.8	3.15	6.60	Nublado	180	No	2560×1920

IMG_B009	Galaxy Ace	Exterior	No	20.12	8.6	3.15	9.16	Nublado	180	No	2560×1920
IMG_B010	Galaxy Ace	Exterior	No	59.78	3.00	5.15	5.96	Nublado	180	No	2560×1920
IMG_B011	Galaxy Ace	Exterior	No	41.60	5.8	5.15	7.76	Nublado	180	No	2560×1920
IMG_B012	Galaxy Ace	Exterior	No	30.91	8.6	5.15	10.02	Nublado	180	No	2560×1920
IMG_B013	Galaxy Ace	Exterior	No	14.57	3.00	0.78	3.10	Sombra y Sol	180	No	2560×1920
IMG_B014	Galaxy Ace	Exterior	No	7.66	5.8	0.78	5.85	Sombra y Sol	180	No	2560×1920
IMG_B015	Galaxy Ace	Exterior	No	5.18	8.6	0.78	8.64	Sombra y Sol	180	No	2560×1920
IMG_B016	Galaxy Ace	Exterior	No	48.99	3.00	3.45	4.57	Sombra y Sol	180	No	2560×1920
IMG_B017	Galaxy Ace	Exterior	No	30.75	5.8	3.45	6.75	Sombra y Sol	180	No	2560×1920
IMG_B018	Galaxy Ace	Exterior	No	21.86	8.6	3.45	9.27	Sombra y Sol	180	No	2560×1920
IMG_B019	Galaxy Ace	Exterior	No	61.17	3.00	5.45	6.22	Sombra y Sol	180	No	2560×1920
IMG_B020	Galaxy Ace	Exterior	No	43.22	5.8	5.45	7.96	Sombra y Sol	180	No	2560×1920
IMG_B021	Galaxy Ace	Exterior	No	32.36	8.6	5.45	10.18	Sombra y Sol	180	No	2560×1920
IMG_B022	Galaxy Ace	Exterior	No	10.39	3.00	0.55	3.05	Soleado	180	No	2560×1920
IMG_B023	Galaxy Ace	Exterior	No	5.42	5.8	0.55	5.83	Soleado	180	No	2560×1920
IMG_B024	Galaxy Ace	Exterior	No	3.66	8.6	0.55	8.62	Soleado	180	No	2560×1920
IMG_B025	Galaxy Ace	Exterior	No	20.97	3.00	1.15	3.21	Soleado	180	No	2560×1920
IMG_B026	Galaxy Ace	Exterior	No	11.21	5.8	1.15	5.91	Soleado	180	No	2560×1920
IMG_B027	Galaxy Ace	Exterior	No	7.62	8.6	1.15	8.68	Soleado	180	No	2560×1920
IMG_B028	Galaxy Ace	Exterior	No	46.40	3.00	3.15	4.35	Soleado	180	No	2560×1920
IMG_B029	Galaxy Ace	Exterior	No	28.51	5.8	3.15	6.60	Soleado	180	No	2560×1920
IMG_B030	Galaxy Ace	Exterior	No	20.12	8.6	3.15	9.16	Soleado	180	No	2560×1920
IMG_B031	Galaxy Ace	Exterior	No	59.78	3.00	5.15	5.96	Soleado	180	No	2560×1920
IMG_B032	Galaxy Ace	Exterior	No	41.60	5.8	5.15	7.76	Soleado	180	No	2560×1920
IMG_B033	Galaxy Ace	Exterior	No	30.91	8.6	5.15	10.02	Soleado	180	No	2560×1920

IMG_B034	Galaxy Ace	Exterior	No	46.40	3.00	3.15	4.35	Sombra y Sol	225	No	2560×1920
IMG_B035	Galaxy Ace	Exterior	No	28.51	5.8	3.15	6.60	Sombra y Sol	225	No	2560×1920
IMG_B036	Galaxy Ace	Exterior	No	20.12	8.6	3.15	9.16	Sombra y Sol	225	No	2560×1920
IMG_B037	Galaxy Ace	Exterior	No	46.40	3.00	3.15	4.35	Soleado	135	No	2560×1920
IMG_B038	Galaxy Ace	Exterior	No	28.51	5.8	3.15	6.60	Soleado	135	No	2560×1920
IMG_B039	Galaxy Ace	Exterior	No	20.12	8.6	3.15	9.16	Soleado	135	No	2560×1920
IMG_B040	Galaxy Ace	Exterior	No	39.24	3.00	2.45	3.87	Nublado	225	No	2560×1920
IMG_B041	Galaxy Ace	Exterior	No	22.90	5.8	2.45	6.30	Nublado	225	No	2560×1920
IMG_B042	Galaxy Ace	Exterior	No	15.90	8.6	2.45	8.94	Nublado	225	No	2560×1920
IMG_B043	Galaxy Ace	Exterior	No	39.24	3.00	2.45	3.87	Nublado	180	No	2560×1920
IMG_B044	Galaxy Ace	Exterior	No	22.90	5.8	2.45	6.30	Nublado	180	No	2560×1920
IMG_B045	Galaxy Ace	Exterior	No	15.90	8.6	2.45	8.94	Nublado	180	No	2560×1920
IMG_B046	Galaxy Ace	Exterior	No	39.24	3.00	2.45	3.87	Soleado	180	No	2560×1920
IMG_B047	Galaxy Ace	Exterior	No	22.90	5.8	2.45	6.30	Soleado	180	No	2560×1920
IMG_B048	Galaxy Ace	Exterior	No	15.90	8.6	2.45	8.94	Soleado	180	No	2560×1920
IMG_B049	Galaxy Ace	Exterior	No	39.24	3.00	2.45	3.87	Nublado	45	No	2560×1920
IMG_B050	Galaxy Ace	Exterior	No	22.90	5.8	2.45	6.30	Nublado	45	No	2560×1920
IMG_B051	Galaxy Ace	Exterior	No	15.90	8.6	2.45	8.94	Nublado	45	No	2560×1920
IMG_B052	Galaxy Ace	Exterior	No	39.24	3.00	2.45	3.87	Soleado	45	No	2560×1920
IMG_B053	Galaxy Ace	Exterior	No	22.90	5.8	2.45	6.30	Soleado	45	No	2560×1920
IMG_B054	Galaxy Ace	Exterior	No	15.90	8.6	2.45	8.94	Soleado	45	No	2560×1920
IMG_B055	Galaxy Ace	Exterior	No	39.24	3.00	2.45	3.87	Nublado	45	No	2560×1920
IMG_B056	Galaxy Ace	Exterior	No	22.90	5.8	2.45	6.30	Nublado	45	No	2560×1920
IMG_B057	Galaxy Ace	Exterior	No	15.90	8.6	2.45	8.94	Nublado	45	No	2560×1920
IMG_B058	Galaxy Ace	Exterior	No	39.24	3.00	2.45	3.87	Soleado	45	No	2560×1920

IMG_B059	Galaxy Ace	Exterior	No	22.90	5.8	2.45	6.30	Soleado	45	No	2560×1920
IMG_B060	Galaxy Ace	Exterior	No	15.90	8.6	2.45	8.94	Soleado	45	No	2560×1920
IMG_B061	Galaxy Ace	Exterior	No	22.90	5.8	2.45	6.30	Nublado	180	Si	2560×1920
IMG_B062	Galaxy Ace	Exterior	No	15.90	8.6	2.45	8.94	Nublado	180	Si	2560×1920
IMG_B063	Galaxy Ace	Exterior	No	12.34	1.6	0.35	1.64	Nublado	0	No	2560×1920
IMG_B064	Galaxy Ace	Exterior	No	16.39	1.7	0.5	1.77	Nublado	180	No	2560×1920
IMG_B065	Galaxy Ace	Exterior	No	8.75	0.65	0.1	0.66	Nublado	180	No	2560×1920
IMG_B066	Galaxy Ace	Exterior	No	50.71	0.45	0.55	0.71	Nublado	315	No	2560×1920
IMG_B067	Galaxy Ace	Exterior	No	20.14	1.5	0.55	1.60	Nublado	315	No	2560×1920
IMG_B068	Galaxy Ace	Exterior	No	56.31	0.4	0.6	0.72	Nublado	90	No	2560×1920
IMG_B069	Galaxy Ace	Interior	Si	9.73	1.75	0.3	1.78	Luz artificial	0	No	2560×1920
IMG_B070	Galaxy Ace	Interior	Si	12.88	1.75	0.4	1.80	Luz artificial	270	No	2560×1920
IMG_B071	Galaxy Ace	Interior	Si	3.27	1.75	0.1	1.75	Luz artificial	45	No	2560×1920
IMG_B072	Galaxy Ace	Interior	Si	3.27	1.75	0.1	1.75	Luz artificial	135	No	2560×1920
IMG_B073	Galaxy Ace	Interior	Si	3.27	1.75	0.1	1.75	Luz artificial	225	No	2560×1920
IMG_B074	Galaxy Ace	Interior	Si	3.27	1.75	0.1	1.75	Luz artificial	315	No	2560×1920
IMG_B075	Galaxy Ace	Interior	Si	34.44	1.75	1.2	2.12	Luz artificial	45	No	2560×1920
IMG_B076	Galaxy Ace	Interior	Si	34.44	1.75	1.2	2.12	Luz artificial	135	No	2560×1920
IMG_B077	Galaxy Ace	Interior	Si	34.44	1.75	1.2	2.12	Luz artificial	225	No	2560×1920
IMG_B078	Galaxy Ace	Interior	Si	34.44	1.75	1.2	2.12	Luz artificial	315	No	2560×1920
IMG_B079	Galaxy Ace	Interior	Si	45.00	1.75	1.75	2.47	Luz artificial	180	No	2560×1920
IMG_B080	Galaxy Ace	Interior	Si	45.00	1.75	1.75	2.47	Luz artificial	45	No	2560×1920

