

E.T.S. de Ingeniería Industrial,  
Informática y de Telecomunicación

# Automatización de Tareas de Supervisión del Proceso Constructivo de Plantas Fotovoltaicas



Máster Universitario en  
Ingeniería Industrial

Trabajo Fin de Máster

Illya Prostychenko

Ángel María Andueza Unanua

Pamplona, 29 de junio de 2021



## **Resumen y palabras clave**

Estudio de la viabilidad técnica y económica de la automatización de tareas recurrentes en el seguimiento de la construcción de infraestructuras de parques fotovoltaicos, desarrollando para ello un proceso y aplicación/software mediante Matlab y LabVIEW que permiten el seguimiento de la evolución gracias al procesamiento digital de ortofotos geolocalizadas obtenidas mediante drones o alternativamente por satélite. Redacción y documentación de los pasos a seguir para que de forma automatizada se realice todo el proceso: adquisición de fotografías y su procesamiento, detección de los distintos elementos del terreno (como paneles solares instalados), comparación con resultados anteriores y planos técnicos, obtención de resultados de avance y generación de informes.

Palabras clave: *Procesamiento Digital de Imágenes, Matlab, LabVIEW, Energías Renovables, Energía Fotovoltaica, Paneles Solares, Dron.*

## **Abstract and key words**

Technical and economical viability study on the automation of repetitive tasks during the supervising process of photovoltaic power station constructions. Development of a process and a program/software with Matlab and LabVIEW which allows the progress monitoring by digitally processing georeferenced ortophotos of the site, obtained via the use of UAV's or via satellite imagery services. Documentation of the steps to follow in order to obtain an automatic process: imagery adquierement and proccesing, detection of elements of interest (such as solar panels), comparison with previous results and technical drawings, obtainment of advancement results and report generation.

*Key words: Digital Image Processing, Matlab, LabVIEW, Renewable Energy, Photovoltaic Energy, Solar Panels, UAV.*

## Índice de contenido

1. Introducción y objetivos.....	9
2. Estado del arte .....	10
3. Flujo de trabajo.....	12
3.1. Obtención de imágenes .....	12
3.2. Montaje de ortofotos y capacidad computacional .....	18
3.3. Procesamiento de la información.....	21
4. Desarrollo de algoritmos en Matlab .....	22
4.1. Comprobación de la exactitud de las ortofotos.....	22
4.2. Detección y marcación de paneles solares.....	26
4.3. Comparación visual de dos ortofotos.....	50
4.4. Conteo de paneles .....	60
4.5. Superposición y ajuste de planos .....	62
4.6. Elaboración de informes .....	71
5. Interfaz en LabVIEW .....	73
6. Conclusión y líneas futuras .....	76
7. Bibliografía.....	79
8. Anexos.....	81
8.1. Archivos adjuntos .....	81
8.2. Otros casos .....	82

## Índice de figuras

Figura 1: Servicios de Above Surveying [1] .....	10
Figura 2: Ejemplo de aplicación de Sitemark [2] .....	11
Figura 3: Flujo de trabajo .....	12
Figura 4: Dron DJI Mavic Pro 2 .....	14
Figura 5: Interfaz gráfica de la aplicación DJI Pilot PE .....	15
Figura 6: Tiempo de vuelo según potencia del parque .....	16
Figura 7: Tiempo de vuelo según potencia del parque, detalle .....	17
Figura 8: Número de fotografías según potencia del parque .....	17
Figura 9: Configuración de recursos en Docker Desktop .....	19
Figura 10: Tiempo de obtención de las ortofotos .....	20
Figura 11: Tiempo de obtención de la ortofoto según potencia del parque .....	20
Figura 12: Ortofoto de ejemplo .....	21
Figura 13: Ortofoto del primer vuelo a 80 m, Zuriáin .....	22
Figura 14: Ortofoto del segundo vuelo a 80 m, Zuriáin .....	23
Figura 15: Ortofoto del vuelo a 50 m, Zuriáin .....	23
Figura 16: Diagrama lógico de comprobación de la exactitud de las ortofotos .....	24
Figura 17: Segundo vuelo a 80 m, punto de interés marcado en amarillo .....	25
Figura 18: Vuelo a 50 m, punto de interés marcado en amarillo .....	25
Figura 19: Detalle del punto de interés, vuelo a 80 m (izquierda), vuelo a 50 m (derecha) .....	26
Figura 20: Ejemplo de operación morfológica de apertura. Primera columna: máscara inicial. Segunda columna: máscara inicial tras la erosión. Tercera columna: máscara erosionada tras la dilatación. Cuarta columna: elemento de estructuración usado .....	27
Figura 21: Ejemplo de operación morfológica de cerramiento. Primera columna: máscara inicial. Segunda columna: máscara inicial tras la dilatación. Tercera columna: máscara dilatada tras la erosión. Cuarta columna: elemento de estructuración usado .....	28
Figura 22: Imagen RGB ejemplo y sus tres planos de color .....	29
Figura 23: Máscaras de los tres planos de color tras aplicar sus umbrales y su suma ...	29
Figura 24: Máscara ejemplo invertida .....	30
Figura 25: Máscara ejemplo tras el cerramiento .....	30
Figura 26: Máscara ejemplo tras la apertura .....	31

Figura 27: Máscara de la captura (izquierda) y captura original con rectángulos (derecha)	32
Figura 28: Máscara de la captura girada (izquierda) y captura original girada (derecha)	32
Figura 29: Captura original girada y con rectángulos	33
Figura 30: Captura con rectángulos y el giro deshecho	33
Figura 31: Ortofoto de una parte de la planta en Azaila, Teruel	34
Figura 32: Máscara de la planta de Teruel obtenida por medio de umbrales	35
Figura 33: Máscara de la planta de Teruel obtenida con 26 puntos de referencia y tolerancia de 20	36
Figura 34: Zona de interés marcada	36
Figura 35: Máscara de la planta de Teruel en la zona de interés	37
Figura 36: Máscara de la planta de Teruel limpiada	37
Figura 37: Ortofoto de la planta de Teruel en el espacio de color $L^*a^*b$	38
Figura 38: Máscara de la planta de Teruel obtenida por medio de la segmentación de las capas a y b	39
Figura 39: Máscara de las sombras de la planta de Teruel obtenida por tolerancias	39
Figura 40: Máscara de la planta de Teruel obtenida por medio de la segmentación de las capas a y b dentro de la zona de interés y sin sombras	40
Figura 41: Máscara de la planta de Teruel tras la apertura automática	41
Figura 42: Máscara de la planta de Teruel tras el cerramiento automático	41
Figura 43: Ortofoto de la planta de Murcia	42
Figura 44: Máscara de la planta de Murcia obtenida por medio de la segmentación de las capas a y b dentro de la zona de interés	43
Figura 45: Máscara de las sombras de la planta de Murcia en la zona de interés	43
Figura 46: Máscara obtenida al restar la Figura 45 a la Figura 44	44
Figura 47: Máscara binaria para cubrir el espacio entre las filas de paneles	45
Figura 48: Ortofoto de la planta de Murcia con la máscara del espacio entre las filas superpuesta	46
Figura 49: Ortofoto de la planta de Murcia con la máscara del espacio entre las filas corregida superpuesta	47
Figura 50: Máscara de la planta de Murcia tras restar el espacio entre las filas	47

Figura 51: Máscara de la planta de Murcia tras la limpieza automática .....	48
Figura 52: Ortofoto de la planta de Teruel con las filas de paneles marcadas .....	49
Figura 53: Flujo lógico de la obtención de la máscara de paneles .....	49
Figura 54: Captura de Google Maps editada (izquierda) y sin editar (derecha).....	50
Figura 55: Máscara inicial (izquierda) y máscara final (derecha) .....	50
Figura 56: Diferencia entre la máscara final e inicial.....	51
Figura 57: Blob aislado de la máscara inicial (izquierda) y de la máscara final (derecha) .....	51
Figura 58: Suma del blob de la máscara inicial y el de la final.....	52
Figura 59: Proceso de comparación de máscaras .....	53
Figura 60: Captura de Google Maps modificada y desplazada (imagen inicial).....	54
Figura 61: Captura de Google Maps original desplazada (imagen final).....	54
Figura 62: Máscara girada de la captura modificada desplazada (izquierda) y máscara girada de la captura original desplazada (derecha).....	55
Figura 63: Cálculo de la zona de corte en la máscara final .....	55
Figura 64: Cálculo de la zona de corte en la máscara inicial .....	56
Figura 65: Máscara inicial agrandada.....	56
Figura 66: Máscara inicial recortada (izquierda) y máscara final recortada (derecha) ..	57
Figura 67: Posicionamiento del rectángulo en la máscara recortada .....	57
Figura 68: Imagen final con las filas marcadas. Elementos nuevos (rojo) y elementos antiguos (verde).....	58
Figura 69: Otra ortofoto de la planta de Teruel modificada .....	59
Figura 70: Ortofoto de la planta de Teruel con las filas marcadas. Elementos nuevos (amarillo) y elementos antiguos (rojo) .....	59
Figura 71: Flujo lógico de la operación de comparación .....	60
Figura 72: Ortofoto de Zuriáin con el camino de AutoCAD Map 3D superpuesto .....	62
Figura 73: Ortofoto de Zuriáin con el camino de IDENA superpuesto.....	63
Figura 74: Detalle de la ortofoto de la planta de Teruel con el plano de las mesas superpuesto .....	64
Figura 75: Detalle de la ortofoto de la planta de Murcia con el plano de las mesas superpuesto .....	64
Figura 76: Ajuste de la desviación progresiva .....	65

---

Figura 77: Detalle de la ortofoto de la planta de Teruel con el plano de las mesas corregido superpuesto .....	66
Figura 78: Detalle de la ortofoto de la planta de Murcia con el plano de las mesas corregido superpuesto.....	67
Figura 79: Proceso de comprobación del avance de las mesas .....	67
Figura 80: Indexación de las mesas del plano, orientación horizontal de las filas.....	68
Figura 81: Detalle del plano corregido de las mesas de la planta de Teruel superpuesto sobre una ortofoto distinta de la que se ha usado para su corrección .....	69
Figura 82: Avance de las mesas de la planta de Murcia.....	70
Figura 83: Ortofoto de la planta de Murcia con el plano del camino interno superpuesto. ....	70
Figura 84: Ejemplo del informe en Excel con el avance total y ortofoto marcada .....	71
Figura 85: Ejemplo del informe en Excel con el avance de cada mesa por filas .....	71
Figura 86: Ejemplo del informe en Excel con el avance de cada fila .....	72
Figura 87: Ejemplo de gráfica de seguimiento del avance de las mesas.....	72
Figura 88: Detalle del programa de LabVIEW .....	74
Figura 89: Interfaz del programa de LabVIEW (1/2).....	74
Figura 90: Interfaz del programa de LabVIEW (2/2).....	75
Figura 91: Modificación de la función geotiffinfo.m.....	81

## Índice de tablas

Tabla 1: Servicios de imágenes satelitales .....	13
Tabla 2: Parámetros de vuelo y sus efectos .....	15
Tabla 3: Plataformas de obtención de ortofotos .....	18
Tabla 4: Comparación de resoluciones.....	24
Tabla 5: Comparación de tiempos para plantas de 5 y 50 MW, S: supervisado, NS: no supervisado .....	76
Tabla 6: Estado actual de los procesos y propuestas futuras.....	78

## **1. Introducción y objetivos**

El proyecto objeto de este documento se ha desarrollado durante la realización de prácticas curriculares en la empresa EOSOL localizada en Mutilva, Navarra. El punto más fuerte de dicha organización es la energía solar ya que se dedica a la construcción y mantenimiento tanto de parques fotovoltaicos a gran escala como de instalaciones de autoconsumo. A la hora de instalar los parques fotovoltaicos los clientes de EOSOL demandan informes regulares (aproximadamente cada semana o incluso cada día) sobre el avance de estos. Uno de los puntos clave de estos informes consiste en reflejar la cantidad de paneles solares instalados, para lo cual un responsable debe recorrer la planta realizando de forma manual su conteo. A menudo se trata de instalaciones de gran tamaño por lo que el recuento y la elaboración del informe puede llevar mucho tiempo, en ocasiones hasta dos días.

El objetivo principal de este proyecto consiste en realizar un estudio de viabilidad técnica y económica de la automatización de tareas recurrentes en el seguimiento de la construcción de plantas fotovoltaicas, centrándose sobre todo en la instalación de los paneles fotovoltaicos. Dicho seguimiento se debe realizar con la ayuda de imágenes aéreas obtenidas por un dron o mediante un servicio de imágenes satelitales. En caso de llegar a un resultado favorable en dicho estudio, se debe obtener una manera más ágil y rápida de recoger la información acerca del avance constructivo, así como de elaborar los informes.

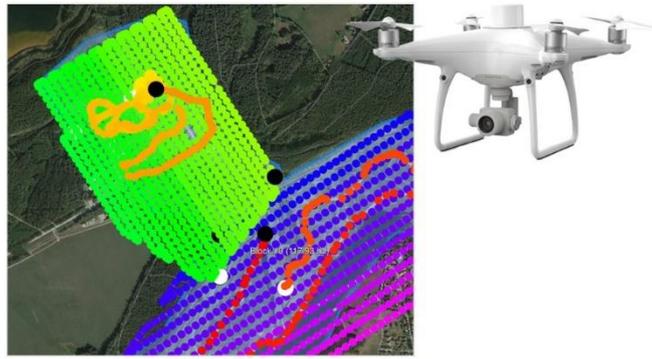
## 2. Estado del arte

El monitoreo aéreo de parques fotovoltaicos es un concepto novedoso, aunque ya existen algunas empresas que se dedican a ello. Entre ellas están *Above Surveying* [1] y *Sitemark* [2]. La primera ofrece servicios como monitoreo aéreo de construcciones, inspecciones del activo, colección de medios, inspección termográfica de alta definición, cartografía topográfica aérea e inspección de ultra alta definición. Además, utiliza métodos de Machine Learning y visión artificial para realizar la supervisión de las construcciones.



*Figura 1: Servicios de Above Surveying [1]*

En cuanto a la segunda empresa, ofrece servicios similares, aunque no se centra únicamente en el ámbito fotovoltaico, sino que también cubre sectores de construcción y minería. Sin embargo, requiere que sean los clientes los que proporcionen las imágenes aéreas. También utiliza Machine Learning e Inteligencia Artificial. Ambas empresas proporcionan como resultado de sus servicios un informe con los detalles requeridos por el cliente, como el avance de la construcción, el estado de los paneles o el volumen de terreno desplazado.



*Figura 2: Ejemplo de aplicación de Sitemark [2]*

La contratación de empresas externas supondría un gasto adicional por lo que es interesante desarrollar una herramienta propia que podría aportar muchos beneficios tanto de forma interna como externa (como servicio a terceros) teniendo en cuenta que la empresa dispone de los medios más importantes necesarios para ello: un dron con cámara de alta calidad, personal con licencia de vuelo y ordenadores con gran capacidad computacional.

### 3. Flujo de trabajo

Para realizar el correcto seguimiento de la construcción de un parque fotovoltaico se ha establecido que se necesita lo siguiente: una manera de obtener imágenes aéreas del parque, una manera de unir las imágenes en una ortofoto (imagen en la que todos los elementos tienen la misma escala y están libres de deformaciones) y una manera de localizar los elementos de interés en la ortofoto.

El flujo de trabajo general que se va a seguir es el siguiente:

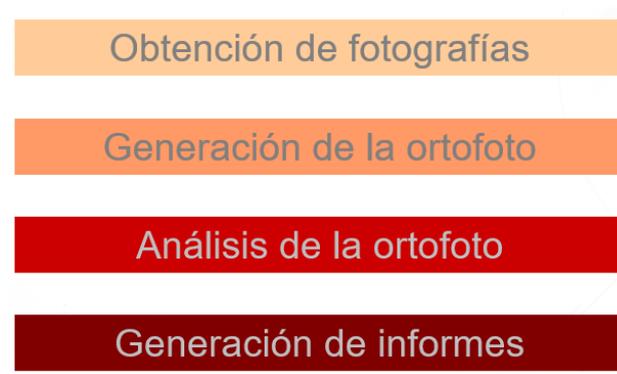


Figura 3: Flujo de trabajo

#### 3.1. Obtención de imágenes

A la hora de obtener las imágenes aéreas del parque fotovoltaico existen dos opciones principales: utilizar un UAV (vehículo aéreo no tripulado) que recorra la parcela y tome las fotografías necesarias o utilizar los servicios de compañías que toman imágenes desde satélites bajo demanda. A continuación, se realiza un estudio de las dos posibilidades.

Se ha contactado con dos compañías que ofrecen servicios de captura de imágenes mediante satélites bajo demanda: Maxar [3] y Argongra [4]. Las características de sus servicios se describen en la siguiente tabla:

	Maxar	Argongra
Mejor resolución (cm/píxel)	30	50
Superficie mínima (km <sup>2</sup> )	100	100
Precio (€/km <sup>2</sup> )	25	17
Tiempo de espera	8-12 horas desde captura (depende del tiempo)	3 días desde captura (depende del tiempo)

*Tabla 1: Servicios de imágenes satelitales*

La obtención de imágenes mediante satélites depende en gran medida de las condiciones meteorológicas de la zona de interés ya que en condiciones de gran nubosidad su captura resulta imposible. Esto hace que el tiempo total de espera sea poco predecible. La ventaja de los satélites es que la superficie que se cubre con una única imagen es suficiente para abarcar todo el parque, aunque dado que la superficie mínima debe ser de 100 km<sup>2</sup> y la gran mayoría de las plantas no llegan a estas dimensiones se desaprovecharía parte de la imagen solicitada. Además, su coste es elevado ya que con dos fotografías se supera la inversión que requiere un dron profesional con varias baterías (unos 3.000 € para un DJI Mavic Pro 2 con 3 baterías y mando inteligente, el dron disponible en la empresa). Todo esto hace que la alternativa de los satélites solo sea útil en parques grandes y cuando se permite cierta flexibilidad en los tiempos de entrega de los informes, aunque de todas formas habría que realizar pruebas para comprobar la detección de infraestructuras con la resolución disponible.