Tabla A1 – Característica de las imágenes usadas en la fase experimental del método 1

Tabla A2

A continuación, se muestra la tabla que contiene el resultado de los Análisis Parciales Comparativos para cada reconocimiento efectuado en los resultados del método 1:

CONFIGURACIÓN DEL PROCESADO			RESULTADO POR ANÁLISIS PARCIAL COMPARATIVO										Resultado	
Nombre	Binarización	Escalado	APC1	APC2	APC3	APC4	APC5	APC6	APC7	APC8	APC9	APC10	Total	Acierto
IMG_A001	1024×768	directo	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	80	1
IMG_A002	1024×768	directo	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	30	0
IMG_A003	1024×768	directo	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	20	0
IMG_A004	1024×768	directo	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	80	1
IMG_A005	1024×768	directo	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	10	0
IMG_A006	1024×768	directo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
IMG_A009	1024×768	directo	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0
IMG_A010	1024×768	directo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
IMG_A011	1024×768	directo	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0
IMG_A012	1024×768	directo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
IMG_A013	1024×768	directo	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	100	1
IMG_A014	1024×768	directo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
IMG_A015	1024×768	directo	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	20	0
IMG_A016	1024×768	directo	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	20	0
IMG_A017	1024×768	directo	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	30	0
IMG_A018	1024×768	directo	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	10	0
IMG_A019	1024×768	directo	1	1	0	1	0	0	0	0	1	0	40	0

IMG_A020	1024×768	directo	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	10	0
IMG_A022	1024×768	directo	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	100	1
IMG_A024	1024×768	directo	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0
IMG_A025	1024×768	directo	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	70	1
IMG_A026	1024×768	directo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
IMG_A027	1024×768	directo	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	10	0
IMG_A045	1024×768	directo	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	10	0
IMG_A050	1024×768	directo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
IMG_A056	1024×768	directo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
IMG_A061	1024×768	directo	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	100	1
IMG_A062	1024×768	directo	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	100	1
IMG_A063	1024×768	directo	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	100	1
IMG_A064	1024×768	directo	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	100	1
IMG_A066	1024×768	directo	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	50	1
IMG_A067	1024×768	directo	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	90	1
IMG_A068	1024×768	directo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
IMG_A069	1024×768	directo	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	100	1
IMG_A070	1024×768	directo	1	1	1	0	0	1	0	1	1	1	70	1
IMG_A071	1024×768	directo	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	90	1
IMG_A072	1024×768	directo	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	90	1
IMG_A073	1024×768	directo	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	90	1
IMG_A074	1024×768	directo	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	90	1
IMG_A075	1024×768	directo	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	100	1
IMG_A076	1024×768	directo	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	90	1
IMG_A077	1024×768	directo	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	90	1

IMG_A078	1024×768	directo	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	90	1
IMG_A079	1024×768	directo	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	90	1
IMG_A080	1024×768	directo	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	90	1
IMG_A001	2592×1944	directo	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	100	1
IMG_A002	2592×1944	directo	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	100	1
IMG_A003	2592×1944	directo	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	60	1
IMG_A004	2592×1944	directo	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	100	1
IMG_A005	2592×1944	directo	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	70	1
IMG_A006	2592×1944	directo	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	60	1
IMG_A007	2592×1944	directo	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	50	1
IMG_A008	2592×1944	directo	1	1	1	1	0	1	1	0	0	0	60	1
IMG_A009	2592×1944	directo	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	50	1
IMG_A010	2592×1944	directo	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	20	0
IMG_A011	2592×1944	directo	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	20	0
IMG_A012	2592×1944	directo	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	20	0
IMG_A013	2592×1944	directo	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	100	1
IMG_A014	2592×1944	directo	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	100	1
IMG_A015	2592×1944	directo	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	100	1
IMG_A016	2592×1944	directo	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	20	0
IMG_A017	2592×1944	directo	1	1	1	1	0	1	0	0	1	0	60	1
IMG_A018	2592×1944	directo	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	60	1
IMG_A019	2592×1944	directo	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	30	0
IMG_A020	2592×1944	directo	1	0	0	1	1	1	1	0	0	0	50	0
IMG_A021	2592×1944	directo	0	0	0	1	1	1	1	0	1	0	50	0
IMG_A022	2592×1944	directo	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	100	1

IMG_A023	2592×1944	directo	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	100	1
IMG_A024	2592×1944	directo	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	0	70	1
IMG_A025	2592×1944	directo	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	100	1
IMG_A026	2592×1944	directo	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	100	1
IMG_A027	2592×1944	directo	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	0	70	1
IMG_A028	2592×1944	directo	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	40	1
IMG_A029	2592×1944	directo	1	1	1	1	0	1	1	1	0	0	0	70	1
IMG_A030	2592×1944	directo	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	60	1
IMG_A032	2592×1944	directo	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	10	0
IMG_A034	2592×1944	directo	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	100	1
IMG_A035	2592×1944	directo	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	60	1
IMG_A036	2592×1944	directo	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	50	1
IMG_A037	2592×1944	directo	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	10	0
IMG_A038	2592×1944	directo	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	80	1
IMG_A039	2592×1944	directo	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	60	1
IMG_A040	2592×1944	directo	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	100	1
IMG_A041	2592×1944	directo	0	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	50	0
IMG_A042	2592×1944	directo	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	60	1
IMG_A043	2592×1944	directo	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	90	1
IMG_A044	2592×1944	directo	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	100	1
IMG_A045	2592×1944	directo	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	70	1
IMG_A047	2592×1944	directo	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	10	1
IMG_A048	2592×1944	directo	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	70	1
IMG_A049	2592×1944	directo	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	100	1
IMG_A050	2592×1944	directo	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	100	1

IMG_A051	2592×1944	directo	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	60	1
IMG_A053	2592×1944	directo	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	20	0
IMG_A054	2592×1944	directo	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	50	1
IMG_A055	2592×1944	directo	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	100	1
IMG_A056	2592×1944	directo	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	20	0
IMG_A057	2592×1944	directo	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	60	1
IMG_A059	2592×1944	directo	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	90	1
IMG_A060	2592×1944	directo	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	70	1
IMG_A061	2592×1944	directo	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	100	1
IMG_A062	2592×1944	directo	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	100	1
IMG_A063	2592×1944	directo	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	100	1
IMG_A064	2592×1944	directo	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	100	1
IMG_A066	2592×1944	directo	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	10	0
IMG_A067	2592×1944	directo	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	90	1
IMG_A068	2592×1944	directo	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	10	0
IMG_A069	2592×1944	directo	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	100	1
IMG_A070	2592×1944	directo	1	1	1	0	0	1	0	1	1	1	70	1
IMG_A071	2592×1944	directo	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	90	1
IMG_A072	2592×1944	directo	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	20	1
IMG_A073	2592×1944	directo	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	100	1
IMG_A074	2592×1944	directo	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	20	0
IMG_A075	2592×1944	directo	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	100	1
IMG_A076	2592×1944	directo	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	90	1
IMG_A077	2592×1944	directo	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	90	1
IMG_A078	2592×1944	directo	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	20	0

IMG_A079	2592×1944	directo	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	20	0
IMG_A080	2592×1944	directo	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	20	0
IMG_A001	1024×768	otsu	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	50	1
IMG_A002	1024×768	otsu	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0
IMG_A003	1024×768	otsu	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	10	0
IMG_A004	1024×768	otsu	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	10	0
IMG_A005	1024×768	otsu	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	10	0
IMG_A006	1024×768	otsu	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0
IMG_A007	1024×768	otsu	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	30	0
IMG_A008	1024×768	otsu	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0	40	0
IMG_A009	1024×768	otsu	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	20	0
IMG_A010	1024×768	otsu	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0	40	0
IMG_A011	1024×768	otsu	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	30	0
IMG_A012	1024×768	otsu	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	30	0
IMG_A013	1024×768	otsu	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	70	1
IMG_A014	1024×768	otsu	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	40	0
IMG_A015	1024×768	otsu	0	1	0	1	1	1	1	0	0	0	50	0
IMG_A016	1024×768	otsu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
IMG_A017	1024×768	otsu	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	10	0
IMG_A018	1024×768	otsu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
IMG_A020	1024×768	otsu	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	30	0
IMG_A021	1024×768	otsu	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	20	0
IMG_A022	1024×768	otsu	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	60	1
IMG_A023	1024×768	otsu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
IMG_A025	1024×768	otsu	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	50	1

IMG_A028	1024×768	otsu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
IMG_A031	1024×768	otsu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
IMG_A034	1024×768	otsu	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	30	0
IMG_A035	1024×768	otsu	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	20	0
IMG_A036	1024×768	otsu	1	1	0	1	0	1	1	0	0	0	50	0
IMG_A037	1024×768	otsu	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	20	0
IMG_A038	1024×768	otsu	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	20	0
IMG_A039	1024×768	otsu	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	20	0
IMG_A040	1024×768	otsu	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	10	0
IMG_A044	1024×768	otsu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
IMG_A045	1024×768	otsu	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	20	0
IMG_A055	1024×768	otsu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
IMG_A057	1024×768	otsu	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	30	0
IMG_A062	1024×768	otsu	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	30	0
IMG_A063	1024×768	otsu	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	100	1
IMG_A064	1024×768	otsu	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	100	1
IMG_A065	1024×768	otsu	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	90	1
IMG_A066	1024×768	otsu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
IMG_A067	1024×768	otsu	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	80	1
IMG_A068	1024×768	otsu	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	10	1
IMG_A069	1024×768	otsu	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	20	0
IMG_A070	1024×768	otsu	1	1	1	0	0	1	0	0	1	1	60	1
IMG_A071	1024×768	otsu	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	30	0
IMG_A072	1024×768	otsu	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	30	0
IMG_A073	1024×768	otsu	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	10	0