Dado que la empresa ya cuenta con el dron DJI Mavic Pro 2 y personal con licencia de vuelo, su uso resulta mucho más interesante que el de los satélites.



*Figura 4: Dron DJI Mavic Pro 2*

El dron cuenta con una cámara de Hasselblad L1D-20c con las siguientes características

- Ancho de fotografía: 5472 píxeles
- Alto de fotografía: 3648 píxeles
- Resolución: 20 megapíxeles
- Ancho del sensor: 13,2 mm
- Alto del sensor: 8,8 mm
- Distancia focal: 10,3 mm

La programación del vuelo automático del dron y captura de fotografías se realizan desde la aplicación DJI Pilot PE instalada directamente en el mando inteligente del dron. Esta aplicación permite configurar los siguientes parámetros de vuelo:

- Superficie cubierta
- Altura de vuelo
- Velocidad de vuelo
- Solapamiento frontal y lateral de fotografías
- Margen alrededor del borde de la zona

El cambio de estos parámetros afecta directamente al tiempo de vuelo y la cantidad de fotografías que se deben tomar:

Parámetro	Consecuencias de su aumento
Superficie cubierta	Se cubren más elementos, aumenta el tiempo de vuelo y número de fotografías.
Altura de vuelo	Se necesitan menos fotografías para el mismo solapamiento y área, disminuye el tiempo de vuelo y resolución.
Velocidad de vuelo	Menos tiempo de vuelo, las fotografías pueden ser borrosas.
Solapamiento frontal y lateral de fotografías	Se necesita tomar más imágenes para la misma superficie, aumenta el tiempo de vuelo.
Margen alrededor del borde de la zona	Se asegura que se captan todos los elementos de interés, aumenta el tiempo de vuelo y número de fotografías.

Tabla 2: Parámetros de vuelo y sus efectos

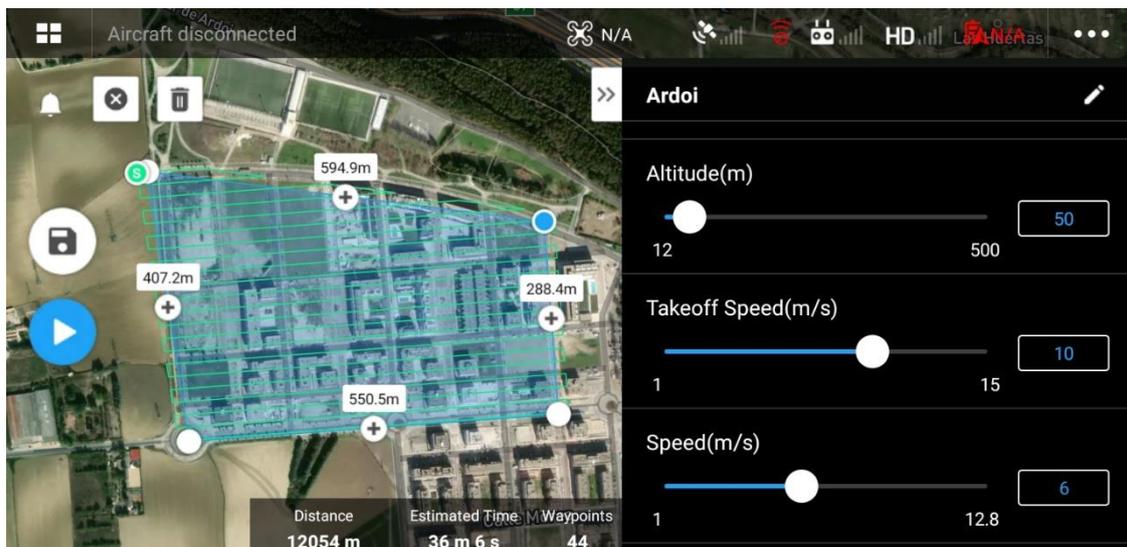


Figura 5: Interfaz gráfica de la aplicación DJI Pilot PE

Dado que la superficie de un parque fotovoltaico depende directamente de la potencia instalada se puede estimar el tiempo de vuelo necesario para diferentes potencias. Para ello se toma como relación  $115 \text{ W/m}^2$  (obtenida a partir de los planos de plantas de la empresa) y se fijan los siguientes parámetros de vuelo, obtenidos por medio de pruebas realizadas con el dron:

- Altura de vuelo: 50 m (buena resolución de 1,17 cm/píxel y se vuela por encima de líneas eléctricas)
- Velocidad de vuelo: 6 m/s (óptima en cuanto al tiempo de vuelo y calidad de imágenes)
- Solapamiento frontal y lateral de fotografías: 70% (se requiere más del 65% para montar las ortofotos)
- Margen alrededor del borde de la zona: 15 m (suficiente para asegurar la captura de toda la zona de interés)

Variando la superficie que se desea cubrir en la aplicación DJI Pilot PE se obtienen las siguientes aproximaciones:

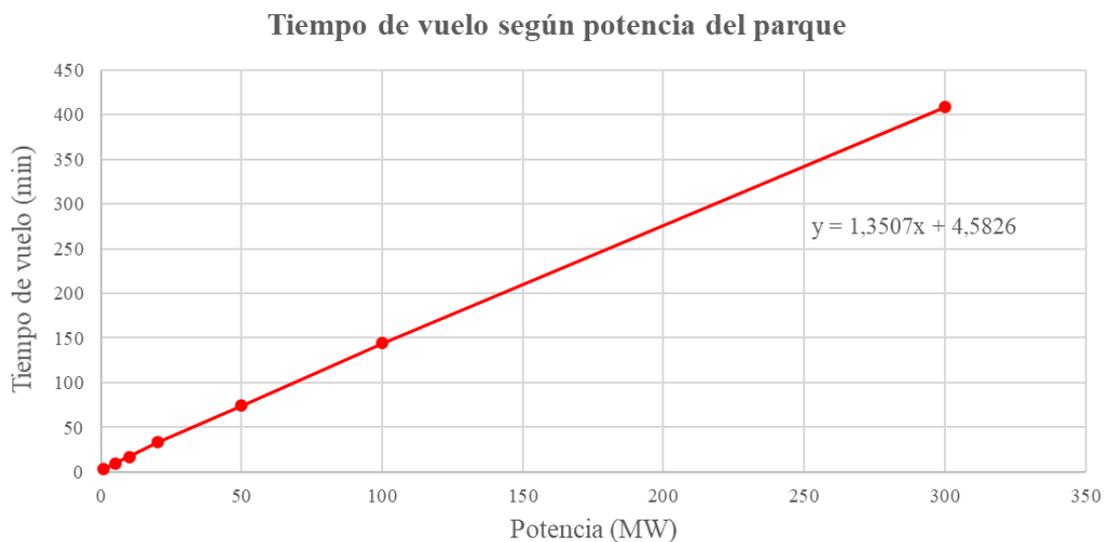


Figura 6: Tiempo de vuelo según potencia del parque

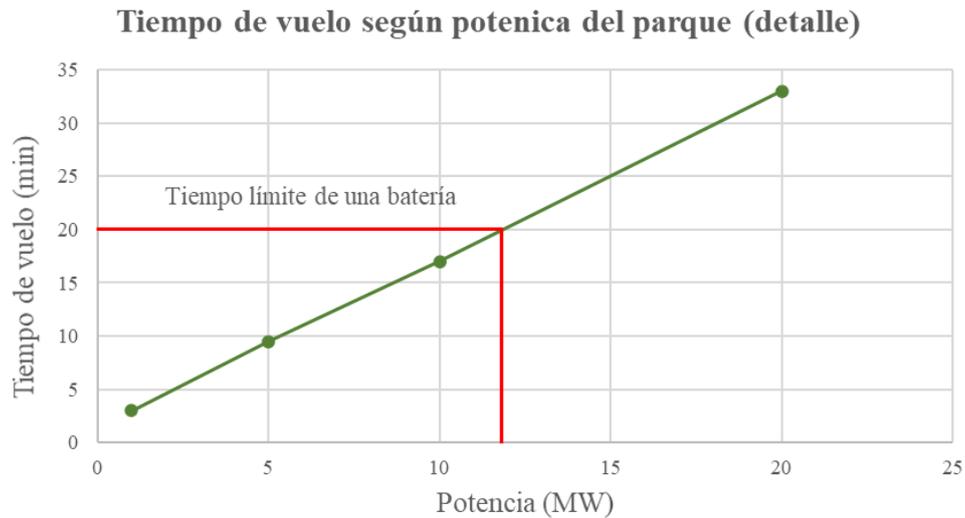


Figura 7: Tiempo de vuelo según potencia del parque, detalle

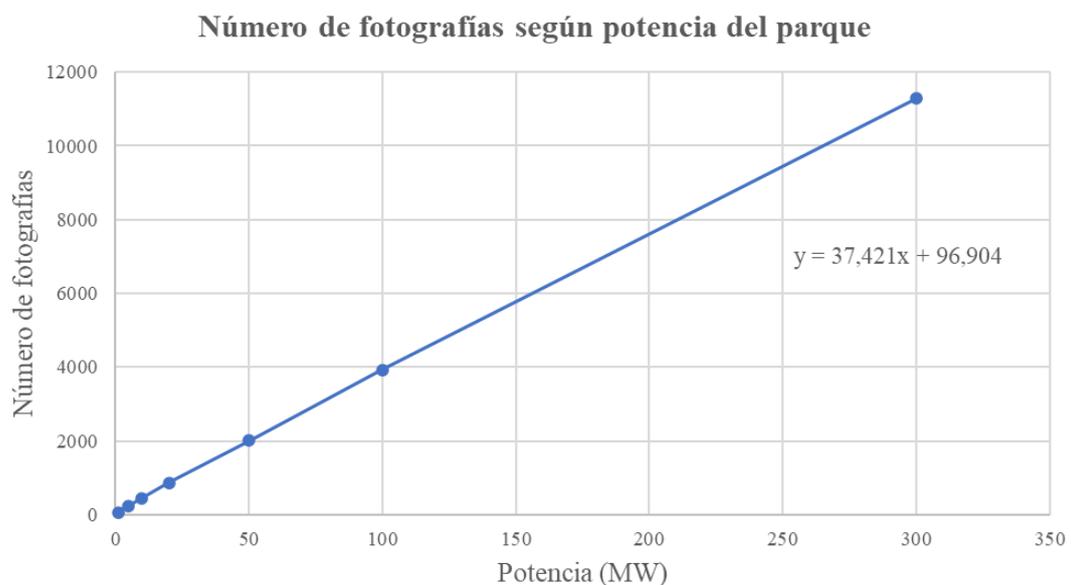


Figura 8: Número de fotografías según potencia del parque

Se observa una relación lineal entre la potencia instalada del parque y el tiempo de vuelo, así como el número de fotografías necesarias. Dado que la duración de una batería del dron es de unos 20 minutos en condiciones meteorológicas sin viento, se puede cubrir una superficie equivalente a 12 MW de potencia aproximadamente, según la Figura 7, por lo que si se desea cubrir una superficie mayor se precisan más baterías. Por otro lado, los

vuelos no se pueden realizar en condiciones de viento muy fuerte (>40 km/h) y se requiere la presencia de una persona cualificada en el lugar.

En conclusión, para la realización de este proyecto se ha optado por el uso del dron debido a su flexibilidad y disponibilidad inmediata.

### 3.2. Montaje de ortofotos y capacidad computacional

Una vez que se obtienen las fotografías con la ayuda del dron se deben componer en una ortofoto, por lo que se necesita un software capaz de realizar esta función. Existen varios servicios online que ofrecen esta herramienta entre los cuales se encuentran *Maps Made Easy* [5] y *Pix4D Cloud* [6], sin embargo, se trata de servicios de pago. El primero funciona con un programa de puntos que se gastan en función de las imágenes procesadas y se deben comprar, suponiendo un gasto de 8 a 650 €. El segundo servicio requiere una suscripción de 140 € al mes como mínimo.

Dentro de los softwares gratuitos destaca el de *OpenDroneMap* [7] aunque se debe ejecutar por código desde la ventana de comandos de Linux y es muy complejo de usar. Esta misma compañía también ofrece una aplicación web intuitiva y muy fácil de usar llamada *WebODM* que es la que se ha utilizado para llevar a cabo el proyecto objeto de este documento.

Plataforma	Tipo de servicio	Método de pago
Maps Made Easy	Online	Sistema de puntos (8-650 €)
Pix4D Cloud	Online	Suscripción (140 €/mes)
OpenDroneMap	Aplicación de Linux	Gratuito
WebODM	Aplicación web	Gratuito

Tabla 3: Plataformas de obtención de ortofotos

El manejo de WebODM requiere la instalación de la versión 2.2.0.5 o anterior del programa *Docker Desktop* para lo que a su vez se necesita una licencia de Windows 10 Profesional. Desde Docker Desktop se puede acceder a los servidores de WebODM, así como configurar los recursos del ordenador que se dedican a la elaboración de las

ortofotos. Debido a que el proceso de creación de las ortofotos requiere mucha capacidad computacional se ha usado la Workstation de la empresa EOSOL para este propósito. Tras realizar varias pruebas se han establecido los siguientes parámetros en Docker Desktop:

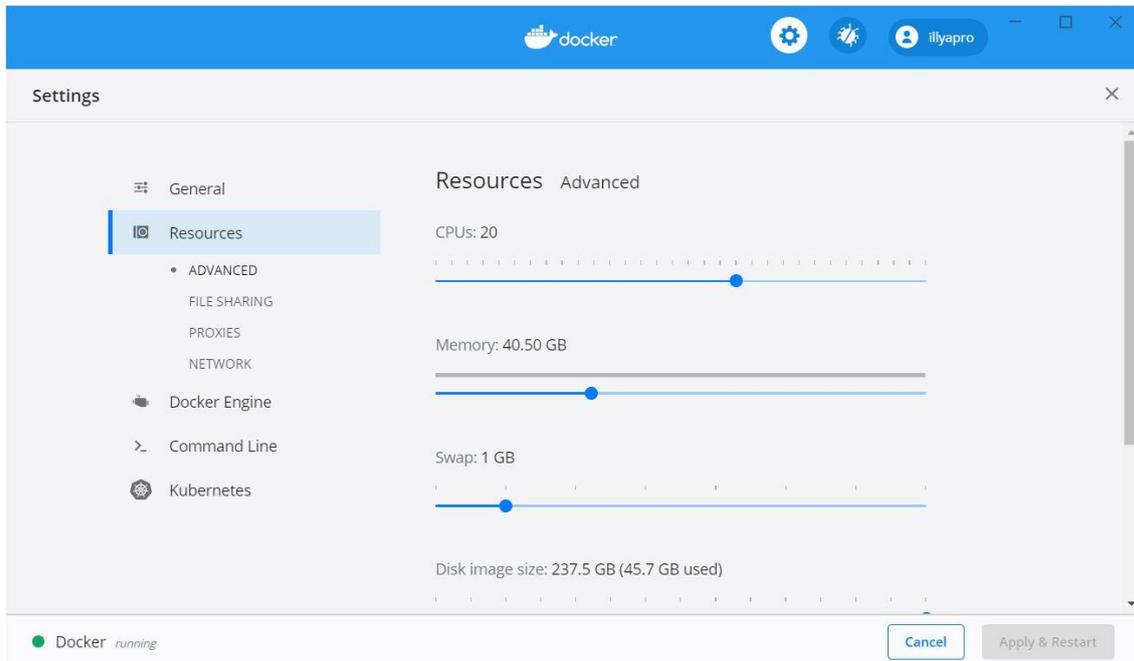


Figura 9: Configuración de recursos en Docker Desktop

Se usarán 20 núcleos de la CPU y 40,5 GB de RAM.

Descargando varias colecciones de fotografías y procesándolas con la ayuda de WebODM se puede realizar la siguiente estimación sobre el tiempo que se tarda en obtener las ortofotos en función del número de imágenes volcadas:

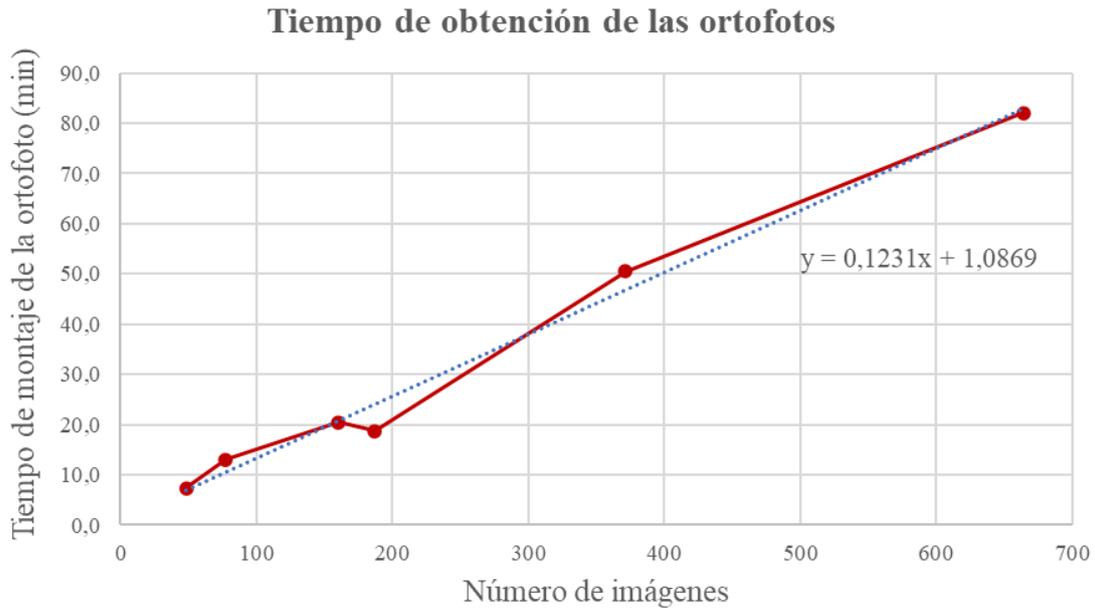


Figura 10: Tiempo de obtención de las ortofotos

Como era de esperar se sigue una tendencia lineal, aproximadamente. Dado que ya se tiene una relación entre la potencia del parque fotovoltaico y el número de fotografías necesarias (Figura 8) se puede derivar una relación entre la potencia y el tiempo de obtención de ortofotos:

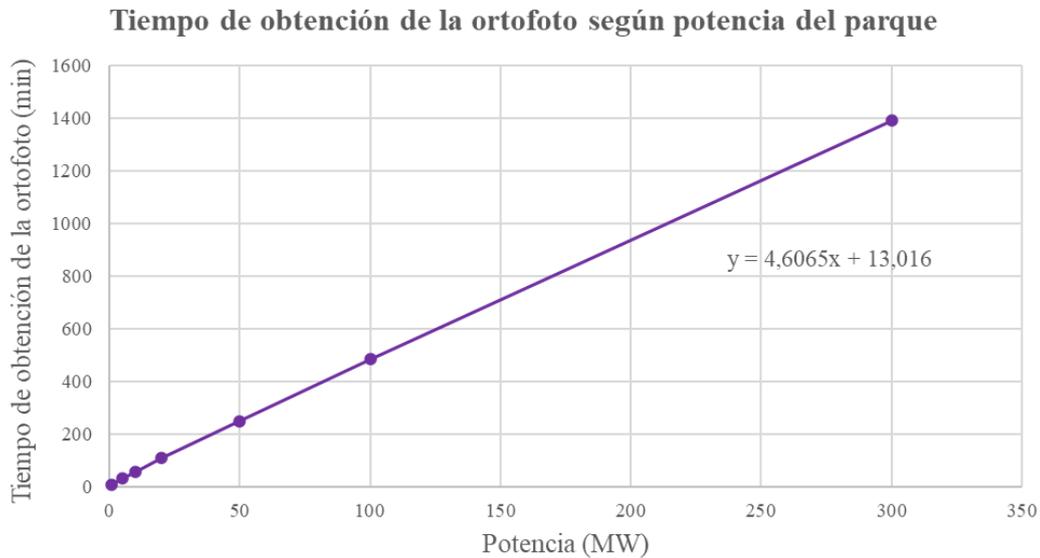


Figura 11: Tiempo de obtención de la ortofoto según potencia del parque

Una de las ortofotos obtenidas como ejemplo es la siguiente, se ha derivado a partir de 77 imágenes individuales y se han tardado 13 minutos en procesarla.



*Figura 12: Ortofoto de ejemplo*

La aplicación WebODM genera como salida una imagen en formato GeoTIFF, es decir, una imagen TIFF con información georreferenciada. Esto permite localizarla en el mapa usando para ello el programa Google Earth Pro, entre otros. Además, WebODM proporciona un modelo 3D texturizado generado a partir de las fotografías y una nube de puntos, que resultan irrelevantes para este proyecto.

### **3.3. Procesamiento de la información**

Para realizar el análisis de las ortofotos se ha optado por usar Matlab ya que cuenta con herramientas de procesamiento digital de imágenes y manejo de ortofotos en los add-ons de *Mapping Toolbox*, *Computer Vision Toolbox* e *Image Processing Toolbox*. Con esto se pueden realizar segmentaciones de imágenes, superposiciones, histogramas, etc., para efectuar el seguimiento de los elementos instalados en los parques fotovoltaicos.

También se ha usado LabVIEW para crear una interfaz para algunos de los programas hechos en Matlab, haciendo su manejo más ameno y ordenado.

## 4. Desarrollo de algoritmos en Matlab

### 4.1. Comprobación de la exactitud de las ortofotos

Para poner en práctica la aplicación de vuelo DJI Pilot PE y comprobar la exactitud del programa WebODM que monta las ortofotos se han realizado varios vuelos en la zona cercana al pueblo de Zuriáin, Navarra. Se han programado un total de tres vuelos: dos con la misma misión a 80 m de altura y uno de una zona más pequeña a 50 m de altura.

A parte de la altura, los demás parámetros eran idénticos en todos los vuelos:

- Velocidad de vuelo: 7 m/s
- Solapamiento frontal y lateral de las fotografías: 70%
- Margen alrededor del borde de la zona: 20 m

Tras el procesado de las fotografías se han obtenido las siguientes ortofotos:



*Figura 13: Ortofoto del primer vuelo a 80 m, Zuriáin*



*Figura 14: Ortofoto del segundo vuelo a 80 m, Zurián*



*Figura 15: Ortofoto del vuelo a 50 m, Zurián*

Se ha observado que, aunque se ha usado exactamente la misma misión de vuelo para los dos vuelos realizados a 80 m de altura, la cantidad de fotografías tomadas ha sido diferente (224 y 233 respectivamente). Esto se puede deber a que las condiciones meteorológicas, como el viento, por ejemplo, casi siempre son diferentes por lo que es muy complicado replicar de forma idéntica un vuelo. Además, la resolución de las ortofotos es peor que la de las fotografías individuales:

	Vuelos a 80 m	Vuelo a 50 m
Resolución de ortofoto (cm/píxel)	6,5	5
Resolución de fotografías individuales (cm/píxel)	1,87	1,17

Tabla 4: Comparación de resoluciones

La reducción de la calidad se debe al proceso de montaje de las ortofotos en WebODM. De todas formas, estas resoluciones son mucho mejores que las de las imágenes que se pueden obtener mediante satélites.

Al tratarse de imágenes georreferenciadas se puede comprobar la exactitud de la información geográfica, que será de gran utilidad en procesos posteriores. Para ello se ha creado un programa en Matlab que permite seleccionar un punto en una ortofoto. A continuación, las coordenadas en píxeles del punto elegido se transforman a coordenadas de mapa usando para ello la información geográfica de la ortofoto. Tras esto, las coordenadas de mapa se vuelven a transformar en coordenadas de píxeles, pero usando la información geográfica de otra ortofoto. Finalmente, se dibuja un círculo alrededor de los puntos elegidos en ambas ortofotos y se comprueba si la zona marcada es la misma.

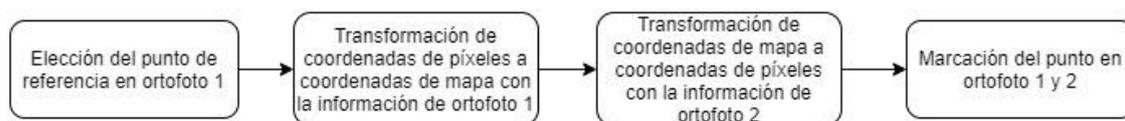
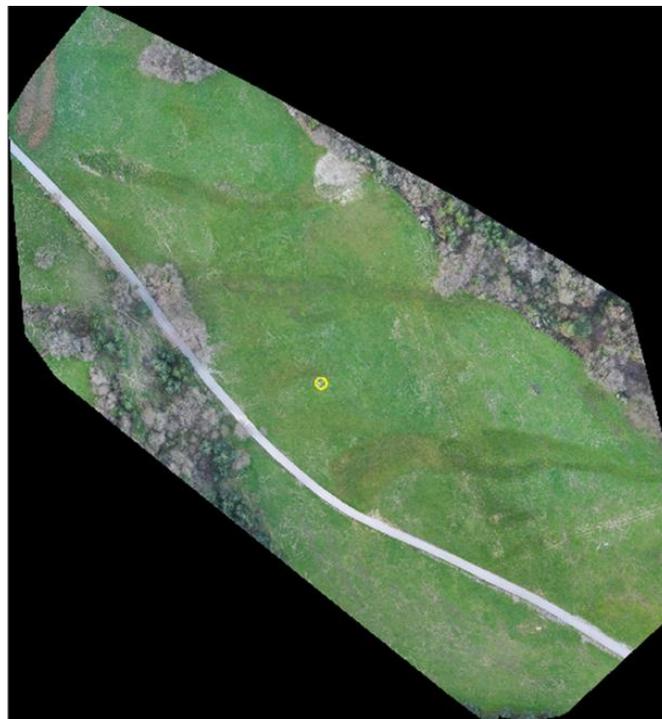


Figura 16: Diagrama lógico de comprobación de la exactitud de las ortofotos

A continuación, se muestran los resultados obtenidos en una de las comprobaciones realizadas, en este caso entre la ortofoto del segundo vuelo a 80 m y la ortofoto del vuelo a 50 m:



*Figura 17: Segundo vuelo a 80 m, punto de interés marcado en amarillo*



*Figura 18: Vuelo a 50 m, punto de interés marcado en amarillo*

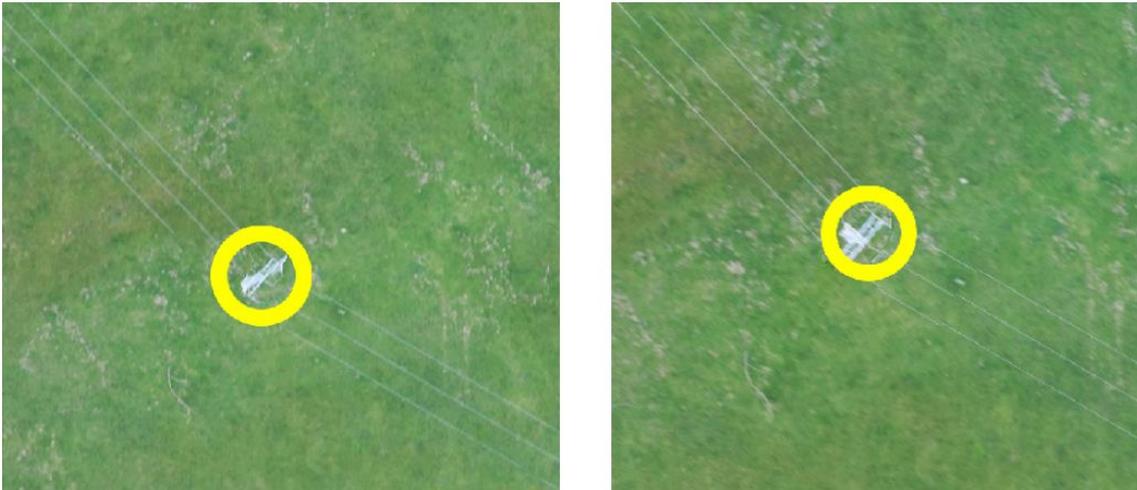


Figura 19: Detalle del punto de interés, vuelo a 80 m (izquierda), vuelo a 50 m (derecha)

El punto marcado es prácticamente idéntico en ambas ortofotos (Figura 19), aunque es cierto que se aprecia cierta desviación. Se ha comprobado que, en general, el error GPS es menor a 3 m, según los informes generados en WebODM.

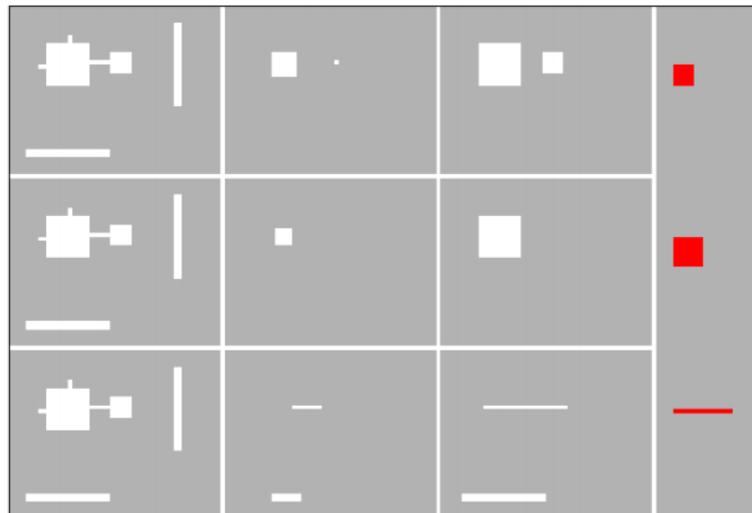
#### **4.2.Detección y marcación de paneles solares**

Siempre que se quiera detectar algún tipo de elemento en una imagen digital se debe aplicar el proceso conocido como *segmentación de imagen* que consiste en dividir esta en varios segmentos según sus colores, texturas, formas, etc. De esta forma se obtienen las *máscaras binarias* que asignan el valor lógico 1 (blanco) a los píxeles que cumplen las condiciones para estar dentro de cierto segmento y el valor lógico 0 (negro) a los píxeles que no las cumplen. El proceso de segmentación no es perfecto y en las máscaras binarias se pueden obtener conjuntos de píxeles que no interesan o, por el contrario, pueden faltar ciertos píxeles. Por ello es muy importante conocer los procesos morfológicos de apertura y cerramiento (opening y closing) que permiten limpiar la máscara y corregir ciertos errores. Ambos procesos constan de dos operaciones, erosión y dilatación, aplicadas en diferente orden.

La operación de erosión consiste en recorrer la máscara binaria con un elemento de estructuración con una determinada forma y tamaño. El centro del elemento se va posicionando sobre cada píxel de la máscara y se comprueban todos los píxeles de esta abarcados por el elemento. Todos estos píxeles deben ser un 1 lógico para que el píxel correspondiente al centro sea un 1 en la nueva máscara, de lo contrario, será un 0. Esta operación elimina el borde de los objetos de la máscara.

La operación de dilatación es lo contrario a la erosión. El píxel correspondiente al centro del elemento solo será 0 si todos los píxeles abarcados son un 0 lógico. Con esto se ensancha el borde de los objetos de la máscara.

El proceso morfológico de apertura consiste en aplicar la operación de erosión seguida de dilatación con el mismo elemento de estructuración.



*Figura 20: Ejemplo de operación morfológica de apertura. Primera columna: máscara inicial. Segunda columna: máscara inicial tras la erosión. Tercera columna: máscara erosionada tras la dilatación. Cuarta columna: elemento de estructuración usado*

En la tercera columna de la Figura 20 se observa el resultado de aplicar el proceso morfológico de apertura a la máscara de la primera columna con diferentes elementos de estructuración. Se observa que se eliminan objetos cuya forma difiere de la del elemento y el resultado depende de la forma de este y también de su tamaño.

Por otro lado, el proceso morfológico de cerramiento consiste en aplicar la operación de dilatación seguida de erosión con el mismo elemento de estructuración.



Figura 21: Ejemplo de operación morfológica de cerramiento. Primera columna: máscara inicial. Segunda columna: máscara inicial tras la dilatación. Tercera columna: máscara dilatada tras la erosión. Cuarta columna: elemento de estructuración usado

El proceso de cerramiento elimina los huecos dentro de los objetos de la máscara y también puede llegar a juntarlos. Una vez más el resultado depende de la forma y tamaño del elemento de estructuración.

Cabe destacar que tanto el proceso de apertura como el de cerramiento son idempotentes, es decir, una máscara obtenida mediante su aplicación no cambiará si se vuelve a aplicar el mismo proceso con el mismo elemento de estructuración.

Una de las formas de obtener una máscara binaria de una imagen digital RGB consiste en separarla en sus tres capas de color, rojo, verde y azul (Figura 22). Tras esto, a cada capa se le aplica un umbral entre 0 y 1 de forma que los píxeles que lo superan se convierten en blancos (0 lógico) y los que no en negros (1 lógico). Cabe destacar que los valores de los píxeles en las capas de colores van de 0 a 255 por lo que el valor del umbral se aplica de forma proporcional. Los umbrales de las tres capas se deben ajustar de forma que el elemento que se desea aislar destaque lo máximo posible en sus máscaras. Una vez obtenidas las tres máscaras se suman para aunar sus aportaciones (Figura 23).