IMG_A074	1024×768	otsu	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	10	0
IMG_A075	1024×768	otsu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
IMG_A076	1024×768	otsu	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	20	0
IMG_A077	1024×768	otsu	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	10	0
IMG_A078	1024×768	otsu	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	20	0
IMG_A079	1024×768	otsu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
IMG_A080	1024×768	otsu	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	30	0
IMG_A001	2592×1944	otsu	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	10	0
IMG_A002	2592×1944	otsu	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	30	0
IMG_A003	2592×1944	otsu	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	30	0
IMG_A004	2592×1944	otsu	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	40	0
IMG_A005	2592×1944	otsu	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	50	0
IMG_A006	2592×1944	otsu	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	30	0
IMG_A007	2592×1944	otsu	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	30	0
IMG_A008	2592×1944	otsu	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	20	0
IMG_A009	2592×1944	otsu	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	30	0
IMG_A010	2592×1944	otsu	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	20	0
IMG_A011	2592×1944	otsu	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0	40	0
IMG_A012	2592×1944	otsu	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	10	0
IMG_A013	2592×1944	otsu	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	100	1
IMG_A014	2592×1944	otsu	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	30	0
IMG_A015	2592×1944	otsu	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	40	0
IMG_A016	2592×1944	otsu	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	20	0
IMG_A017	2592×1944	otsu	1	1	1	1	0	1	1	0	1	0	70	1
IMG_A018	2592×1944	otsu	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	40	0

IMG_A019	2592×1944	otsu	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	20	0
IMG_A020	2592×1944	otsu	0	1	1	1	0	1	1	0	0	0	50	0
IMG_A021	2592×1944	otsu	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1	40	0
IMG_A022	2592×1944	otsu	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	100	1
IMG_A023	2592×1944	otsu	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	50	1
IMG_A024	2592×1944	otsu	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	20	0
IMG_A025	2592×1944	otsu	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	70	1
IMG_A026	2592×1944	otsu	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	20	0
IMG_A027	2592×1944	otsu	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	30	0
IMG_A028	2592×1944	otsu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
IMG_A029	2592×1944	otsu	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	40	0
IMG_A030	2592×1944	otsu	0	0	0	1	0	1	1	1	1	0	50	0
IMG_A031	2592×1944	otsu	0	1	0	1	0	1	1	0	0	0	40	0
IMG_A032	2592×1944	otsu	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	30	0
IMG_A033	2592×1944	otsu	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	40	0
IMG_A034	2592×1944	otsu	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	10	0
IMG_A035	2592×1944	otsu	0	0	1	1	0	1	0	1	0	1	50	0
IMG_A036	2592×1944	otsu	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	30	0
IMG_A037	2592×1944	otsu	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	10	0
IMG_A038	2592×1944	otsu	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	10	0
IMG_A039	2592×1944	otsu	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	20	0
IMG_A040	2592×1944	otsu	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	30	0
IMG_A041	2592×1944	otsu	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	60	0
IMG_A042	2592×1944	otsu	0	1	1	1	0	1	0	0	1	0	50	0
IMG_A043	2592×1944	otsu	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	20	0

IMG_A044	2592×1944	otsu	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	20	0
IMG_A045	2592×1944	otsu	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	30	0
IMG_A046	2592×1944	otsu	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	20	0
IMG_A047	2592×1944	otsu	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	20	0
IMG_A048	2592×1944	otsu	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	20	0
IMG_A049	2592×1944	otsu	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0
IMG_A050	2592×1944	otsu	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	30	0
IMG_A051	2592×1944	otsu	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	20	0
IMG_A052	2592×1944	otsu	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	20	0
IMG_A053	2592×1944	otsu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
IMG_A054	2592×1944	otsu	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	10	0
IMG_A055	2592×1944	otsu	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	10	0
IMG_A056	2592×1944	otsu	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	20	0
IMG_A057	2592×1944	otsu	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	30	0
IMG_A058	2592×1944	otsu	0	0	0	1	1	0	0	1	0	1	40	0
IMG_A059	2592×1944	otsu	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	30	0
IMG_A060	2592×1944	otsu	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	20	0
IMG_A061	2592×1944	otsu	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	20	0
IMG_A062	2592×1944	otsu	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	30	0
IMG_A063	2592×1944	otsu	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	20	0
IMG_A064	2592×1944	otsu	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	100	1
IMG_A065	2592×1944	otsu	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	20	0
IMG_A066	2592×1944	otsu	1	1	0	1	0	1	1	0	0	0	50	0
IMG_A067	2592×1944	otsu	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	20	0
IMG_A068	2592×1944	otsu	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	40	0

IMG_A069	2592×1944	otsu	0	0	0	1	0	1	1	0	1	1	50	0
IMG_A070	2592×1944	otsu	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	30	0
IMG_A071	2592×1944	otsu	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	30	0
IMG_A072	2592×1944	otsu	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	10	0
IMG_A073	2592×1944	otsu	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	10	0
IMG_A074	2592×1944	otsu	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	30	0
IMG_A075	2592×1944	otsu	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	30	0
IMG_A076	2592×1944	otsu	0	1	0	1	0	1	1	0	0	0	40	0
IMG_A077	2592×1944	otsu	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	30	0
IMG_A078	2592×1944	otsu	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	20	0
IMG_A079	2592×1944	otsu	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	10	0
IMG_A080	2592×1944	otsu	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	10	0
IMG_B001	1024×768	directo	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	70	1
IMG_B003	1024×768	directo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
IMG_B005	1024×768	directo	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	20	0
IMG_B006	1024×768	directo	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	20	0
IMG_B010	1024×768	directo	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	40	0
IMG_B011	1024×768	directo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
IMG_B012	1024×768	directo	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	10	0
IMG_B013	1024×768	directo	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	80	1
IMG_B014	1024×768	directo	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	10	0
IMG_B015	1024×768	directo	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	30	0
IMG_B018	1024×768	directo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
IMG_B019	1024×768	directo	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	10	0
IMG_B020	1024×768	directo	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	10	0

IMG_B022	1024×768	directo	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	100	1
IMG_B023	1024×768	directo	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	10	0
IMG_B025	1024×768	directo	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	70	1
IMG_B031	1024×768	directo	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	20	0
IMG_B032	1024×768	directo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
IMG_B037	1024×768	directo	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	20	0
IMG_B039	1024×768	directo	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	20	0
IMG_B041	1024×768	directo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
IMG_B044	1024×768	directo	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	20	0
IMG_B050	1024×768	directo	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	30	0
IMG_B056	1024×768	directo	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	40	0
IMG_B061	1024×768	directo	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	10	0
IMG_B062	1024×768	directo	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	10	0
IMG_B063	1024×768	directo	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	100	1
IMG_B064	1024×768	directo	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	100	1
IMG_B065	1024×768	directo	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	100	1
IMG_B066	1024×768	directo	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	90	1
IMG_B067	1024×768	directo	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	90	1
IMG_B068	1024×768	directo	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	80	1
IMG_B070	1024×768	directo	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	50	1
IMG_B071	1024×768	directo	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	70	1
IMG_B072	1024×768	directo	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	100	1
IMG_B073	1024×768	directo	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	100	1
IMG_B075	1024×768	directo	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	90	1
IMG_B076	1024×768	directo	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	50	1

IMG_B077	1024×768	directo	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	100	1
IMG_B078	1024×768	directo	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	90	1
IMG_B079	1024×768	directo	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	80	1
IMG_B080	1024×768	directo	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	20	1
IMG_B001	2560×1920	directo	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	100	1
IMG_B002	2560×1920	directo	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0	80	1
IMG_B003	2560×1920	directo	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	60	1
IMG_B004	2560×1920	directo	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	20	0
IMG_B005	2560×1920	directo	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	30	0
IMG_B006	2560×1920	directo	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	60	1
IMG_B007	2560×1920	directo	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	20	0
IMG_B008	2560×1920	directo	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	50	1
IMG_B009	2560×1920	directo	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	50	1
IMG_B010	2560×1920	directo	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	20	0
IMG_B011	2560×1920	directo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
IMG_B012	2560×1920	directo	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	20	0
IMG_B013	2560×1920	directo	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	100	1
IMG_B014	2560×1920	directo	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	100	1
IMG_B015	2560×1920	directo	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	0	70	1
IMG_B016	2560×1920	directo	0	1	0	1	0	0	1	1	1	0	0	50	0
IMG_B017	2560×1920	directo	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	50	1
IMG_B018	2560×1920	directo	0	0	0	1	1	1	1	0	1	0	0	50	0
IMG_B019	2560×1920	directo	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	30	0
IMG_B020	2560×1920	directo	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	30	0
IMG_B021	2560×1920	directo	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	40	0

IMG_B022	2560×1920	directo	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	30	0
IMG_B023	2560×1920	directo	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	30	0
IMG_B024	2560×1920	directo	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	70	1
IMG_B025	2560×1920	directo	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	30	0
IMG_B026	2560×1920	directo	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	100	1
IMG_B027	2560×1920	directo	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	20	0
IMG_B028	2560×1920	directo	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	20	0
IMG_B029	2560×1920	directo	0	0	0	1	1	0	0	1	1	1	50	0
IMG_B030	2560×1920	directo	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	30	0
IMG_B031	2560×1920	directo	0	1	1	1	0	1	0	0	1	0	50	0
IMG_B032	2560×1920	directo	0	0	1	1	1	0	1	0	0	0	40	0
IMG_B033	2560×1920	directo	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	20	0
IMG_B034	2560×1920	directo	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	30	1
IMG_B035	2560×1920	directo	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	60	1
IMG_B036	2560×1920	directo	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	50	1
IMG_B037	2560×1920	directo	0	0	1	1	0	1	0	1	1	1	60	0
IMG_B038	2560×1920	directo	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	20	0
IMG_B039	2560×1920	directo	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	20	0
IMG_B040	2560×1920	directo	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	20	0
IMG_B041	2560×1920	directo	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	20	0
IMG_B042	2560×1920	directo	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	60	1
IMG_B043	2560×1920	directo	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	20	0
IMG_B044	2560×1920	directo	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	90	1
IMG_B045	2560×1920	directo	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	60	1
IMG_B047	2560×1920	directo	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	30	0

IMG_B048	2560×1920	directo	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	50	1
IMG_B049	2560×1920	directo	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	100	1
IMG_B050	2560×1920	directo	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	80	1
IMG_B051	2560×1920	directo	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	30	0
IMG_B053	2560×1920	directo	0	0	0	1	1	1	1	0	1	0	50	0
IMG_B054	2560×1920	directo	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	100	1
IMG_B055	2560×1920	directo	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	100	1
IMG_B056	2560×1920	directo	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	20	1
IMG_B057	2560×1920	directo	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	30	0
IMG_B059	2560×1920	directo	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	30	0
IMG_B060	2560×1920	directo	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	40	1
IMG_B061	2560×1920	directo	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	90	1
IMG_B062	2560×1920	directo	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	70	1
IMG_B063	2560×1920	directo	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	100	1
IMG_B064	2560×1920	directo	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	90	1
IMG_B065	2560×1920	directo	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	100	1
IMG_B066	2560×1920	directo	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	90	1
IMG_B067	2560×1920	directo	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	90	1
IMG_B068	2560×1920	directo	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	80	1
IMG_B069	2560×1920	directo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
IMG_B070	2560×1920	directo	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	50	1
IMG_B071	2560×1920	directo	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	70	1
IMG_B072	2560×1920	directo	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	100	1
IMG_B073	2560×1920	directo	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	100	1
IMG_B074	2560×1920	directo	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0

IMG_B075	2560×1920	directo	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	80	1
IMG_B076	2560×1920	directo	1	1	1	0	1	1	0	1	0	0	60	1
IMG_B077	2560×1920	directo	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	90	1
IMG_B078	2560×1920	directo	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	90	1
IMG_B079	2560×1920	directo	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	80	1
IMG_B080	2560×1920	directo	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	20	1
IMG_B002	1024×768	otsu	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	10	0
IMG_B003	1024×768	otsu	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	20	0
IMG_B004	1024×768	otsu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
IMG_B005	1024×768	otsu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
IMG_B006	1024×768	otsu	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	10	0
IMG_B007	1024×768	otsu	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	20	0
IMG_B008	1024×768	otsu	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0
IMG_B009	1024×768	otsu	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	30	0
IMG_B010	1024×768	otsu	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	10	0
IMG_B011	1024×768	otsu	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0	40	0
IMG_B012	1024×768	otsu	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	20	0
IMG_B013	1024×768	otsu	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	60	1
IMG_B014	1024×768	otsu	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	30	0
IMG_B016	1024×768	otsu	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0
IMG_B017	1024×768	otsu	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	20	0
IMG_B018	1024×768	otsu	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0
IMG_B019	1024×768	otsu	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	20	0
IMG_B020	1024×768	otsu	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	10	0
IMG_B021	1024×768	otsu	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	10	0

IMG_B022	1024×768	otsu	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	60	1
IMG_B025	1024×768	otsu	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	50	1
IMG_B026	1024×768	otsu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
IMG_B028	1024×768	otsu	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	30	0
IMG_B029	1024×768	otsu	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	10	0
IMG_B030	1024×768	otsu	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	20	0
IMG_B033	1024×768	otsu	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	20	0
IMG_B034	1024×768	otsu	1	1	0	1	0	1	0	0	0	0	40	0
IMG_B035	1024×768	otsu	0	0	0	1	0	1	1	0	1	0	40	0
IMG_B036	1024×768	otsu	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	30	0
IMG_B037	1024×768	otsu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
IMG_B038	1024×768	otsu	0	1	0	0	0	1	1	1	0	1	50	0
IMG_B039	1024×768	otsu	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	10	0
IMG_B040	1024×768	otsu	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	30	0
IMG_B041	1024×768	otsu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
IMG_B043	1024×768	otsu	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	10	0
IMG_B044	1024×768	otsu	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	10	0
IMG_B045	1024×768	otsu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
IMG_B046	1024×768	otsu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
IMG_B049	1024×768	otsu	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	10	0
IMG_B050	1024×768	otsu	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	10	0
IMG_B051	1024×768	otsu	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	20	0
IMG_B054	1024×768	otsu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
IMG_B055	1024×768	otsu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
IMG_B056	1024×768	otsu	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	20	0

IMG_B057	1024×768	otsu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
IMG_B061	1024×768	otsu	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	10	0
IMG_B063	1024×768	otsu	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	100	1
IMG_B065	1024×768	otsu	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	100	1
IMG_B066	1024×768	otsu	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	90	1
IMG_B068	1024×768	otsu	1	1	1	0	0	1	0	1	1	1	70	1
IMG_B069	1024×768	otsu	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	50	0
IMG_B070	1024×768	otsu	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	20	0
IMG_B071	1024×768	otsu	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	10	0
IMG_B072	1024×768	otsu	0	1	0	1	0	1	1	0	0	0	40	0
IMG_B073	1024×768	otsu	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	30	0
IMG_B074	1024×768	otsu	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	10	0
IMG_B075	1024×768	otsu	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	20	0
IMG_B076	1024×768	otsu	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0	40	0
IMG_B077	1024×768	otsu	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	20	0
IMG_B078	1024×768	otsu	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	20	0
IMG_B079	1024×768	otsu	0	1	0	1	1	1	1	0	0	0	50	0
IMG_B080	1024×768	otsu	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	20	0
IMG_B001	2560×1920	otsu	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	20	0
IMG_B002	2560×1920	otsu	1	1	0	1	1	1	1	0	0	0	60	0
IMG_B003	2560×1920	otsu	1	1	0	1	0	1	1	0	0	0	50	0
IMG_B004	2560×1920	otsu	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	10	0
IMG_B005	2560×1920	otsu	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	10	0
IMG_B006	2560×1920	otsu	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	70	0
IMG_B007	2560×1920	otsu	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	20	0

IMG_B008	2560×1920	otsu	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	20	0
IMG_B009	2560×1920	otsu	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	20	0
IMG_B010	2560×1920	otsu	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	20	0
IMG_B011	2560×1920	otsu	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	30	0
IMG_B012	2560×1920	otsu	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	30	0
IMG_B013	2560×1920	otsu	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	70	1
IMG_B014	2560×1920	otsu	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	40	0
IMG_B015	2560×1920	otsu	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	50	1
IMG_B016	2560×1920	otsu	0	1	1	1	0	1	0	1	0	0	50	0
IMG_B017	2560×1920	otsu	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	50	1
IMG_B018	2560×1920	otsu	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	40	1
IMG_B019	2560×1920	otsu	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	30	0
IMG_B020	2560×1920	otsu	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	30	0
IMG_B021	2560×1920	otsu	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	80	0
IMG_B022	2560×1920	otsu	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	80	1
IMG_B023	2560×1920	otsu	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	50	1
IMG_B024	2560×1920	otsu	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	50	1
IMG_B025	2560×1920	otsu	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	70	1
IMG_B026	2560×1920	otsu	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	50	1
IMG_B027	2560×1920	otsu	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	20	1
IMG_B028	2560×1920	otsu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
IMG_B029	2560×1920	otsu	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	30	0
IMG_B030	2560×1920	otsu	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	20	0
IMG_B031	2560×1920	otsu	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	30	0
IMG_B032	2560×1920	otsu	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	20	0

IMG_B033	2560×1920	otsu	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	20	0
IMG_B034	2560×1920	otsu	0	0	1	1	1	0	0	0	1	0	40	0
IMG_B035	2560×1920	otsu	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	20	0
IMG_B036	2560×1920	otsu	1	1	0	1	0	1	1	0	0	0	50	0
IMG_B037	2560×1920	otsu	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	20	0
IMG_B038	2560×1920	otsu	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0	40	0
IMG_B039	2560×1920	otsu	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	20	0
IMG_B040	2560×1920	otsu	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	10	0
IMG_B041	2560×1920	otsu	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	20	0
IMG_B042	2560×1920	otsu	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0	50	0
IMG_B043	2560×1920	otsu	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	30	0
IMG_B044	2560×1920	otsu	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	10	0
IMG_B045	2560×1920	otsu	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	20	0
IMG_B046	2560×1920	otsu	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	20	0
IMG_B047	2560×1920	otsu	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	10	0
IMG_B048	2560×1920	otsu	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	30	0
IMG_B049	2560×1920	otsu	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0
IMG_B050	2560×1920	otsu	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	20	0
IMG_B051	2560×1920	otsu	0	1	0	1	1	0	1	0	0	0	40	0
IMG_B052	2560×1920	otsu	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	20	0
IMG_B054	2560×1920	otsu	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	20	0
IMG_B055	2560×1920	otsu	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	20	0
IMG_B056	2560×1920	otsu	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	30	0
IMG_B057	2560×1920	otsu	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	30	0
IMG_B058	2560×1920	otsu	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	20	0