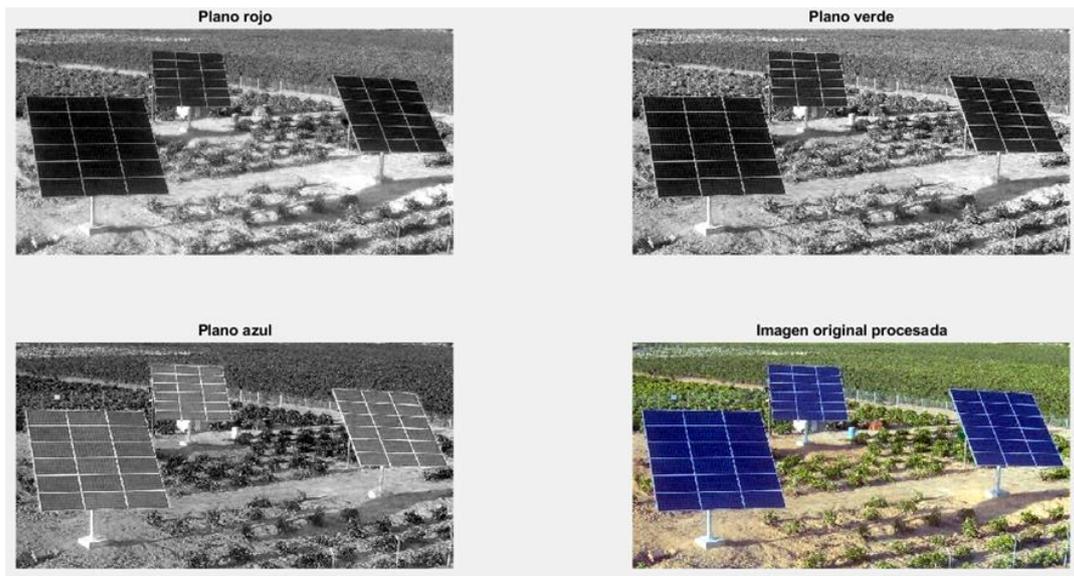


Figura 22: Imagen RGB ejemplo y sus tres planos de color

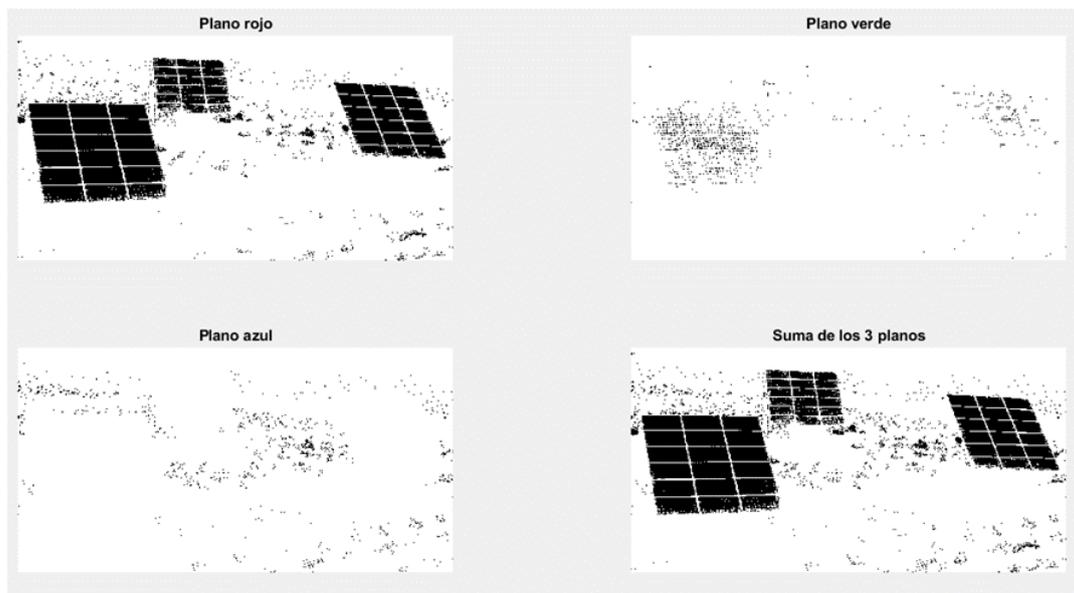
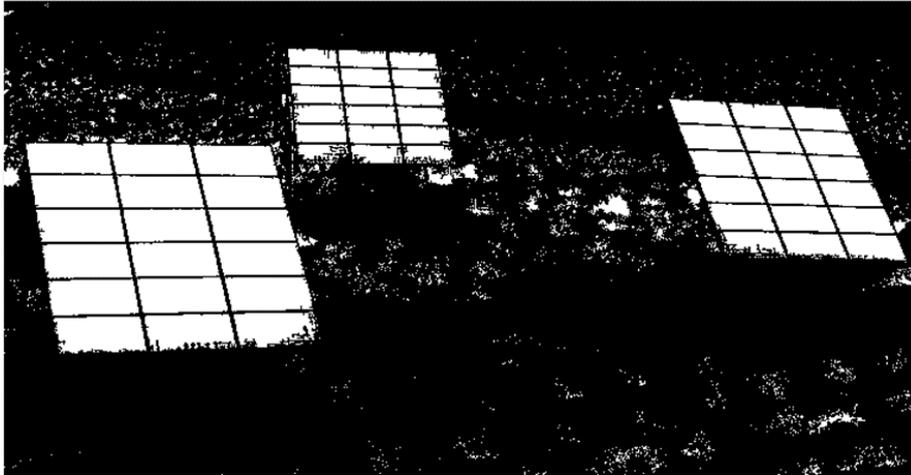


Figura 23: Máscaras de los tres planos de color tras aplicar sus umbrales y su suma

Dado que interesa que los paneles sean blancos en la máscara y se han obtenido negros en la Figura 23, esta se invierte:



*Figura 24: Máscara ejemplo invertida*

Se aplica el proceso de cerramiento para eliminar los huecos entre paneles y después el proceso de apertura para limpiar los objetos sobrantes. En ambos casos se usa un elemento de estructuración circular ya que se ha comprobado que es el que mejores resultados proporciona, aunque de diferente tamaño (Figura 25 y Figura 26).



*Figura 25: Máscara ejemplo tras el cerramiento*



Figura 26: Máscara ejemplo tras la apertura

Con esto ya quedan las mesas de los paneles detectadas y aisladas. Cabe destacar que los objetos blancos (con 1 lógico) de las máscaras binarias se suelen denominar *blobs* (*binary large object*), por lo que a partir de este punto se usará este término para referirse a ellos.

Dado que una ortofoto del mismo sitio en día y horas diferentes puede tener diferente iluminación y colores, seguramente no se pueda usar un mismo algoritmo para todos los casos y se tendrán que ajustar las diferentes variables para conseguir el resultado deseado.

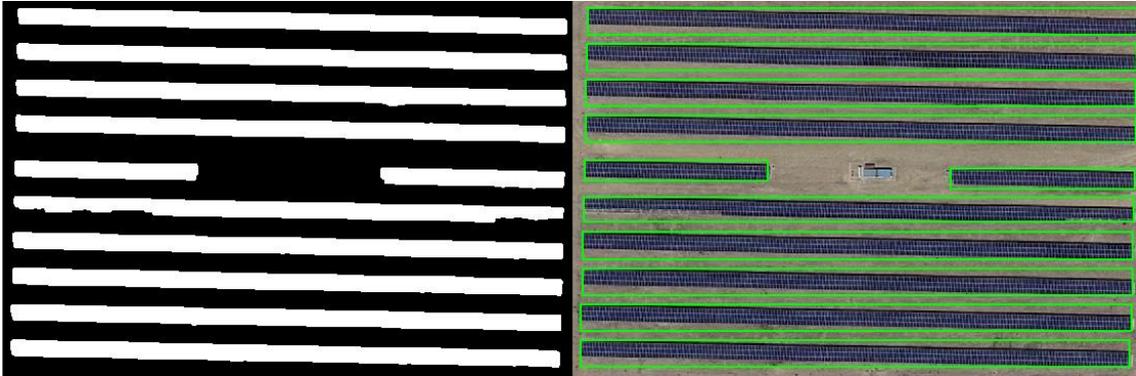
Los parámetros de ajuste son:

- Los tres niveles de umbral de las capas de color
- Forma y tamaño del elemento de cerramiento
- Forma y tamaño del elemento de apertura

Matlab permite analizar una máscara binaria y obtener ciertos datos sobre cada uno de los blobs. Algunos de los más útiles son:

- Posición del centroide
- Área
- Orientación
- Rectángulo que encierra el blob
- Relación entre el área del rectángulo y la del blob

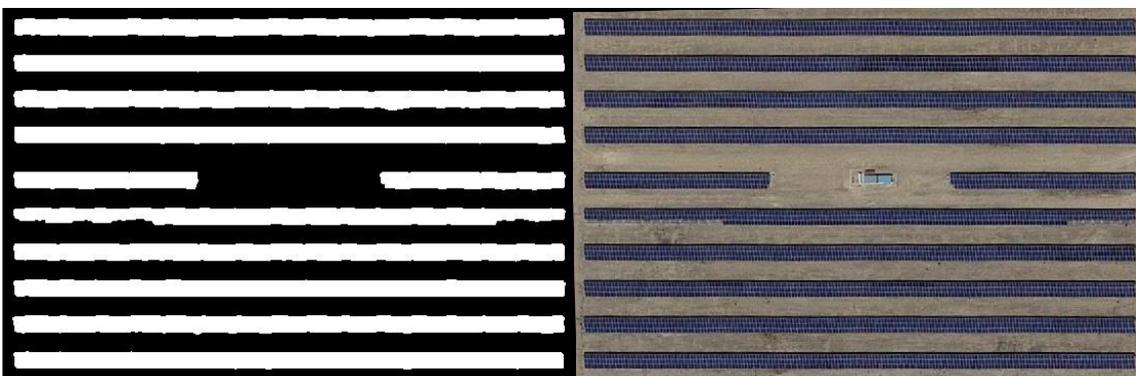
Usando los rectángulos que encierran los blobs se pueden marcar los paneles en la imagen de color original, ofreciendo una representación visual muy clara de su posición. Como ejemplo de esto se ha usado una captura de Google Maps:



*Figura 27: Máscara de la captura (izquierda) y captura original con rectángulos (derecha)*

En la Figura 27 se observa que las filas de paneles no son paralelas a los bordes de la imagen, por lo que no se consigue un buen encaje entre estas y los rectángulos ya que Matlab solo permite la inserción de rectángulos con sus bordes paralelos a los de la imagen donde se añaden. Dado que existe una posibilidad de que en las ortofotos de las plantas fotovoltaicas las filas de paneles no estén orientadas paralelamente a los bordes, también se producirá el desajuste observado.

Se ha ideado la siguiente estrategia para solucionar este problema. Una vez que se hayan aislado los blobs correspondientes a las filas de paneles, tanto la imagen original como la imagen binaria de los blobs se giran hasta que las filas quedan paralelas al eje vertical u horizontal:



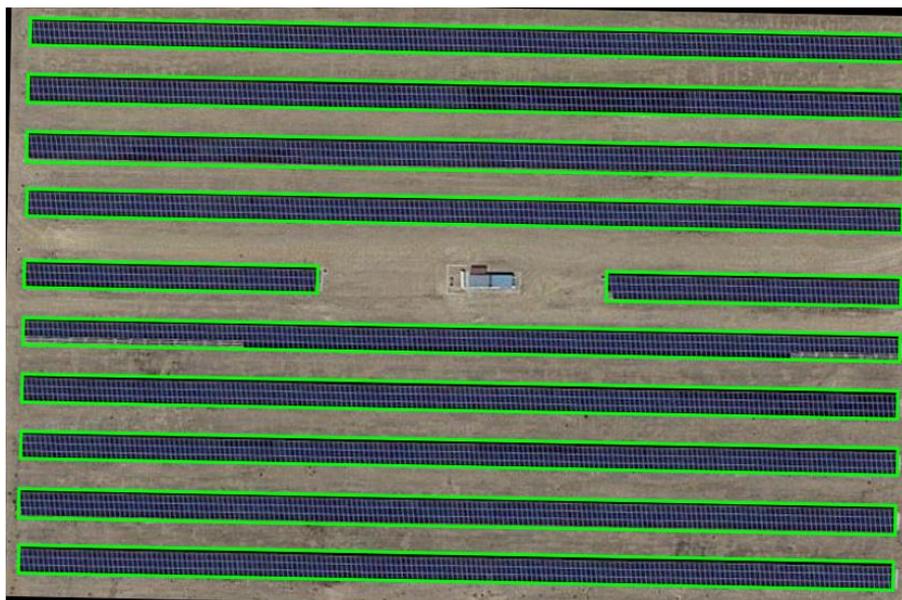
*Figura 28: Máscara de la captura girada (izquierda) y captura original girada (derecha)*

A partir de la máscara se obtienen las posiciones y tamaños de los rectángulos que encierran los blobs y se insertan en la fotografía girada:



*Figura 29: Captura original girada y con rectángulos*

Finalmente, la imagen marcada se vuelve a girar a su posición original. De esta forma si se trata de un GeoTIFF al deshacer el giro se consigue el emparejamiento original con sus coordenadas.



*Figura 30: Captura con rectángulos y el giro deshecho*

Al hacer los giros, para que la imagen siempre se mantenga del mismo tamaño, se recortan las partes que quedan fuera de los límites, por lo que se pierde algo de información (Figura 30). Por este motivo el ángulo de giro debe ser el mínimo posible. Para conseguirlo primero se obtiene el ángulo de inclinación de los blobs de la máscara sin girar. Se elige el ángulo del blob de mayor excentricidad, es decir el objeto más largo de la imagen. Si su valor está entre  $-45^\circ$  y  $45^\circ$  el ángulo de giro es el inverso a este, de forma que la imagen se gira hacia el eje horizontal positivo. Si el ángulo es mayor de  $45^\circ$ , el ángulo de giro es el complementario, la imagen se gira hacia el eje vertical positivo. Si el ángulo es menor de  $-45^\circ$  la imagen se gira hacia el eje vertical negativo.

Para poner en práctica lo descrito hasta ahora se han realizado varios vuelos en una parte de una planta fotovoltaica en Azaila, Teruel. Una de las ortofotos obtenidas a 50 m de altura es la siguiente:



*Figura 31: Ortofoto de una parte de la planta en Azaila, Teruel*

El método de ajuste de umbrales para detectar las filas de paneles resulta muy poco efectivo en la ortofoto de la Figura 31. Para valores de umbrales bajos solo se consigue

aislar las sombras de las filas y para umbrales más altos se acoplan zonas indeseadas de la imagen, como partes del terreno. El resultado de ello se observa en la siguiente figura:

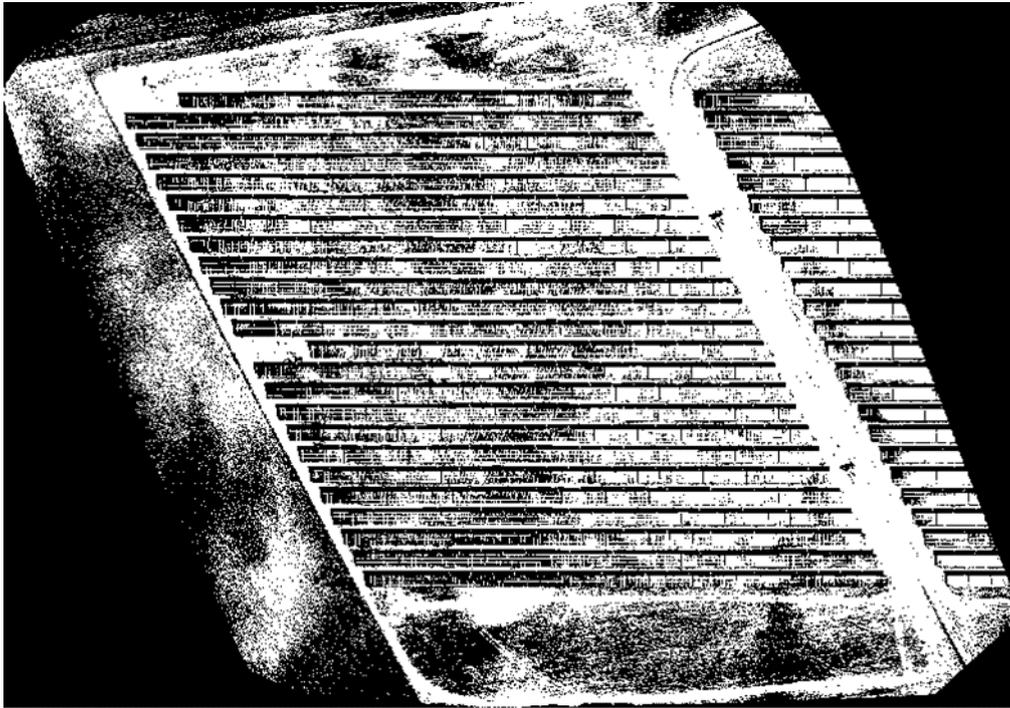


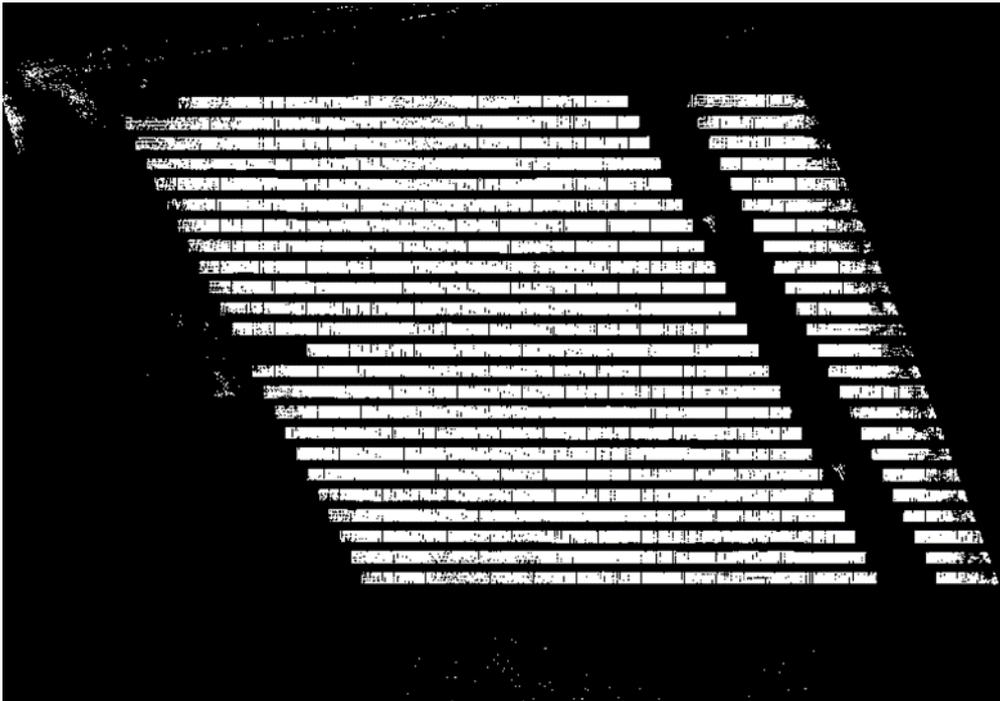
Figura 32: Máscara de la planta de Teruel obtenida por medio de umbrales

Se necesita, por lo tanto, otra forma de crear la máscara binaria. Se ha adaptado un script existente [8] que consiste en lo siguiente: se marcan varios puntos de referencia en los paneles de la imagen, se establece un valor de tolerancia y se crea una máscara con los píxeles de la imagen que cumplan la siguiente ecuación:

$$(C_{red} - ref_{red})^2 + (C_{green} - ref_{green})^2 + (C_{blue} - ref_{blue})^2 \leq tolerancia^2$$

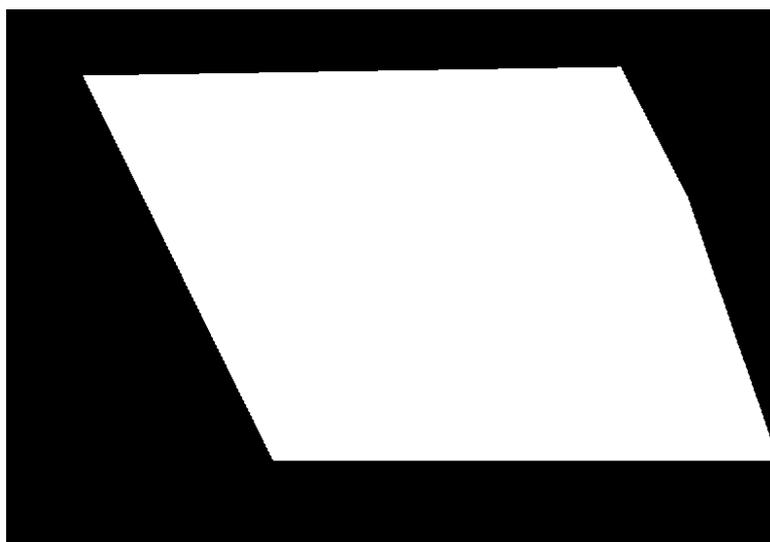
*Ecuación 1*

Donde  $C_{red}$ ,  $C_{green}$  y  $C_{blue}$  son las tres capas color de la imagen original. Las referencias son los valores (de 0 a 255) en las tres capas de color de los píxeles marcados. Esta comparación se repite tantas veces como puntos se hayan elegido. Para un valor mayor de tolerancia se incluyen más píxeles en la máscara binaria. Cuantos más puntos de referencia se marquen menor tendrá que ser el nivel de tolerancia para obtener resultados similares.