IMG_B060	2560×1920	otsu	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	30	0
IMG_B061	2560×1920	otsu	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	10	0
IMG_B062	2560×1920	otsu	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	20	0
IMG_B063	2560×1920	otsu	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	100	1
IMG_B065	2560×1920	otsu	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	100	1
IMG_B066	2560×1920	otsu	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	80	1
IMG_B067	2560×1920	otsu	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	20	0
IMG_B068	2560×1920	otsu	1	1	1	0	0	1	0	1	1	1	70	1
IMG_B069	2560×1920	otsu	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	20	0
IMG_B070	2560×1920	otsu	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	30	0
IMG_B071	2560×1920	otsu	0	1	0	1	1	1	1	0	0	0	50	0
IMG_B072	2560×1920	otsu	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	30	0
IMG_B073	2560×1920	otsu	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	30	0
IMG_B074	2560×1920	otsu	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	20	0
IMG_B075	2560×1920	otsu	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	20	0
IMG_B076	2560×1920	otsu	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	40	0
IMG_B077	2560×1920	otsu	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	30	0
IMG_B078	2560×1920	otsu	0	1	0	1	0	1	1	1	1	0	60	0
IMG_B079	2560×1920	otsu	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	20	0
IMG_B080	2560×1920	otsu	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	30	0

Tabla A2 – Detalle de resultados para las imágenes experimentales del método 1

Anexo II

Las tablas B1-B3 muestran las relaciones relativas al área, la distancia y los ángulos utilizados en la función de probabilidad de reconocimiento en el método 2. Para ser considerado un acierto, la relación debe cumplirse. Todos los valores numéricos para cada medida de similitud se calcularon utilizando la perspectiva cenital que se muestra en la figura 4-1. Se proporciona flexibilidad adicional mediante un umbral disponible que ha sido estimado durante la fase experimental a través de un proceso de ajuste fino.

Tabla B1

Quince medidas en base al área usadas por la función de probabilidad de reconocimiento en el método 2. Estas medidas de similitud comparan el área entre las regiones que se muestran en la figura 4-1. Se utiliza un umbral del 60%, obtenido por medio de un ajuste fino durante la fase experimental, para realizar el reconocimiento ante cualquier tipo de perspectiva.

	Relaciones basadas en áreas con ArT = 0.6
Ar01	$ \text{LEB.Area} / \text{LE.Area} - 0.4078 \leq 0.4078 * \text{ArT};$
Ar02	$ \text{LEB.Area} / \text{REB.Area} - 0.5093 \leq 0.5093 * \text{ArT};$
Ar03	$ \text{LEB.Area} / \text{RE.Area} - 0.5990 \leq 0.5990 * \text{ArT};$
Ar04	$ \text{LEB.Area} / \text{N.Area} - 0.6516 \leq 0.6516 * \text{ArT};$
Ar05	$ \text{LEB.Area} / \text{M.Area} - 0.3002 \leq 0.3002 * \text{ArT};$
Ar06	$ \text{LE.Area} / \text{REB.Area} - 1.4001 \leq 1.4001 * \text{ArT};$
Ar07	$ \text{LE.Area} / \text{RE.Area} - 1.4946 \leq 1.4946 * \text{ArT};$
Ar08	$ \text{LE.Area} / \text{N.Area} - 1.7910 \leq 1.7910 * \text{ArT};$
Ar09	$ \text{LE.Area} / \text{M.Area} - 0.7359 \leq 0.7359 * \text{ArT};$
Ar10	$ \text{REB.Area} / \text{RE.Area} - 1.1760 \leq 1.1760 * \text{ArT};$
Ar11	$ \text{REB.Area} / \text{N.Area} - 1.2792 \leq 1.2792 * \text{ArT};$
Ar12	$ \text{REB.Area} / \text{M.Area} - 0.5612 \leq 0.5612 * \text{ArT};$
Ar13	$ \text{RE.Area} / \text{N.Area} - 1.0878 \leq 1.0878 * \text{ArT};$
Ar14	$ \text{RE.Area} / \text{M.Area} - 0.4924 \leq 0.4924 * \text{ArT};$
Ar15	$ \text{N.Area} / \text{M.Area} - 0.4387 \leq 0.4387 * \text{ArT};$

Tabla B1 – Ecuaciones basadas en el área para obtener el grado de reconocimiento del método 2

Tabla B2

Ciento cinco medidas que relacionan las distancias entre centroides usadas en la función de probabilidad de reconocimiento con relación al *método 2*. Estas medidas de similitud comparan la distancia entre el centroide de las regiones que se muestran en la figura 4-1. Se utiliza un umbral del 55%, obtenido por medio de un ajuste fino durante la fase experimental para realizar el reconocimiento ante cualquier tipo de perspectiva.

	Relaciones basadas en la distancia entre centroides con DT = 0.55
Dst01	$ d(\text{LEB_LE}) / d(\text{LEB_REB}) - 0.5 \leq 0.5 * \text{DT}$
Dst02	$ d(\text{LEB_LE}) / d(\text{LEB_RE}) - 0.4444 \leq 0.4444 * \text{DT}$
Dst03	$ d(\text{LEB_LE}) / d(\text{LEB_N}) - 0.7071 \leq 0.7071 * \text{DT}$
Dst04	$ d(\text{LEB_LE}) / d(\text{LEB_M}) - 0.4444 \leq 0.4444 * \text{DT}$
Dst05	$ d(\text{LEB_LE}) / d(\text{LE_REB}) - 0.4444 \leq 0.4444 * \text{DT}$
Dst06	$ d(\text{LEB_LE}) / d(\text{LE_RE}) - 0.5 \leq 0.5 * \text{DT}$
Dst07	$ d(\text{LEB_LE}) / d(\text{LE_N}) - 1 \leq 1 * \text{DT}$
Dst08	$ d(\text{LEB_LE}) / d(\text{LE_M}) - 0.7071 \leq 0.7071 * \text{DT}$
Dst09	$ d(\text{LEB_LE}) / d(\text{REB_RE}) - 1 \leq 1 * \text{DT}$
Dst10	$ d(\text{LEB_LE}) / d(\text{REB_N}) - 0.7071 \leq 0.7071 * \text{DT}$
Dst11	$ d(\text{LEB_LE}) / d(\text{REB_M}) - 0.4444 \leq 0.4444 * \text{DT}$
Dst12	$ d(\text{LEB_LE}) / d(\text{RE_N}) - 1 \leq 1 * \text{DT}$
Dst13	$ d(\text{LEB_LE}) / d(\text{RE_M}) - 0.7071 \leq 0.7071 * \text{DT}$
Dst14	$ d(\text{LEB_LE}) / d(\text{N_M}) - 1 \leq 1 * \text{DT}$
Dst15	$ d(\text{LEB_REB}) / d(\text{LEB_RE}) - 0.8888 \leq 0.8888 * \text{DT}$
Dst16	$ d(\text{LEB_REB}) / d(\text{LEB_N}) - 1.4142 \leq 1.4142 * \text{DT}$
Dst17	$ d(\text{LEB_REB}) / d(\text{LEB_M}) - 0.8888 \leq 0.8888 * \text{DT}$
Dst18	$ d(\text{LEB_REB}) / d(\text{LE_REB}) - 0.8888 \leq 0.8888 * \text{DT}$
Dst19	$ d(\text{LEB_REB}) / d(\text{LE_RE}) - 1 \leq 1 * \text{DT}$
Dst20	$ d(\text{LEB_REB}) / d(\text{LE_N}) - 2 \leq 2 * \text{DT}$
Dst21	$ d(\text{LEB_REB}) / d(\text{LE_M}) - 1.4142 \leq 1.4142 * \text{DT}$
Dst22	$ d(\text{LEB_REB}) / d(\text{REB_RE}) - 2 \leq 2 * \text{DT}$
Dst23	$ d(\text{LEB_REB}) / d(\text{REB_N}) - 1.4142 \leq 1.4142 * \text{DT}$
Dst24	$ d(\text{LEB_REB}) / d(\text{REB_M}) - 0.8888 \leq 0.8888 * \text{DT}$
Dst25	$ d(\text{LEB_REB}) / d(\text{RE_N}) - 2 \leq 2 * \text{DT}$
Dst26	$ d(\text{LEB_REB}) / d(\text{RE_M}) - 1.4142 \leq 1.4142 * \text{DT}$
Dst27	$ d(\text{LEB_REB}) / d(\text{N_M}) - 2 \leq 2 * \text{DT}$
Dst28	$ d(\text{LEB_RE}) / d(\text{LEB_N}) - 1.5910 \leq 1.5910 * \text{DT}$
Dst29	$ d(\text{LEB_RE}) / d(\text{LEB_M}) - 1 \leq 1 * \text{DT}$
Dst30	$ d(\text{LEB_RE}) / d(\text{LE_REB}) - 1 \leq 1 * \text{DT}$
Dst31	$ d(\text{LEB_RE}) / d(\text{LE_RE}) - 1.125 \leq 1.125 * \text{DT}$
Dst32	$ d(\text{LEB_RE}) / d(\text{LE_N}) - 2.25 \leq 2.25 * \text{DT}$
Dst33	$ d(\text{LEB_RE}) / d(\text{LE_M}) - 1.5910 \leq 1.5910 * \text{DT}$
Dst34	$ d(\text{LEB_RE}) / d(\text{REB_RE}) - 2.25 \leq 2.25 * \text{DT}$
Dst35	$ d(\text{LEB_RE}) / d(\text{REB_N}) - 1.5910 \leq 1.5910 * \text{DT}$
Dst36	$ d(\text{LEB_RE}) / d(\text{REB_M}) - 1 \leq 1 * \text{DT}$
Dst37	$ d(\text{LEB_RE}) / d(\text{RE_N}) - 2.25 \leq 2.25 * \text{DT}$
Dst38	$ d(\text{LEB_RE}) / d(\text{RE_M}) - 1.5910 \leq 1.5910 * \text{DT}$
Dst39	$ d(\text{LEB_RE}) / d(\text{N_M}) - 2.25 \leq 2.25 * \text{DT}$
Dst40	$ d(\text{LEB_N}) / d(\text{LEB_M}) - 0.6285 \leq 0.6285 * \text{DT}$
Dst41	$ d(\text{LEB_N}) / d(\text{LE_REB}) - 0.6285 \leq 0.6285 * \text{DT}$
Dst42	$ d(\text{LEB_N}) / d(\text{LE_RE}) - 0.7071 \leq 0.7071 * \text{DT}$
Dst43	$ d(\text{LEB_N}) / d(\text{LE_N}) - 1.4142 \leq 1.4142 * \text{DT}$
Dst44	$ d(\text{LEB_N}) / d(\text{LE_M}) - 1 \leq 1 * \text{DT}$
Dst45	$ d(\text{LEB_N}) / d(\text{REB_RE}) - 1.4142 \leq 1.4142 * \text{DT}$
Dst46	$ d(\text{LEB_N}) / d(\text{REB_N}) - 1 \leq 1 * \text{DT}$
Dst47	$ d(\text{LEB_N}) / d(\text{REB_M}) - 0.6285 \leq 0.6285 * \text{DT}$
Dst48	$ d(\text{LEB_N}) / d(\text{RE_N}) - 1.4142 \leq 1.4142 * \text{DT}$
Dst49	$ d(\text{LEB_N}) / d(\text{RE_M}) - 1 \leq 1 * \text{DT}$