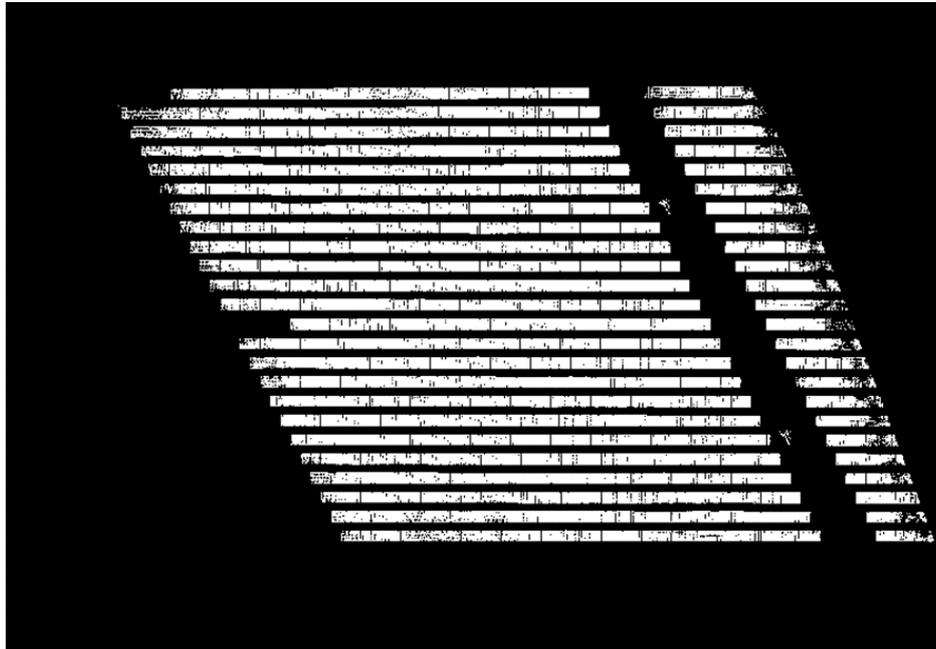
*Figura 33: Máscara de la planta de Teruel obtenida con 26 puntos de referencia y tolerancia de 20*

En la Figura 33 se observa una gran mejoría respecto del resultado anterior. Además, se introduce la posibilidad de seleccionar manualmente una zona de interés (Figura 34), de forma que cualquier píxel fuera de esta quedará descartado. Esto permite aislar una parte de la imagen para su análisis si no se desea estudiar todo el conjunto y eliminar algunos objetos indeseados (partes de tierra).



*Figura 34: Zona de interés marcada*

Invirtiendo la máscara de la Figura 34 y restándosela a la de la Figura 33 se obtiene lo siguiente:



*Figura 35: Máscara de la planta de Teruel en la zona de interés*

Posteriormente, la máscara se limpia con los métodos ya descritos (cerramiento y apertura) y el resultado se refleja en la Figura 36.



*Figura 36: Máscara de la planta de Teruel limpiada*

Con esto ya se podrían marcar las filas de los paneles. El inconveniente de este método es que, debido a los reflejos del sol, los paneles tienen zonas oscuras y claras por lo que al seleccionar los puntos de referencia hay que asegurarse de que se eligen varias tonalidades. Por lo tanto, esta selección no puede ser del todo aleatoria. Además, para limpiar la máscara quizás se deba hacer un proceso iterativo debido a la textura porosa que se obtiene al aplicar la tolerancia.

Se ha investigado otra forma de crear la máscara binaria inicial que consiste en la transformación de la imagen de color RGB al espacio de color uniforme CIE 1976  $L^*a^*b$  (Figura 37) que permite cuantificar las diferencias visuales [9]. Al hacer esto se obtienen tres componentes: L, indica la luminosidad de 0 a 100; a, representa la variación entre rojo y verde y b, representa la variación entre amarillo y azul.

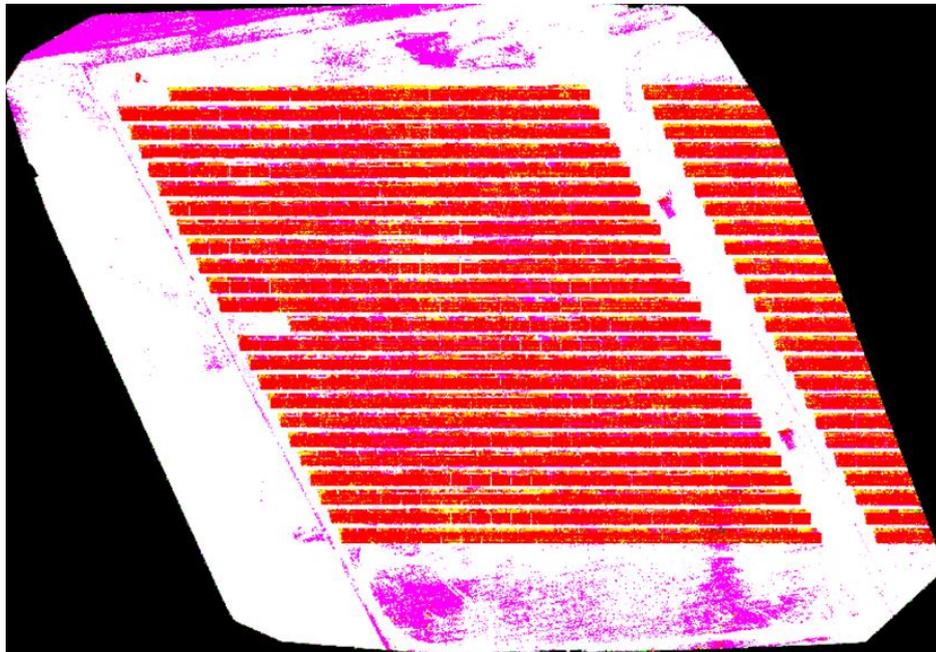
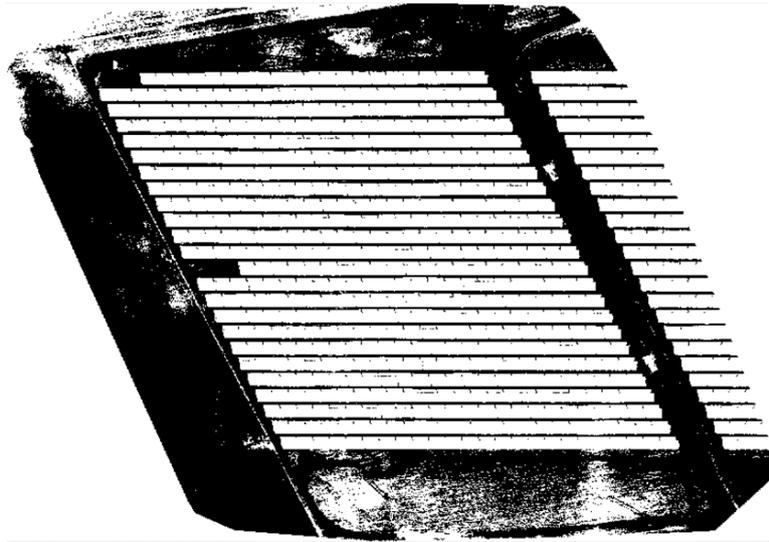


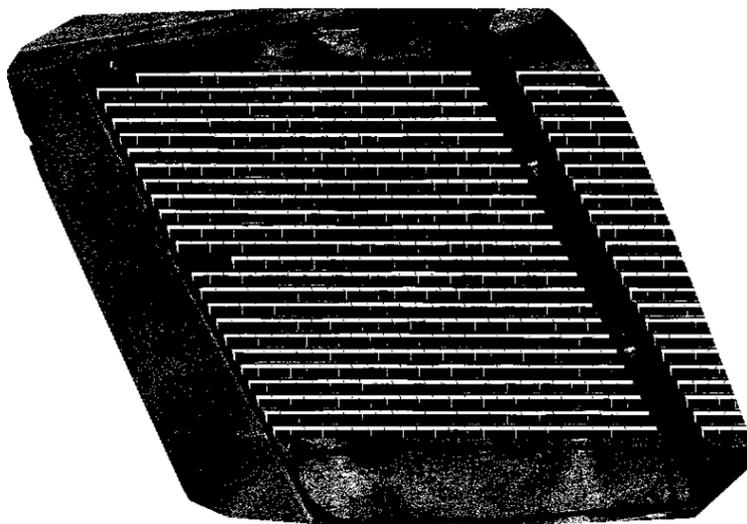
Figura 37: Ortofoto de la planta de Teruel en el espacio de color  $L^*a^*b$

A continuación, se aplica el método de segmentación basada en *K-means* (separación de un conjunto de datos en  $k$  grupos de modo que los datos pertenezcan al grupo con el valor medio más cercano) a las capas a y b, indicando que se desean separar dos colores (paneles y no paneles). La máscara que se obtiene es la siguiente:

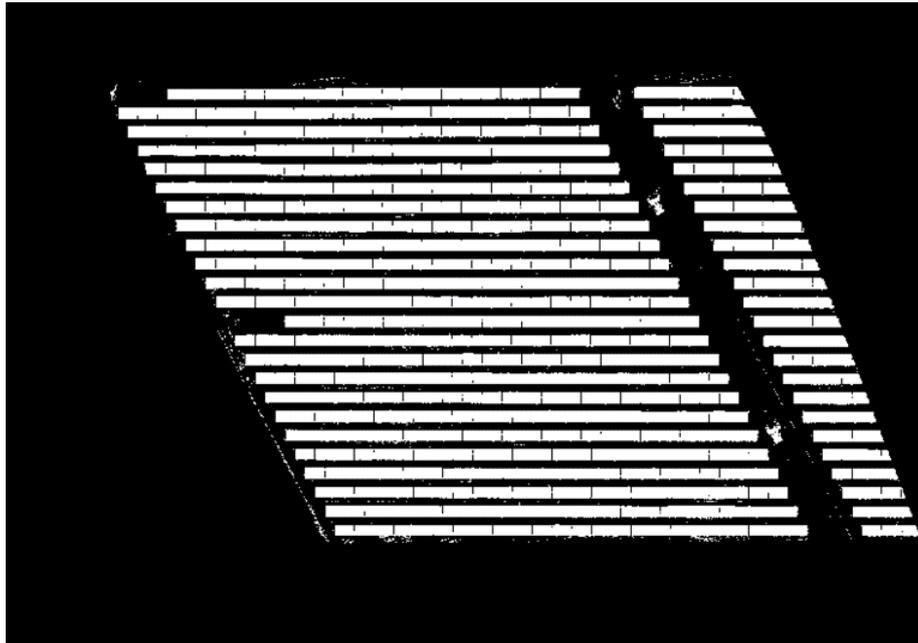


*Figura 38: Máscara de la planta de Teruel obtenida por medio de la segmentación de las capas a y b*

En la Figura 38 todos los píxeles de los paneles están incluidos en la máscara. Sin embargo, también se han incluido partes del terreno y, lo más importante, las sombras de los paneles. Resultaría imposible separar estas sombras con los procesos de cerramiento y apertura. Para solventar este problema se puede crear una máscara que incluya únicamente las sombras (Figura 39) y restársela a la máscara anterior. Esto se logra con el método de la tolerancia descrito antes. También se delimita la zona de interés para eliminar directamente las partes que no interesan. El resultado de la resta se refleja en la Figura 40.

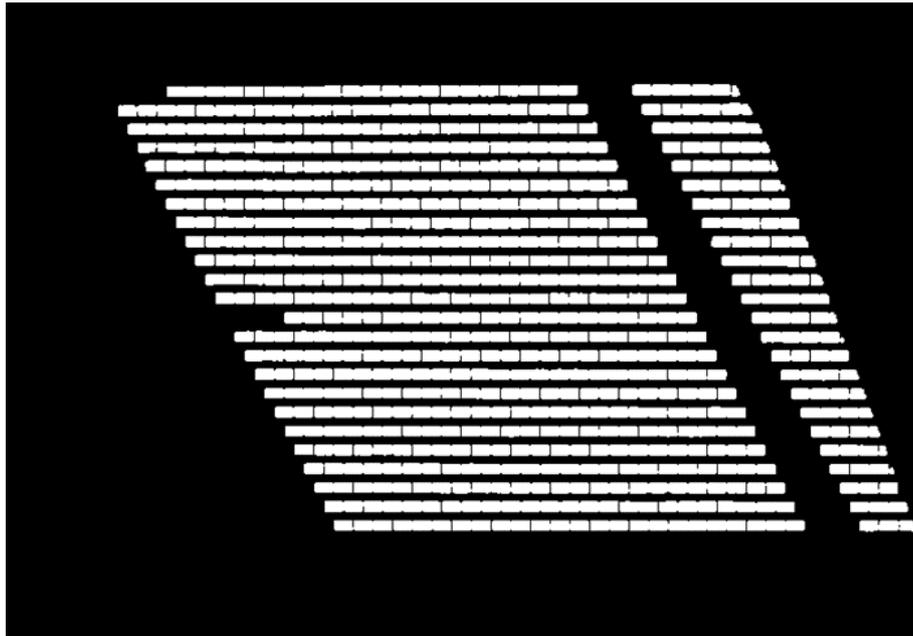


*Figura 39: Máscara de las sombras de la planta de Teruel obtenida por tolerancias*

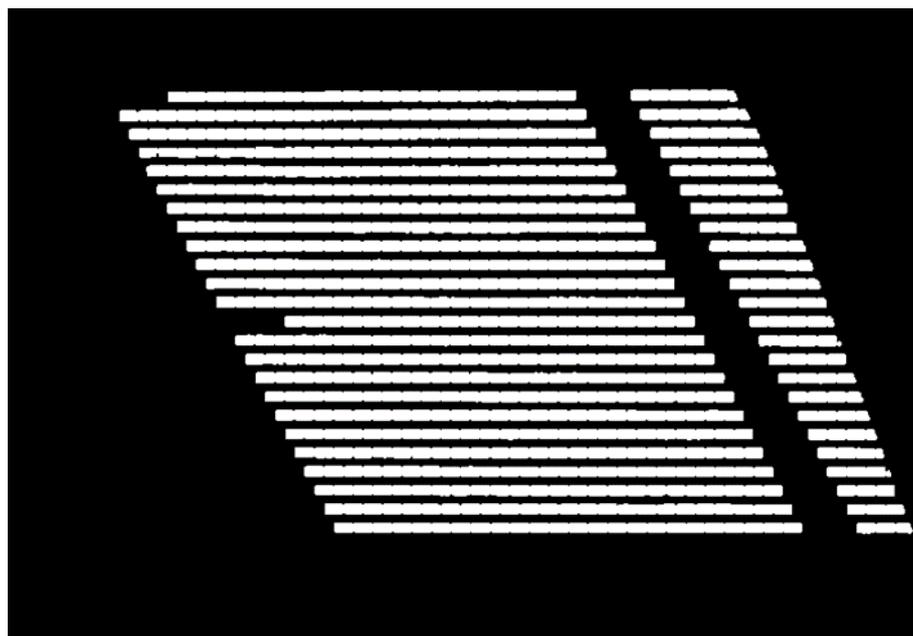


*Figura 40: Máscara de la planta de Teruel obtenida por medio de la segmentación de las capas a y b dentro de la zona de interés y sin sombras*

Una vez más se deben aplicar los procesos de cerramiento y apertura para llegar al resultado final. La desventaja que estas operaciones han supuesto hasta ahora es que el tamaño del elemento estructural se ha tenido que elegir de forma manual mediante prueba y error. Para automatizar este proceso se ha ideado un algoritmo con la siguiente lógica: la operación de apertura empieza con el elemento en forma de disco más pequeño posible, es decir, de tamaño 1; este tamaño se va aumentando en una unidad hasta que el número de objetos detectados en la máscara tras la apertura es el mismo para los dos tamaños más grandes; tras esto, comienza la operación de cerramiento que sigue exactamente el mismo procedimiento excepto que se detiene cuando el número de objetos detectados es el mismo para los tres tamaños más grandes del disco. En este caso primero se aplica apertura (Figura 41) y después cerramiento (Figura 42) ya que los blobs de los paneles no cuentan con una estructura porosa.



*Figura 41: Máscara de la planta de Teruel tras la apertura automática*



*Figura 42: Máscara de la planta de Teruel tras el cerramiento automático*

Puede darse el caso de que al final la máscara contenga blobs pequeños correspondientes a objetos que no son los paneles y que no se han podido eliminar. Estos se pueden filtrar estableciendo un umbral de área mínima, sin embargo, ya que se persigue la

automatización del sistema, se eliminan con un algoritmo que busca objetos cuya área es menor que la media de todos los objetos de la máscara y cuyo ángulo de inclinación se diferencia en más de 2 grados del ángulo del objeto con mayor excentricidad. Esta lógica se basa en que probablemente los blobs sobrantes tengan un tamaño más pequeño que las filas de paneles y una orientación aleatoria. Si aun así no se eliminan, se pueden seleccionar de forma manual o filtrar por área.