Dst50	$ d(\text{LEB_N}) / d(\text{N_M}) - 1.4142 \leq 1.4142 * \text{DT}$
Dst51	$ d(\text{LEB_M}) / d(\text{LE_REB}) - 1 \leq 1 * \text{DT}$
Dst52	$ d(\text{LEB_M}) / d(\text{LE_RE}) - 1.125 \leq 1.125 * \text{DT}$
Dst53	$ d(\text{LEB_M}) / d(\text{LE_N}) - 2.25 \leq 2.25 * \text{DT}$
Dst54	$ d(\text{LEB_M}) / d(\text{LE_M}) - 1.5910 \leq 1.5910 * \text{DT}$
Dst55	$ d(\text{LEB_M}) / d(\text{REB_RE}) - 2.25 \leq 2.25 * \text{DT}$
Dst56	$ d(\text{LEB_M}) / d(\text{REB_N}) - 1.5910 \leq 1.5910 * \text{DT}$
Dst57	$ d(\text{LEB_M}) / d(\text{REB_M}) - 1 \leq 1 * \text{DT}$
Dst58	$ d(\text{LEB_M}) / d(\text{RE_N}) - 2.25 \leq 2.25 * \text{DT}$
Dst59	$ d(\text{LEB_M}) / d(\text{RE_M}) - 1.5910 \leq 1.5910 * \text{DT}$
Dst60	$ d(\text{LEB_M}) / d(\text{N_M}) - 2.25 \leq 2.25 * \text{DT}$
Dst61	$ d(\text{LE_REB}) / d(\text{LE_RE}) - 1.125 \leq 1.125 * \text{DT}$
Dst62	$ d(\text{LE_REB}) / d(\text{LE_N}) - 2.25 \leq 2.25 * \text{DT}$
Dst63	$ d(\text{LE_REB}) / d(\text{LE_M}) - 1.5910 \leq 1.5910 * \text{DT}$
Dst64	$ d(\text{LE_REB}) / d(\text{REB_RE}) - 2.25 \leq 2.25 * \text{DT}$
Dst65	$ d(\text{LE_REB}) / d(\text{REB_N}) - 1.5910 \leq 1.5910 * \text{DT}$
Dst66	$ d(\text{LE_REB}) / d(\text{REB_M}) - 1 \leq 1 * \text{DT}$
Dst67	$ d(\text{LE_REB}) / d(\text{RE_N}) - 2.25 \leq 2.25 * \text{DT}$
Dst68	$ d(\text{LE_REB}) / d(\text{RE_M}) - 1.5910 \leq 1.5910 * \text{DT}$
Dst69	$ d(\text{LE_REB}) / d(\text{N_M}) - 2.25 \leq 2.25 * \text{DT}$
Dst70	$ d(\text{LE_RE}) / d(\text{LE_N}) - 2 \leq 2 * \text{DT}$
Dst71	$ d(\text{LE_RE}) / d(\text{LE_M}) - 1.4142 \leq 1.4142 * \text{DT}$
Dst72	$ d(\text{LE_RE}) / d(\text{REB_RE}) - 2 \leq 2 * \text{DT}$
Dst73	$ d(\text{LE_RE}) / d(\text{REB_N}) - 1.4142 \leq 1.4142 * \text{DT}$
Dst74	$ d(\text{LE_RE}) / d(\text{REB_M}) - 0.8888 \leq 0.8888 * \text{DT}$
Dst75	$ d(\text{LE_RE}) / d(\text{RE_N}) - 2 \leq 2 * \text{DT}$
Dst76	$ d(\text{LE_RE}) / d(\text{RE_M}) - 1.4142 \leq 1.4142 * \text{DT}$
Dst77	$ d(\text{LE_RE}) / d(\text{N_M}) - 2 \leq 2 * \text{DT}$
Dst78	$ d(\text{LE_N}) / d(\text{LE_M}) - 0.7071 \leq 0.7071 * \text{DT}$
Dst79	$ d(\text{LE_N}) / d(\text{REB_RE}) - 1 \leq 1 * \text{DT}$
Dst80	$ d(\text{LE_N}) / d(\text{REB_N}) - 0.7071 \leq 0.7071 * \text{DT}$
Dst81	$ d(\text{LE_N}) / d(\text{REB_M}) - 0.4444 \leq 0.4444 * \text{DT}$
Dst82	$ d(\text{LE_N}) / d(\text{RE_N}) - 1 \leq 1 * \text{DT}$
Dst83	$ d(\text{LE_N}) / d(\text{RE_M}) - 0.7071 \leq 0.7071 * \text{DT}$
Dst84	$ d(\text{LE_N}) / d(\text{N_M}) - 1 \leq 1 * \text{DT}$
Dst85	$ d(\text{LE_M}) / d(\text{REB_RE}) - 1.4142 \leq 1.4142 * \text{DT}$
Dst86	$ d(\text{LE_M}) / d(\text{REB_N}) - 1 \leq 1 * \text{DT}$
Dst87	$ d(\text{LE_M}) / d(\text{REB_M}) - 0.6285 \leq 0.6285 * \text{DT}$
Dst88	$ d(\text{LE_M}) / d(\text{RE_N}) - 1.4142 \leq 1.4142 * \text{DT}$
Dst89	$ d(\text{LE_M}) / d(\text{RE_M}) - 1 \leq 1 * \text{DT}$
Dst90	$ d(\text{LE_M}) / d(\text{N_M}) - 1.4142 \leq 1.4142 * \text{DT}$
Dst91	$ d(\text{REB_RE}) / d(\text{REB_N}) - 0.7071 \leq 0.7071 * \text{DT}$
Dst92	$ d(\text{REB_RE}) / d(\text{REB_M}) - 0.4444 \leq 0.4444 * \text{DT}$
Dst93	$ d(\text{REB_RE}) / d(\text{RE_N}) - 1 \leq 1 * \text{DT}$
Dst94	$ d(\text{REB_RE}) / d(\text{RE_M}) - 0.7071 \leq 0.7071 * \text{DT}$
Dst95	$ d(\text{REB_RE}) / d(\text{N_M}) - 1 \leq 1 * \text{DT}$
Dst96	$ d(\text{REB_N}) / d(\text{REB_M}) - 0.6285 \leq 0.6285 * \text{DT}$
Dst97	$ d(\text{REB_N}) / d(\text{RE_N}) - 1.4142 \leq 1.4142 * \text{DT}$
Dst98	$ d(\text{REB_N}) / d(\text{RE_M}) - 1 \leq 1 * \text{DT}$
Dst99	$ d(\text{REB_N}) / d(\text{N_M}) - 1.4142 \leq 1.4142 * \text{DT}$
Dst100	$ d(\text{REB_M}) / d(\text{RE_N}) - 2.25 \leq 2.25 * \text{DT}$
Dst101	$ d(\text{REB_M}) / d(\text{RE_M}) - 1.5910 \leq 1.5910 * \text{DT}$
Dst102	$ d(\text{REB_M}) / d(\text{N_M}) - 2.25 \leq 2.25 * \text{DT}$
Dst103	$ d(\text{RE_N}) / d(\text{RE_M}) - 0.7071 \leq 0.7071 * \text{DT}$
Dst104	$ d(\text{RE_N}) / d(\text{N_M}) - 1 \leq 1 * \text{DT}$
Dst105	$ d(\text{RE_M}) / d(\text{N_M}) - 1.4142 \leq 1.4142 * \text{DT}$

Tabla B2 – Ecuaciones basadas en la distancia para obtener el grado de reconocimiento del método 2

Tabla B3

Ciento cinco medidas basadas en distancias angulares utilizadas en la función de probabilidad de reconocimiento con relación al método 2. Estas medidas de similitud comparan la diferencia de los ángulos generados por la intersección de la línea recta que une los centroides de las regiones con respecto a la base de la imagen, es decir, la línea horizontal inferior de la imagen. Se extienden en el rango $[0, 360)$. Se usa un umbral del 40° , obtenido por medio de un ajuste fino durante la fase experimental, para hacer frente a la distorsión de la proyección en perspectiva.