Estos procesos automáticos se han diseñado usando solamente la ortofoto de la planta de Teruel por lo que hay que comprobar si también funcionan en diferentes escenarios sobre todo en cuanto a:

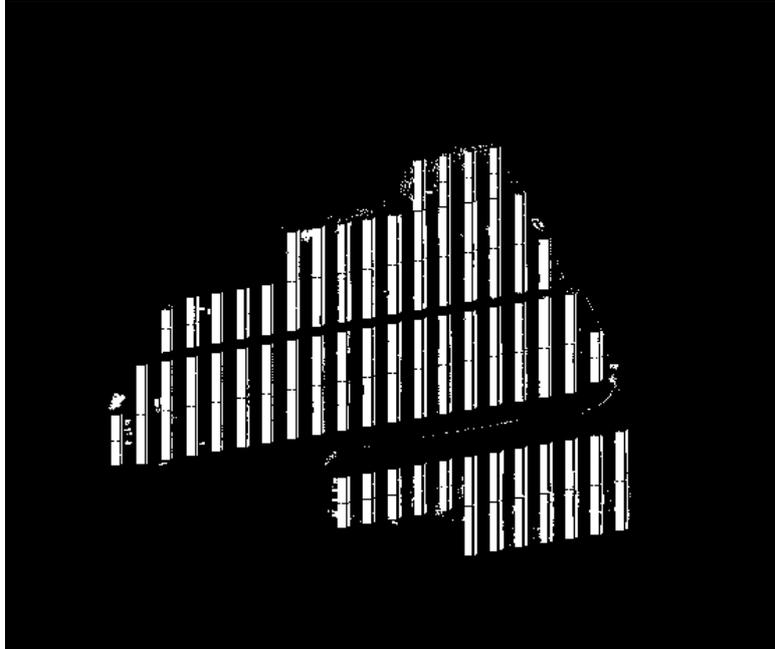
- Tolerancia para crear la máscara de las sombras
- Cuando detener la apertura automática
- Cuando detener el cerramiento automático
- Eliminación de blobs sobrantes

Para ello se ha obtenido una ortofoto de otro parque fotovoltaico en Murcia, tal como se muestra en la Figura 43.

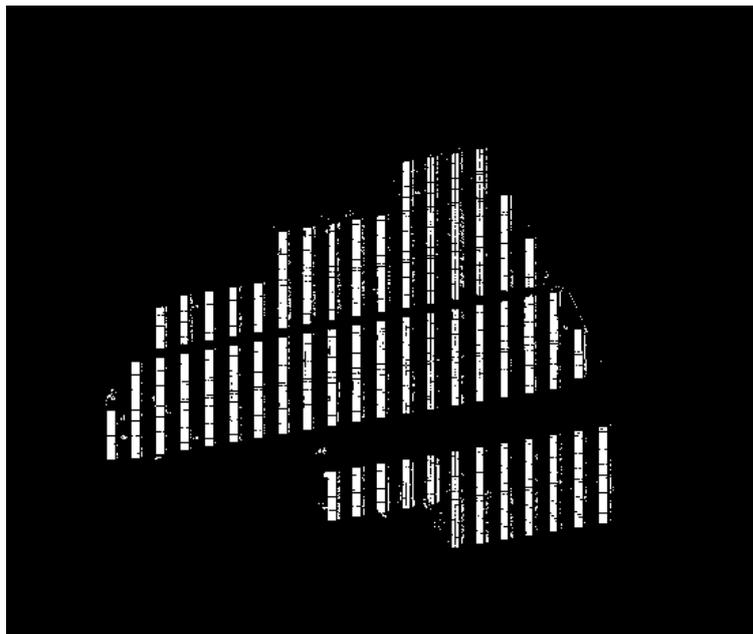


*Figura 43: Ortofoto de la planta de Murcia*

Al aplicar los algoritmos de segmentación por K-means en las capas a y b de la nueva ortofoto para obtener la máscara de paneles con sombras y el método de tolerancias (con la misma tolerancia que para la ortofoto de Teruel) para aislar las sombras se obtiene el resultado de la Figura 44 y la Figura 45.



*Figura 44: Máscara de la planta de Murcia obtenida por medio de la segmentación de las capas a y b dentro de la zona de interés*



*Figura 45: Máscara de las sombras de la planta de Murcia en la zona de interés*

Se observa que en la máscara de la Figura 44 también se han incluido muchas partes del terreno, aparte de paneles y sombras. Por otro lado, la máscara que debía tener solo las sombras incluye en su gran parte los paneles ya que son los objetos más oscuros de la imagen (Figura 45). Por lo tanto, la diferencia de las dos máscaras resulta en lo siguiente:



*Figura 46: Máscara obtenida al restar la Figura 45 a la Figura 44*

El resultado obtenido en la Figura 46 es inservible para la correcta localización de los paneles solares, incluso cambiando la tolerancia para detectar las sombras. Se concluye que los algoritmos creados están sesgados por la imagen que se usó para desarrollarlos y se precisa una forma universal de obtener las máscaras de paneles.

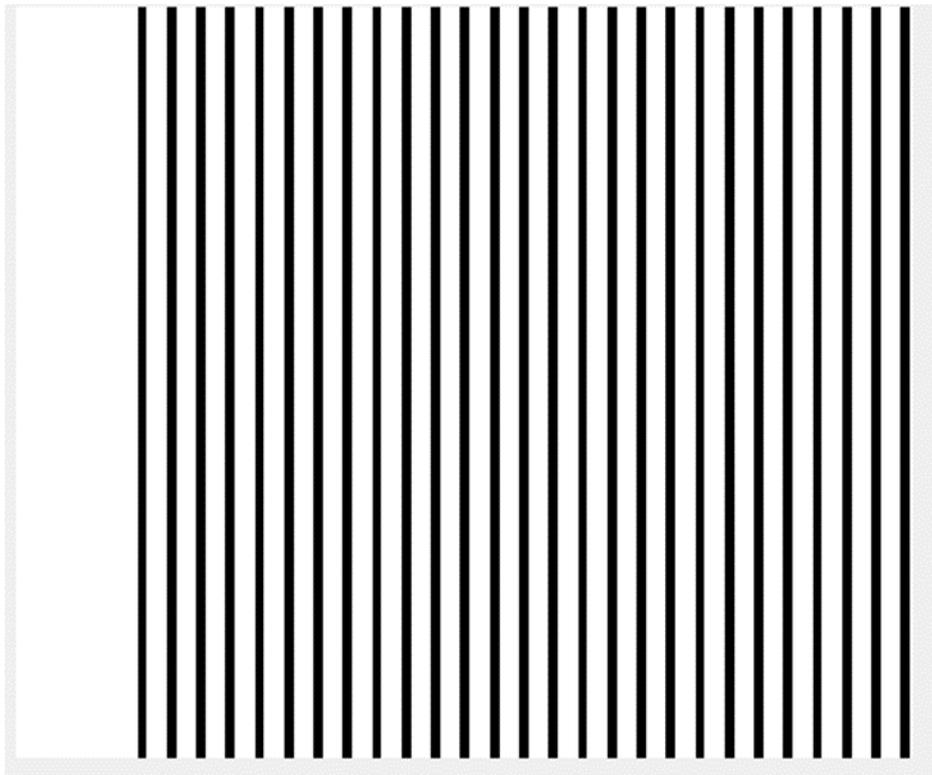
Observando la Figura 44 se aprecia que la totalidad de los paneles están incluidos en ella y que la mayor parte del “ruido” se encuentra entre las filas. Dado que la empresa para la cual se desarrolla este proyecto siempre instala los paneles por filas y las filas siempre están alineadas y tienen una distancia constante entre ellas se puede crear una forma de eliminar el espacio entre estas.

Para ello se debe indicar la siguiente información en la ortofoto:

- Distancia entre filas
- Ancho de una fila

- Extremo exterior de la primera fila respecto de la zona de interés (orientación horizontal: fila de arriba; orientación vertical: fila de la izquierda)
- Extremo exterior de la última fila respecto de la zona de interés (orientación horizontal: fila de abajo; orientación vertical: fila de la derecha)

Con esto se crea una máscara binaria que debe cubrir el espacio entre las filas. Para ello se parte del extremo exterior de la primera fila y se van insertando franjas de 1 lógicos (blancas) con el ancho igual al espacio entre las filas y separadas por una distancia igual al ancho de una fila, lo que se ve en la Figura 47.



*Figura 47: Máscara binaria para cubrir el espacio entre las filas de paneles*

Superponiendo esta máscara sobre la ortofoto se obtiene el resultado de la siguiente figura:

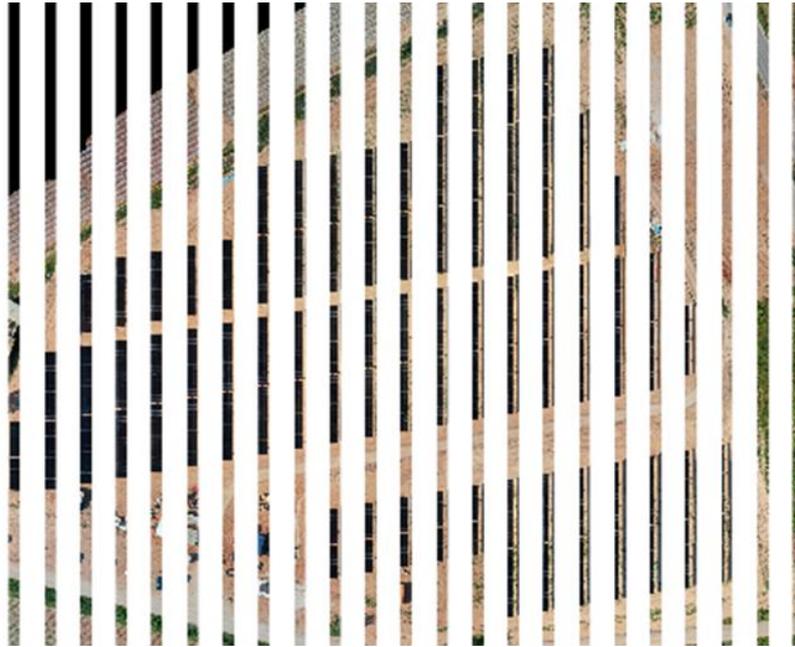
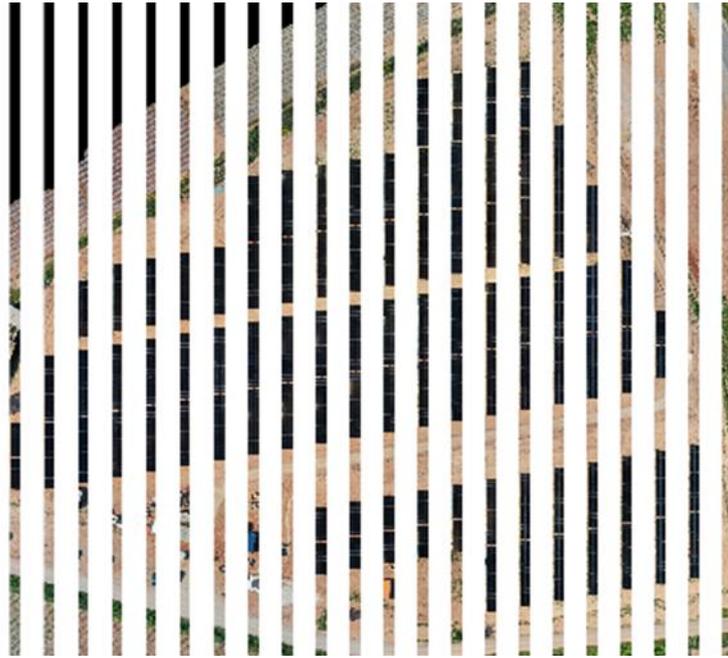


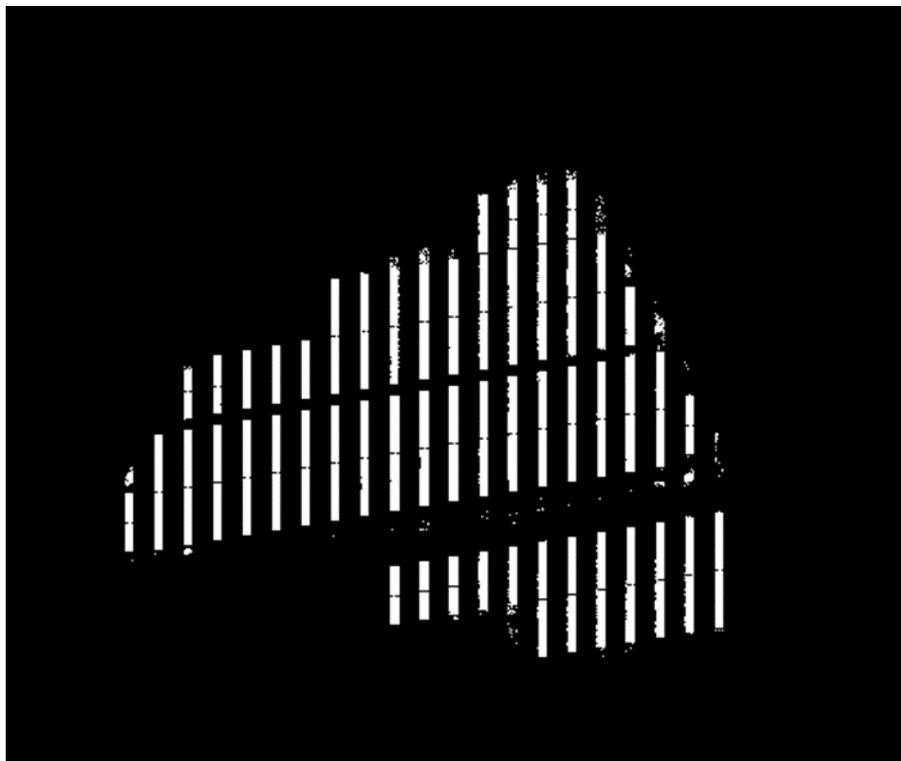
Figura 48: Ortofoto de la planta de Murcia con la máscara del espacio entre las filas superpuesta

En la Figura 48 se consigue un buen encaje en las primeras filas (a la izquierda) pero a medida que se avanza aparece un desvío significativo que puede deberse a que la distancia entre las filas no es del todo constante y resulta difícil marcar de forma muy precisa todos los puntos necesarios. Para solucionar este problema la máscara se escala tomando como referencia el extremo exterior de la primera fila (donde el encaje es mejor). Para decidir si se debe contraer o dilatar se usa la información del extremo exterior de la última fila. Si el valor de la máscara en ese punto es 0, es decir, el espacio reservado para las filas está superpuesto sobre esa región, la máscara se contrae gradualmente hacia el punto de referencia hasta que ese valor sea 1. Si, por el contrario, el valor es 1, la máscara se dilata gradualmente desde el punto de referencia hasta alcanzar el 0. Aplicando esta lógica se obtiene el siguiente resultado:



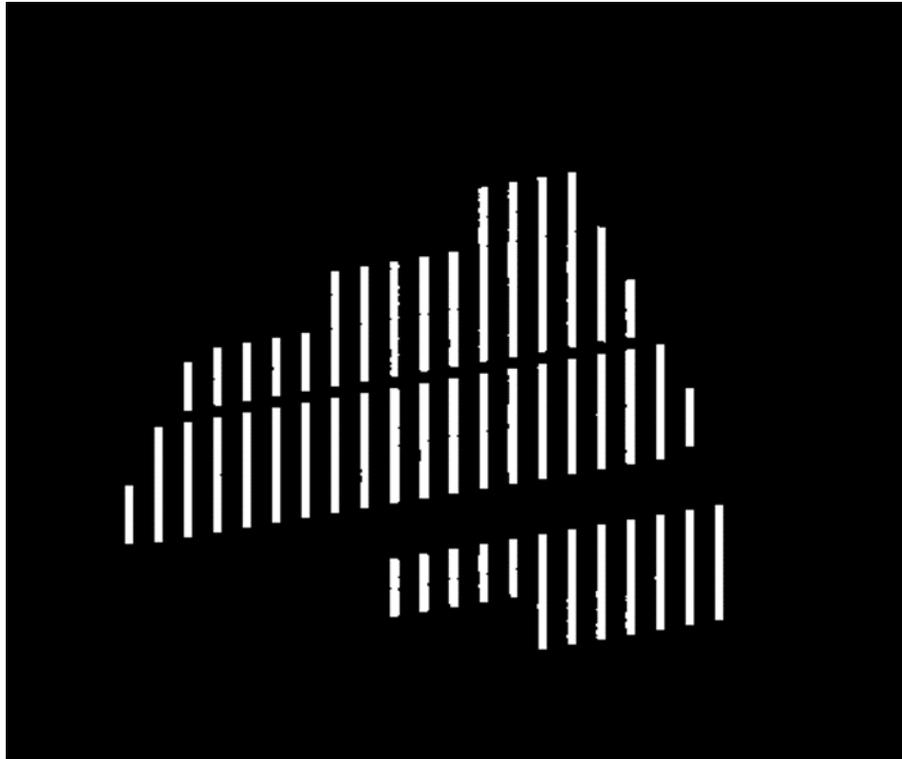
*Figura 49: Ortofoto de la planta de Murcia con la máscara del espacio entre las filas corregida superpuesta*

Se resta la máscara ajustada del espacio entre las filas a la de la Figura 44 y el resultado se observa en la Figura 50:



*Figura 50: Máscara de la planta de Murcia tras restar el espacio entre las filas*

Tras esto, a la máscara de la Figura 50 se le aplican los procesos de apertura y cerramiento automáticos desarrollados previamente, así como la eliminación automática de objetos pequeños, obteniendo un resultado satisfactorio (Figura 51), por lo que se concluye que estos procedimientos fueron diseñados correctamente.