	Relaciones basadas en la diferencia entre ángulos con $AgT = 40^\circ$
Ang01	$ \text{ang}(\text{LEB_LE, OX}) - \text{ang}(\text{LEB_REB, OX}) - 90^\circ \leq AgT$
Ang02	$ \text{ang}(\text{LEB_LE, OX}) - \text{ang}(\text{LEB_RE, OX}) - 63.43^\circ \leq AgT$
Ang03	$ \text{ang}(\text{LEB_LE, OX}) - \text{ang}(\text{LEB_N, OX}) - 45^\circ \leq AgT$
Ang04	$ \text{ang}(\text{LEB_LE, OX}) - \text{ang}(\text{LEB_M, OX}) - 26.18^\circ \leq AgT$
Ang05	$ \text{ang}(\text{LEB_LE, OX}) - \text{ang}(\text{LE_REB, OX}) - 116.64^\circ \leq AgT$
Ang06	$ \text{ang}(\text{LEB_LE, OX}) - \text{ang}(\text{LE_RE, OX}) - 90^\circ \leq AgT$
Ang07	$ \text{ang}(\text{LEB_LE, OX}) - \text{ang}(\text{LE_N, OX}) - 90^\circ \leq AgT$
Ang08	$ \text{ang}(\text{LEB_LE, OX}) - \text{ang}(\text{LE_M, OX}) - 45^\circ \leq AgT$
Ang09	$ \text{ang}(\text{LEB_LE, OX}) - \text{ang}(\text{REB_RE, OX}) - 0^\circ \leq AgT$
Ang10	$ \text{ang}(\text{LEB_LE, OX}) - \text{ang}(\text{REB_N, OX}) - 45^\circ \leq AgT$
Ang11	$ \text{ang}(\text{LEB_LE, OX}) - \text{ang}(\text{REB_M, OX}) - 26.18^\circ \leq AgT$
Ang12	$ \text{ang}(\text{LEB_LE, OX}) - \text{ang}(\text{RE_N, OX}) - 90^\circ \leq AgT$
Ang13	$ \text{ang}(\text{LEB_LE, OX}) - \text{ang}(\text{RE_M, OX}) - 45^\circ \leq AgT$
Ang14	$ \text{ang}(\text{LEB_LE, OX}) - \text{ang}(\text{N_M, OX}) - 0^\circ \leq AgT$
Ang15	$ \text{ang}(\text{LEB_REB, OX}) - \text{ang}(\text{LEB_RE, OX}) - 26.18^\circ \leq AgT$
Ang16	$ \text{ang}(\text{LEB_REB, OX}) - \text{ang}(\text{LEB_N, OX}) - 45^\circ \leq AgT$
Ang17	$ \text{ang}(\text{LEB_REB, OX}) - \text{ang}(\text{LEB_M, OX}) - 63.43^\circ \leq AgT$
Ang18	$ \text{ang}(\text{LEB_REB, OX}) - \text{ang}(\text{LE_REB, OX}) - 26.18^\circ \leq AgT$
Ang19	$ \text{ang}(\text{LEB_REB, OX}) - \text{ang}(\text{LE_RE, OX}) - 0^\circ \leq AgT$
Ang20	$ \text{ang}(\text{LEB_REB, OX}) - \text{ang}(\text{LE_N, OX}) - 0^\circ \leq AgT$
Ang21	$ \text{ang}(\text{LEB_REB, OX}) - \text{ang}(\text{LE_M, OX}) - 45^\circ \leq AgT$
Ang22	$ \text{ang}(\text{LEB_REB, OX}) - \text{ang}(\text{REB_RE, OX}) - 90^\circ \leq AgT$
Ang23	$ \text{ang}(\text{LEB_REB, OX}) - \text{ang}(\text{REB_N, OX}) - 135^\circ \leq AgT$
Ang24	$ \text{ang}(\text{LEB_REB, OX}) - \text{ang}(\text{REB_M, OX}) - 116.64^\circ \leq AgT$
Ang25	$ \text{ang}(\text{LEB_REB, OX}) - \text{ang}(\text{RE_N, OX}) - 180^\circ \leq AgT$
Ang26	$ \text{ang}(\text{LEB_REB, OX}) - \text{ang}(\text{RE_M, OX}) - 135^\circ \leq AgT$
Ang27	$ \text{ang}(\text{LEB_REB, OX}) - \text{ang}(\text{N_M, OX}) - 90^\circ \leq AgT$
Ang28	$ \text{ang}(\text{LEB_RE, OX}) - \text{ang}(\text{LEB_N, OX}) - 18^\circ \leq AgT$
Ang29	$ \text{ang}(\text{LEB_RE, OX}) - \text{ang}(\text{LEB_M, OX}) - 36.5^\circ \leq AgT$
Ang30	$ \text{ang}(\text{LEB_RE, OX}) - \text{ang}(\text{LE_REB, OX}) - 53.5^\circ \leq AgT$
Ang31	$ \text{ang}(\text{LEB_RE, OX}) - \text{ang}(\text{LE_RE, OX}) - 26.18^\circ \leq AgT$
Ang32	$ \text{ang}(\text{LEB_RE, OX}) - \text{ang}(\text{LE_N, OX}) - 26.18^\circ \leq AgT$
Ang33	$ \text{ang}(\text{LEB_RE, OX}) - \text{ang}(\text{LE_M, OX}) - 18^\circ \leq AgT$
Ang34	$ \text{ang}(\text{LEB_RE, OX}) - \text{ang}(\text{REB_RE, OX}) - 63.43^\circ \leq AgT$
Ang35	$ \text{ang}(\text{LEB_RE, OX}) - \text{ang}(\text{REB_N, OX}) - 108^\circ \leq AgT$
Ang36	$ \text{ang}(\text{LEB_RE, OX}) - \text{ang}(\text{REB_M, OX}) - 90^\circ \leq AgT$
Ang37	$ \text{ang}(\text{LEB_RE, OX}) - \text{ang}(\text{RE_N, OX}) - 155^\circ \leq AgT$
Ang38	$ \text{ang}(\text{LEB_RE, OX}) - \text{ang}(\text{RE_M, OX}) - 108^\circ \leq AgT$
Ang39	$ \text{ang}(\text{LEB_RE, OX}) - \text{ang}(\text{N_M, OX}) - 63.43^\circ \leq AgT$
Ang40	$ \text{ang}(\text{LEB_N, OX}) - \text{ang}(\text{LEB_M, OX}) - 18^\circ \leq AgT$
Ang41	$ \text{ang}(\text{LEB_N, OX}) - \text{ang}(\text{LE_REB, OX}) - 71^\circ \leq AgT$
Ang42	$ \text{ang}(\text{LEB_N, OX}) - \text{ang}(\text{LE_RE, OX}) - 45^\circ \leq AgT$
Ang43	$ \text{ang}(\text{LEB_N, OX}) - \text{ang}(\text{LE_N, OX}) - 45^\circ \leq AgT$
Ang44	$ \text{ang}(\text{LEB_N, OX}) - \text{ang}(\text{LE_M, OX}) - 0^\circ \leq AgT$
Ang45	$ \text{ang}(\text{LEB_N, OX}) - \text{ang}(\text{REB_RE, OX}) - 45^\circ \leq AgT$
Ang46	$ \text{ang}(\text{LEB_N, OX}) - \text{ang}(\text{REB_N, OX}) - 90^\circ \leq AgT$
Ang47	$ \text{ang}(\text{LEB_N, OX}) - \text{ang}(\text{REB_M, OX}) - 71^\circ \leq AgT$