*Figura 51: Máscara de la planta de Murcia tras la limpieza automática*

El método de limpiar el espacio entre las filas también funciona con la ortofoto de la planta de Teruel, por lo que se puede concluir que se ha logrado un algoritmo válido para múltiples escenarios. Cabe destacar que para crear la máscara del espacio entre las filas estas deben estar orientadas vertical u horizontalmente, si no fuera así habría que girar la ortofoto. Esto se podría hacer marcando dos puntos a lo largo de una fila para obtener su ángulo de inclinación, aunque tras revisar varios planos de plantas realizadas por la empresa se ha visto que las filas suelen tener orientación este-oeste o norte-sur por lo que es probable que el giro no sea necesario.



Figura 52: Ortofoto de la planta de Teruel con las filas de paneles marcadas

A modo de resumen se explican los pasos definitivos a seguir para obtener la máscara de los paneles:



Figura 53: Flujo lógico de la obtención de la máscara de paneles

### 4.3.Comparación visual de dos ortofotos

La idea principal de este proyecto es hacer el seguimiento de la construcción de un parque fotovoltaico realizando para ello vuelos regulares sobre la misma zona y obteniendo ortofotos en las que se vea el progreso. Por este motivo es interesante desarrollar una función que permita marcar zonas de la imagen en las que se han instalado nuevos paneles entre dos vuelos consecutivos. De esta forma se aportará valor a los informes por medio de una representación visual.

Como primera aproximación se ha editado la captura de Google Maps para eliminar algunos paneles y se considerará como imagen inicial mientras que la no editada será la final:

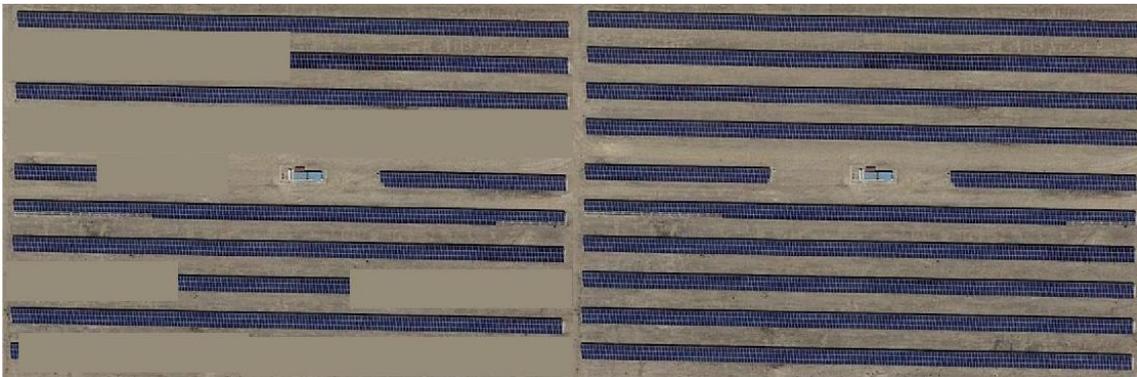


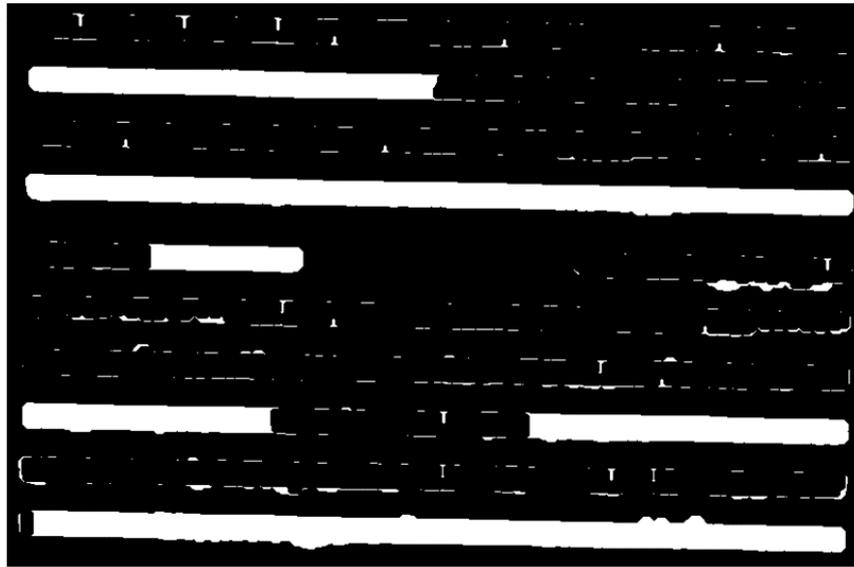
Figura 54: Captura de Google Maps editada (izquierda) y sin editar (derecha)

Se obtienen las máscaras de las dos capturas:



Figura 55: Máscara inicial (izquierda) y máscara final (derecha)

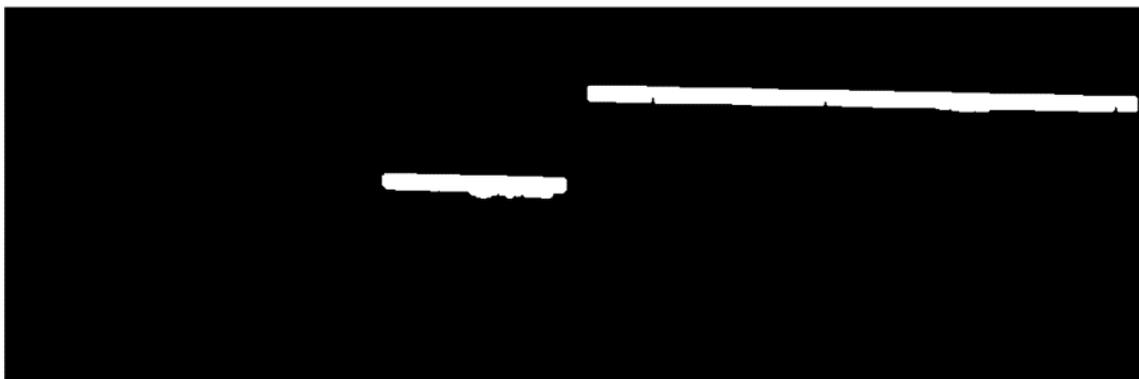
Restando la máscara inicial a la final se obtiene el avance de construcción:



*Figura 56: Diferencia entre la máscara final e inicial*

El requisito para que este método funcione, y que supone su gran desventaja, es que las dos imágenes tienen que estar perfectamente alineadas para realizar correctamente la resta. Aun así, se obtienen objetos sobrantes que se deben limpiar ya que es imposible que los blobs de las dos máscaras sean exactamente iguales, por lo que se debe desarrollar otra forma de comparación.

Se puede aislar un blob individual de la máscara final e ir sumándolo a cada uno de los blobs aislados de la máscara inicial.



*Figura 57: Blob aislado de la máscara inicial (izquierda) y de la máscara final (derecha)*



*Figura 58: Suma del blob de la máscara inicial y el de la final*

En este ejemplo, en la Figura 58, se obtienen dos blobs lo cual significa que el blob de la imagen final es nuevo respecto del blob de la imagen inicial. Si para cualquier combinación del blob de la imagen final con cada uno de los blobs individuales de la imagen inicial se obtienen dos blobs en la suma, significa que el blob de la imagen final es nuevo. Si en una de las sumas se obtiene un único blob es que se trata del mismo objeto. En ese caso se comprueba la diferencia de sus áreas, si supone más del 10% se considera que el objeto ha sido completado y se marca como nuevo. Repitiendo este proceso para cada uno de los blobs de la imagen final se detectan todas las diferencias. Este método es más robusto frente a desplazamientos y giros relativos de las dos imágenes ya que basta que uno de los píxeles del mismo objeto coincida para que se identifique como lo mismo. Sin embargo, si un blob final se solapa con dos o más blobs iniciales pueden surgir problemas en la correcta detección de los objetos. Además, la realización de todas las combinaciones posibles puede llevar mucho tiempo (en la ortofoto de la planta de Teruel hay 48 filas por lo que en el peor de los casos se harían 2304 combinaciones).

Se ha ideado una manera de agilizar el proceso de comparación. Las máscaras inicial y final se giran para que los blobs tengan orientación horizontal o vertical (si no la tenían ya). Los blobs de ambas máscaras se sustituyen por rectángulos sólidos a partir de los rectángulos que los encierran (para eliminar los posibles huecos). A continuación, se elige un blob de la máscara inicial y se compara con el blob de la máscara final que encierra el

centroide del primero. Si no hay una diferencia significativa de superficie se considera que son el mismo objeto, si por el contrario esta diferencia es importante se considera que es un objeto que se ha completado. Los objetos de la máscara final que no se llegan a comparar se consideran completamente nuevos. De esta forma se elimina la necesidad de hacer todas las combinaciones ya que directamente se comparan los mismos objetos de las dos imágenes.

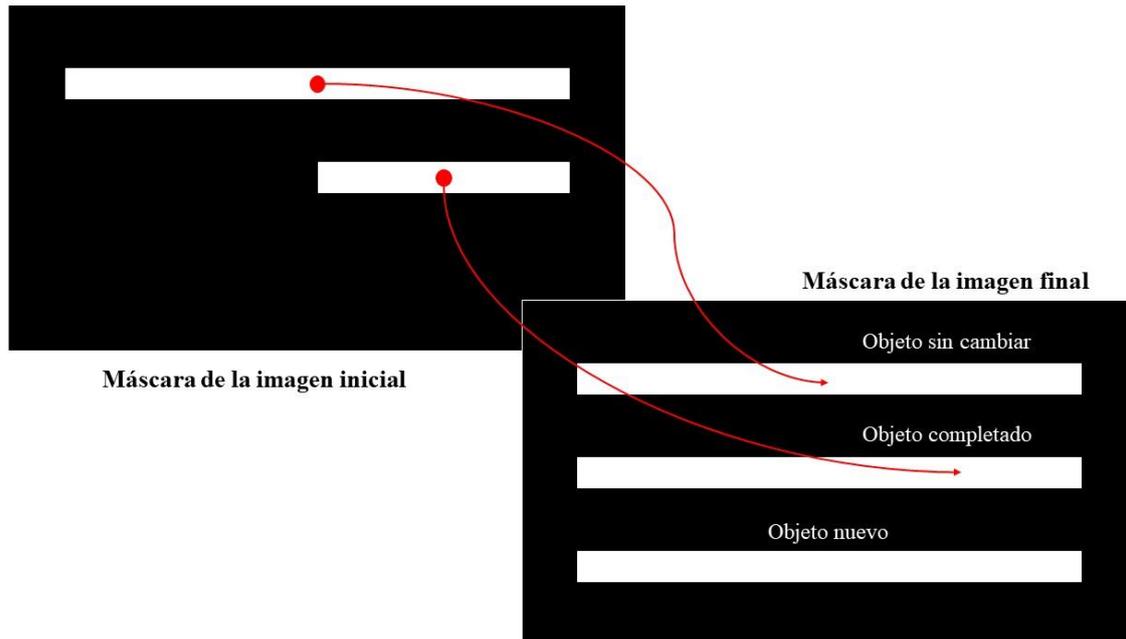


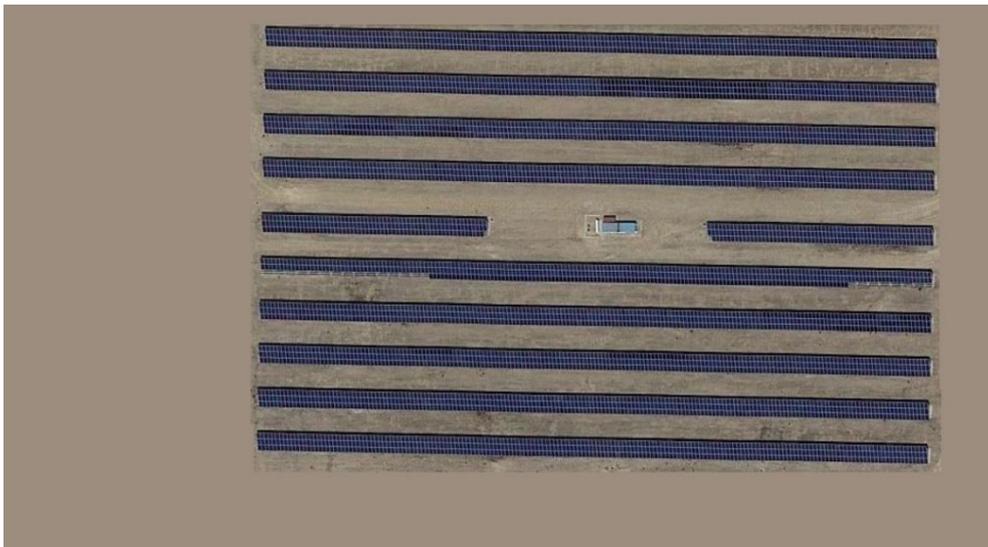
Figura 59: Proceso de comparación de máscaras

Hasta ahora los procesos de comparación se han desarrollado suponiendo que la imagen inicial y la final tienen el mismo tamaño y coinciden entre sí. Hay muchas posibilidades de que esto no sea así en un caso real ya que, incluso haciendo el mismo vuelo en una zona, no se puede obtener dos ortofotos idénticas, por lo que hay que tenerlo en cuenta.

Se ha desplazado la captura modificada de Google Maps (Figura 60), al igual que la captura original (Figura 61), para que tengan diferentes posiciones.



*Figura 60: Captura de Google Maps modificada y desplazada (imagen inicial)*



*Figura 61: Captura de Google Maps original desplazada (imagen final)*

Cabe destacar que los desplazamientos realizados están exagerados para poder ilustrar el problema con más facilidad. Se obtienen las máscaras de ambas imágenes y se giran para alinear las filas horizontalmente (Figura 62):

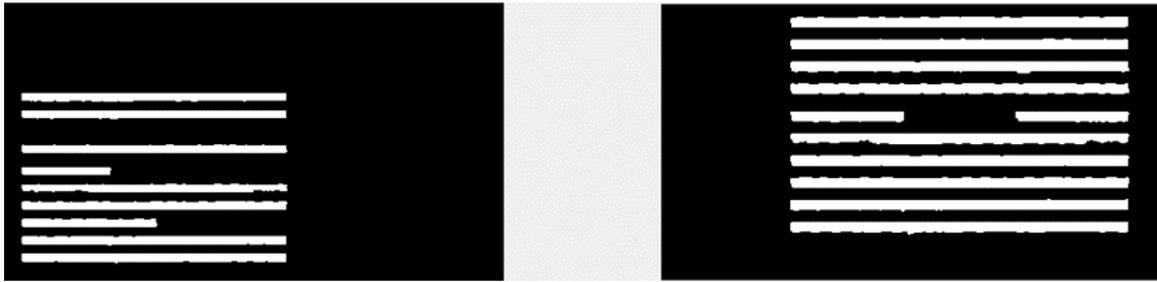


Figura 62: Máscara girada de la captura modificada desplazada (izquierda) y máscara girada de la captura original desplazada (derecha)

Las máscaras se deben recortar para que tengan el mismo tamaño y además se debe recortar la misma zona en ambos casos. Se elige de forma manual el mismo punto de referencia en las dos imágenes de color. Se calcula la zona de recorte en la imagen final (Figura 63) de forma que quede delimitada por los blobs de esta y el punto de referencia especificado (si este está fuera de los límites de los blobs).

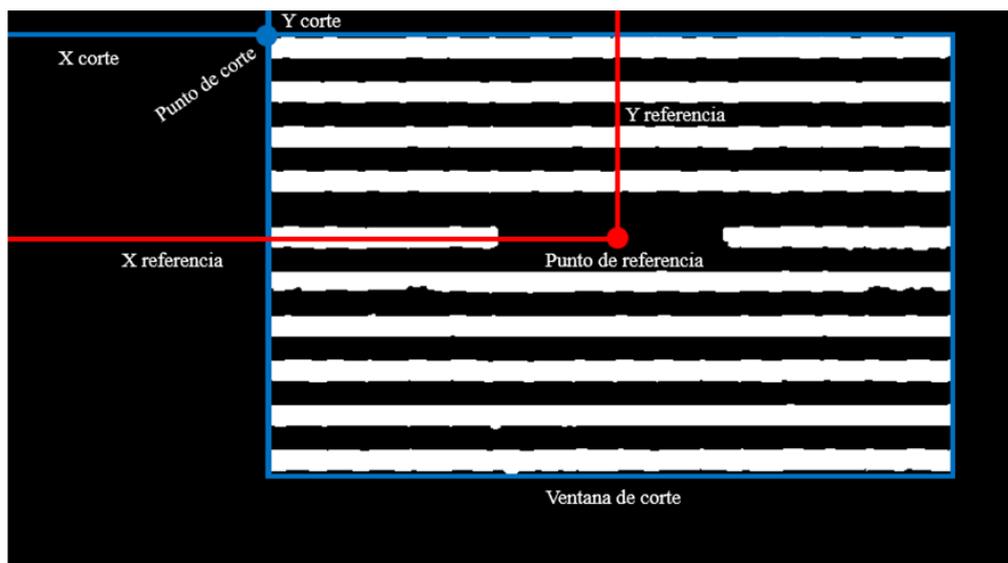


Figura 63: Cálculo de la zona de corte en la máscara final

Una vez que se obtiene el punto de corte en la imagen final se calcula su distancia en los ejes X e Y hasta el punto de referencia marcado. De esta forma el punto de corte se puede trasladar a la máscara de la imagen inicial a partir de su punto de referencia, manteniendo el mismo tamaño de la ventana de corte (Figura 64):