Ang48	$ \text{ang}(\text{LEB}_N, \text{OX}) - \text{ang}(\text{RE}_N, \text{OX}) - 135^\circ \leq \text{AgT}$
Ang49	$ \text{ang}(\text{LEB}_N, \text{OX}) - \text{ang}(\text{RE}_M, \text{OX}) - 90^\circ \leq \text{AgT}$
Ang50	$ \text{ang}(\text{LEB}_N, \text{OX}) - \text{ang}(\text{N}_M, \text{OX}) - 45^\circ \leq \text{AgT}$
Ang51	$ \text{ang}(\text{LEB}_M, \text{OX}) - \text{ang}(\text{LE_REB}, \text{OX}) - 90^\circ \leq \text{AgT}$
Ang52	$ \text{ang}(\text{LEB}_M, \text{OX}) - \text{ang}(\text{LE_RE}, \text{OX}) - 63.43^\circ \leq \text{AgT}$
Ang53	$ \text{ang}(\text{LEB}_M, \text{OX}) - \text{ang}(\text{LE}_N, \text{OX}) - 63.43^\circ \leq \text{AgT}$
Ang54	$ \text{ang}(\text{LEB}_M, \text{OX}) - \text{ang}(\text{LE}_M, \text{OX}) - 18^\circ \leq \text{AgT}$
Ang55	$ \text{ang}(\text{LEB}_M, \text{OX}) - \text{ang}(\text{REB_RE}, \text{OX}) - 26^\circ \leq \text{AgT}$
Ang56	$ \text{ang}(\text{LEB}_M, \text{OX}) - \text{ang}(\text{REB}_N, \text{OX}) - 71^\circ \leq \text{AgT}$
Ang57	$ \text{ang}(\text{LEB}_M, \text{OX}) - \text{ang}(\text{REB}_M, \text{OX}) - 52^\circ \leq \text{AgT}$
Ang58	$ \text{ang}(\text{LEB}_M, \text{OX}) - \text{ang}(\text{RE}_N, \text{OX}) - 118^\circ \leq \text{AgT}$
Ang59	$ \text{ang}(\text{LEB}_M, \text{OX}) - \text{ang}(\text{RE}_M, \text{OX}) - 71^\circ \leq \text{AgT}$
Ang60	$ \text{ang}(\text{LEB}_M, \text{OX}) - \text{ang}(\text{N}_M, \text{OX}) - 26^\circ \leq \text{AgT}$
Ang61	$ \text{ang}(\text{LE_REB}, \text{OX}) - \text{ang}(\text{LE_RE}, \text{OX}) - 26^\circ \leq \text{AgT}$
Ang62	$ \text{ang}(\text{LE_REB}, \text{OX}) - \text{ang}(\text{LE}_N, \text{OX}) - 26^\circ \leq \text{AgT}$
Ang63	$ \text{ang}(\text{LE_REB}, \text{OX}) - \text{ang}(\text{LE}_M, \text{OX}) - 72^\circ \leq \text{AgT}$
Ang64	$ \text{ang}(\text{LE_REB}, \text{OX}) - \text{ang}(\text{REB_RE}, \text{OX}) - 115^\circ \leq \text{AgT}$
Ang65	$ \text{ang}(\text{LE_REB}, \text{OX}) - \text{ang}(\text{REB}_N, \text{OX}) - 162^\circ \leq \text{AgT}$
Ang66	$ \text{ang}(\text{LE_REB}, \text{OX}) - \text{ang}(\text{REB}_M, \text{OX}) - 142^\circ \leq \text{AgT}$
Ang67	$ \text{ang}(\text{LE_REB}, \text{OX}) - \text{ang}(\text{RE}_N, \text{OX}) - 151^\circ \leq \text{AgT}$
Ang68	$ \text{ang}(\text{LE_REB}, \text{OX}) - \text{ang}(\text{RE}_M, \text{OX}) - 162^\circ \leq \text{AgT}$
Ang69	$ \text{ang}(\text{LE_REB}, \text{OX}) - \text{ang}(\text{N}_M, \text{OX}) - 116^\circ \leq \text{AgT}$
Ang70	$ \text{ang}(\text{LE_RE}, \text{OX}) - \text{ang}(\text{LE}_N, \text{OX}) - 0^\circ \leq \text{AgT}$
Ang71	$ \text{ang}(\text{LE_RE}, \text{OX}) - \text{ang}(\text{LE}_M, \text{OX}) - 45^\circ \leq \text{AgT}$
Ang72	$ \text{ang}(\text{LE_RE}, \text{OX}) - \text{ang}(\text{REB_RE}, \text{OX}) - 90^\circ \leq \text{AgT}$
Ang73	$ \text{ang}(\text{LE_RE}, \text{OX}) - \text{ang}(\text{REB}_N, \text{OX}) - 135^\circ \leq \text{AgT}$
Ang74	$ \text{ang}(\text{LE_RE}, \text{OX}) - \text{ang}(\text{REB}_M, \text{OX}) - 115^\circ \leq \text{AgT}$
Ang75	$ \text{ang}(\text{LE_RE}, \text{OX}) - \text{ang}(\text{RE}_N, \text{OX}) - 180^\circ \leq \text{AgT}$
Ang76	$ \text{ang}(\text{LE_RE}, \text{OX}) - \text{ang}(\text{RE}_M, \text{OX}) - 135^\circ \leq \text{AgT}$
Ang77	$ \text{ang}(\text{LE_RE}, \text{OX}) - \text{ang}(\text{N}_M, \text{OX}) - 90^\circ \leq \text{AgT}$
Ang78	$ \text{ang}(\text{LE}_N, \text{OX}) - \text{ang}(\text{LE}_M, \text{OX}) - 45^\circ \leq \text{AgT}$
Ang79	$ \text{ang}(\text{LE}_N, \text{OX}) - \text{ang}(\text{REB_RE}, \text{OX}) - 90^\circ \leq \text{AgT}$
Ang80	$ \text{ang}(\text{LE}_N, \text{OX}) - \text{ang}(\text{REB}_N, \text{OX}) - 135^\circ \leq \text{AgT}$
Ang81	$ \text{ang}(\text{LE}_N, \text{OX}) - \text{ang}(\text{REB}_M, \text{OX}) - 116^\circ \leq \text{AgT}$
Ang82	$ \text{ang}(\text{LE}_N, \text{OX}) - \text{ang}(\text{RE}_N, \text{OX}) - 180^\circ \leq \text{AgT}$
Ang83	$ \text{ang}(\text{LE}_N, \text{OX}) - \text{ang}(\text{RE}_M, \text{OX}) - 136^\circ \leq \text{AgT}$
Ang84	$ \text{ang}(\text{LE}_N, \text{OX}) - \text{ang}(\text{N}_M, \text{OX}) - 90^\circ \leq \text{AgT}$
Ang85	$ \text{ang}(\text{LE}_M, \text{OX}) - \text{ang}(\text{REB_RE}, \text{OX}) - 45^\circ \leq \text{AgT}$
Ang86	$ \text{ang}(\text{LE}_M, \text{OX}) - \text{ang}(\text{REB}_N, \text{OX}) - 90^\circ \leq \text{AgT}$
Ang87	$ \text{ang}(\text{LE}_M, \text{OX}) - \text{ang}(\text{REB}_M, \text{OX}) - 71^\circ \leq \text{AgT}$
Ang88	$ \text{ang}(\text{LE}_M, \text{OX}) - \text{ang}(\text{RE}_N, \text{OX}) - 136^\circ \leq \text{AgT}$
Ang89	$ \text{ang}(\text{LE}_M, \text{OX}) - \text{ang}(\text{RE}_M, \text{OX}) - 90^\circ \leq \text{AgT}$
Ang90	$ \text{ang}(\text{LE}_M, \text{OX}) - \text{ang}(\text{N}_M, \text{OX}) - 45^\circ \leq \text{AgT}$
Ang91	$ \text{ang}(\text{REB_RE}, \text{OX}) - \text{ang}(\text{REB}_N, \text{OX}) - 45^\circ \leq \text{AgT}$
Ang92	$ \text{ang}(\text{REB_RE}, \text{OX}) - \text{ang}(\text{REB}_M, \text{OX}) - 27^\circ \leq \text{AgT}$
Ang93	$ \text{ang}(\text{REB_RE}, \text{OX}) - \text{ang}(\text{RE}_N, \text{OX}) - 90^\circ \leq \text{AgT}$
Ang94	$ \text{ang}(\text{REB_RE}, \text{OX}) - \text{ang}(\text{RE}_M, \text{OX}) - 45^\circ \leq \text{AgT}$
Ang95	$ \text{ang}(\text{REB_RE}, \text{OX}) - \text{ang}(\text{N}_M, \text{OX}) - 0^\circ \leq \text{AgT}$
Ang96	$ \text{ang}(\text{REB}_N, \text{OX}) - \text{ang}(\text{REB}_M, \text{OX}) - 18^\circ \leq \text{AgT}$
Ang97	$ \text{ang}(\text{REB}_N, \text{OX}) - \text{ang}(\text{RE}_N, \text{OX}) - 45^\circ \leq \text{AgT}$
Ang98	$ \text{ang}(\text{REB}_N, \text{OX}) - \text{ang}(\text{RE}_M, \text{OX}) - 0^\circ \leq \text{AgT}$
Ang99	$ \text{ang}(\text{REB}_N, \text{OX}) - \text{ang}(\text{N}_M, \text{OX}) - 45^\circ \leq \text{AgT}$
Ang100	$ \text{ang}(\text{REB}_M, \text{OX}) - \text{ang}(\text{RE}_N, \text{OX}) - 66^\circ \leq \text{AgT}$
Ang101	$ \text{ang}(\text{REB}_M, \text{OX}) - \text{ang}(\text{RE}_M, \text{OX}) - 18^\circ \leq \text{AgT}$
Ang102	$ \text{ang}(\text{REB}_M, \text{OX}) - \text{ang}(\text{N}_M, \text{OX}) - 26^\circ \leq \text{AgT}$
Ang103	$ \text{ang}(\text{RE}_N, \text{OX}) - \text{ang}(\text{RE}_M, \text{OX}) - 45^\circ \leq \text{AgT}$
Ang104	$ \text{ang}(\text{RE}_N, \text{OX}) - \text{ang}(\text{N}_M, \text{OX}) - 90^\circ \leq \text{AgT}$
Ang105	$ \text{ang}(\text{RE}_M, \text{OX}) - \text{ang}(\text{N}_M, \text{OX}) - 45^\circ \leq \text{AgT}$

Tabla B3 – Ecuaciones basadas en los ángulos para obtener el grado de reconocimiento del método 2