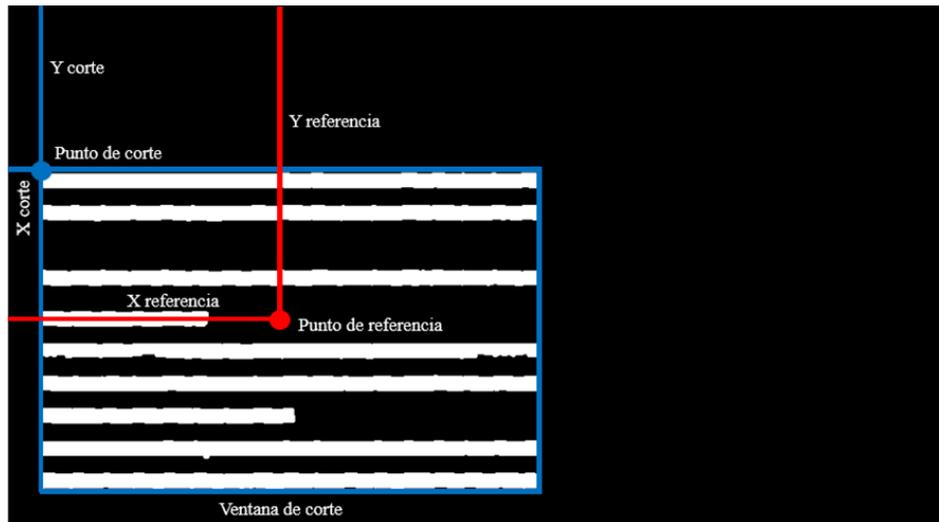


Figura 64: Cálculo de la zona de corte en la máscara inicial

La máscara de la imagen inicial se agranda añadiendo píxeles negros a sus bordes para asegurar que la zona de recorte entra por completo y que el punto de corte esté dentro de la imagen (Figura 65). Para ello se añade una franja encima y otra debajo con la altura correspondiente a la de la ventana de corte y franjas a los lados con el ancho correspondiente al de la ventana de corte. Las coordenadas del punto de corte ahora se deben referir a la imagen agrandada. Para ello a la componente del eje X se le suma el ancho de la ventana de corte y a la componente del eje Y se le suma la altura de la ventana de corte:

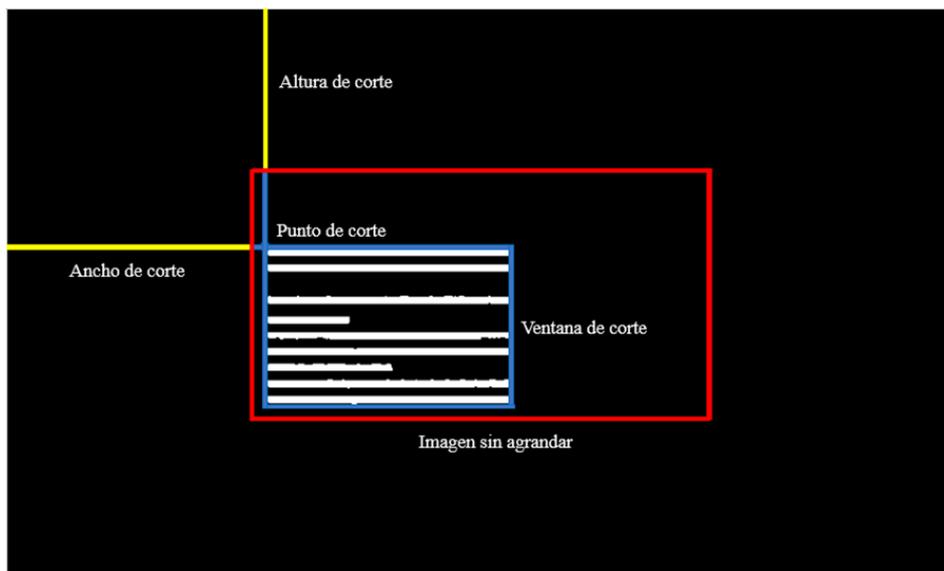


Figura 65: Máscara inicial agrandada

Una vez realizados estos preparativos las máscaras se recortan:



Figura 66: Máscara inicial recortada (izquierda) y máscara final recortada (derecha)

Se hace la comparación con el método explicado anteriormente. Dado que los recuadros para marcar los paneles que se obtienen están referenciados a las máscaras recortadas sus coordenadas se deben trasladar a la imagen final original (ya que es ahí donde se van a colocar). Para ello sus componentes X e Y se agrandan con las componentes X e Y del punto de corte de la imagen final.

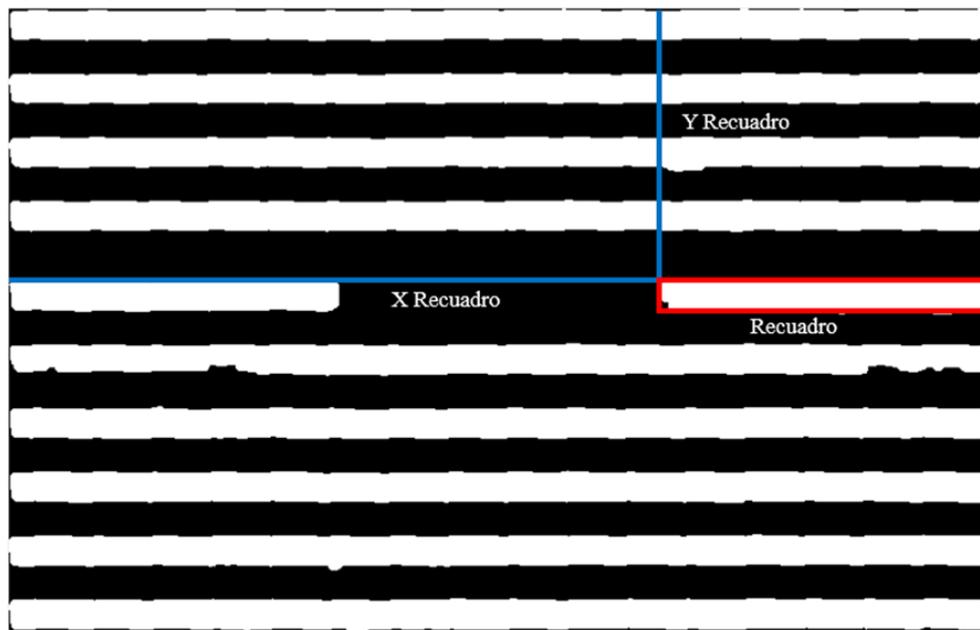
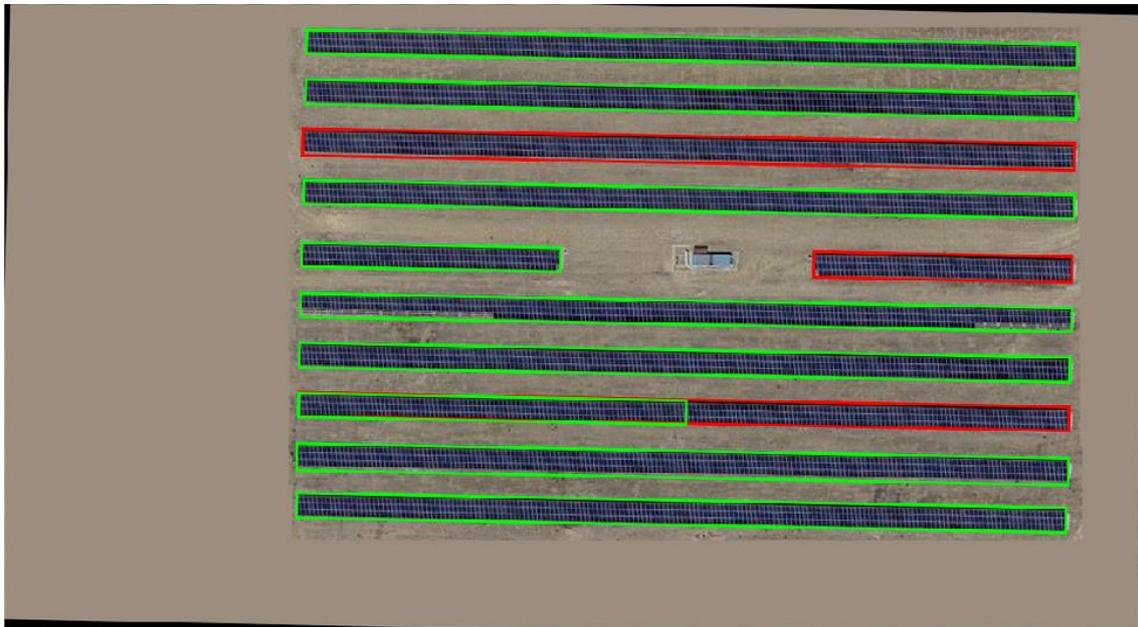


Figura 67: Posicionamiento del rectángulo en la máscara recortada

Finalmente, se marcan las mesas en la imagen final de color y se vuelve a girar a su posición original, lo que se observa en la Figura 68:



*Figura 68: Imagen final con las filas marcadas. Elementos nuevos (rojo) y elementos antiguos (verde)*

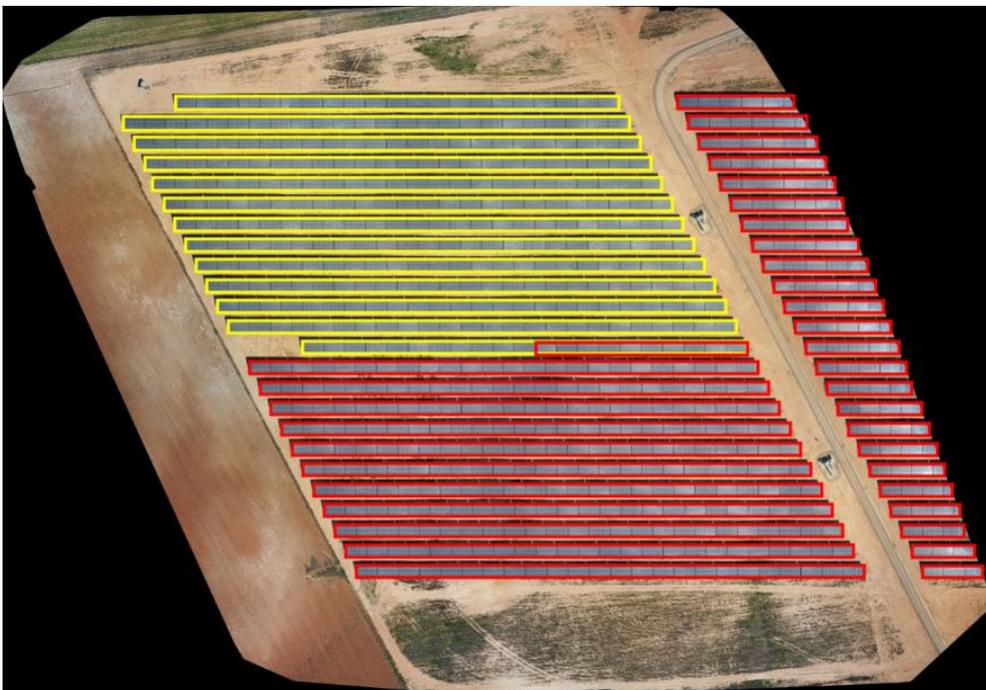
En un caso real se puede aprovechar el hecho de que las ortofotos están georreferenciados para que de forma automática se elija el mismo punto de referencia en ambas. Se toma la esquina superior izquierda de la ventana de corte ya que es el punto a partir del cual se recorta la imagen en Matlab, es decir, en este caso el punto de corte y el de referencia son el mismo. El punto de corte se traslada de una ortofoto a otra usando el método explicado en el apartado 4.1.

Para comprobar esto último se ha modificado una de las ortofotos de la planta de Teruel (distinta de la que se ha usado hasta ahora para que se datos geográficos sean algo diferentes) quitando una parte de los paneles (Figura 69):



*Figura 69: Otra ortofoto de la planta de Teruel modificada*

Se obtiene un resultado satisfactorio (Figura 70) al comparar esta ortofoto con la de la Figura 31 usando sus datos de georreferenciación:



*Figura 70: Ortofoto de la planta de Teruel con las filas marcadas. Elementos nuevos (amarillo) y elementos antiguos (rojo)*

A modo de resumen se incluye el flujo definitivo de los procedimientos de comparación:

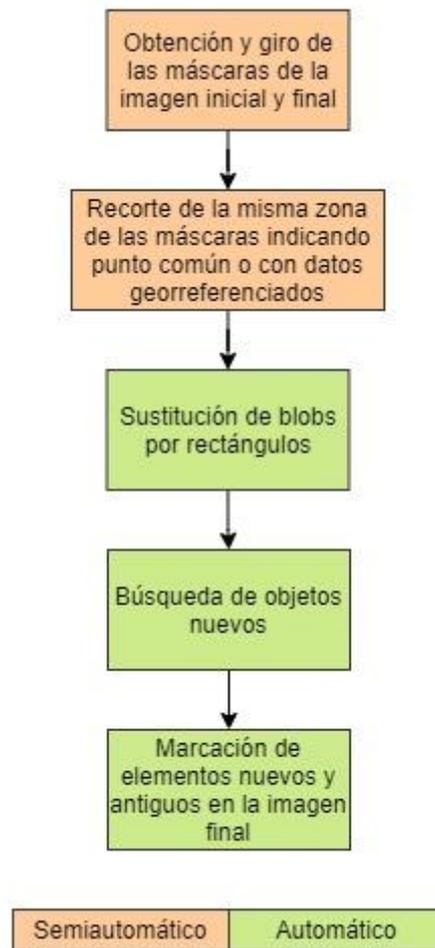


Figura 71: Flujo lógico de la operación de comparación

#### 4.4. Conteo de paneles

Un aspecto muy importante a la hora de realizar el seguimiento consiste en contar el número de paneles solares instalados ya que es algo que se debe reflejar en los informes elaborados para los clientes. Cabe destacar que no se necesita un número muy preciso ya que se permite un error del 10% y, además, en los informes se refleja el tanto por ciento respecto del total y no la cantidad exacta de paneles. Una vez que se tiene la máscara de los paneles la información de la que se dispone es la siguiente:

- Áreas en píxeles de los blobs
- Dimensiones en píxeles de los rectángulos que encierran los blobs

- Resolución de la ortofoto en cm/píxel
- Dimensiones de un panel (2x1 m)

Una forma de realizar el conteo es pasando las dimensiones de los paneles de metros a píxeles (usando la resolución de la ortofoto) y obteniendo su superficie en píxeles. A continuación, se suman las áreas de todos los blobs y se divide por el área de un panel. Este método proporciona un número inferior al real. Esto se puede deber a que las dimensiones de los paneles en la imagen no son las reales debido a las irregularidades del terreno, la inclinación de los propios paneles y el proceso de montaje de la ortofoto.

Otra forma de contar consiste en pasar las dimensiones de los rectángulos de los blobs a metros. Tras esto se divide la dimensión transversal del rectángulo entre el alto de un panel y la dimensión longitudinal entre el ancho de un panel. Con esto se obtienen los paneles que caben en el rectángulo en ambas direcciones. Haciendo su multiplicación se deducen los paneles que caben en una fila y repitiendo el proceso para todas las filas se obtienen los paneles totales. Este método proporciona un número mayor de paneles que el real, lo que se puede deber a que los huecos entre las mesas añaden más longitud a los rectángulos. Sin embargo, si se hace el promedio del número de paneles obtenido de ambas maneras se consigue un resultado bastante próximo al real y el error está en torno al 3%.

Por último, se ha implementado una forma aún más precisa de contar los paneles. Se requiere que se introduzca la cantidad de estos que se instala en el sentido transversal de las filas (es igual para todas) y que se seleccione una fila de la ortofoto para indicar el número de paneles que tiene en su sentido longitudinal. De esta forma se obtiene una relación que permite calcular el número de paneles en el sentido longitudinal de todas las filas a partir de su longitud y, además, se elimina el cálculo en el sentido transversal. Con este método se obtiene un error menor al 0,5%. La información solo se deberá introducir al analizar la primera ortofoto de una planta ya que al hacer todos los vuelos a la misma altura la relación obtenida no cambiará puesto que el tamaño relativo de los paneles tampoco lo hará.

#### 4.5. Superposición y ajuste de planos

Los planos de AutoCAD de las plantas fotovoltaicas se pueden importar en Matlab y superponer sobre las ortofotos usando la información de georreferenciación. Para ello los planos deben ser exportados con la ayuda de AutoCAD Map 3D obteniendo de esta forma tres archivos: shp, shx y dbf. Estos archivos son necesarios para crear una máscara en Matlab que se pueda solapar con las ortofotos.

Primero, se ha realizado una prueba con una de las ortofotos obtenidas en Zuriáin. El camino de la ortofoto se ha delineado en AutoCAD Map 3D y se han exportado los archivos pertinentes. La combinación resultante es la siguiente:



*Figura 72: Ortofoto de Zuriáin con el camino de AutoCAD Map 3D superpuesto*

En la Figura 72 se observan ciertas desviaciones entre el camino trazado en AutoCAD Map 3D y el camino de la ortofoto. Dado que la zona de la imagen está localizada en Navarra se ha usado la base de datos de IDENA (Infraestructura de Datos Espaciales de Navarra) [10] para volver a delinear el camino y exportarlo a Matlab. En este caso se obtiene lo siguiente:



*Figura 73: Ortofoto de Zuriáin con el camino de IDENA superpuesto*

En el caso de la Figura 73 el trazado del camino encaja perfectamente sobre la ortofoto. La diferencia entre los resultados obtenidos por medio de AutoCAD Map 3D e IDENA se puede deber a que en IDENA existe información sobre la elevación del terreno que quizás contribuye a mejorar la proyección del camino. Esta información podría ser especialmente relevante en este caso ya que el camino de la ortofoto tiene un desnivel total de unos 130 m. Asimismo, puede tener cierto efecto la imprecisión de la georreferenciación de la imagen.

Tras realizar esta prueba se han importado los planos de las mesas de paneles de las plantas de Teruel y Murcia a Matlab y se han superpuesto sobre las ortofotos correspondientes. Se ha observado que los planos no encajan del todo con las ortofotos y que, además, se producen dos tipos de desajustes: desajuste progresivo (Figura 74) y desajuste constante (Figura 75).



*Figura 74: Detalle de la ortofoto de la planta de Teruel con el plano de las mesas superpuesto*



*Figura 75: Detalle de la ortofoto de la planta de Murcia con el plano de las mesas superpuesto*

En el desajuste progresivo (Figura 74) tanto en el eje vertical como en el horizontal la desviación del plano es más grande cuanto más se aleja de un cierto punto de referencia, lo que significa que se trata de una distorsión proporcional a la distancia hasta los puntos

de referencia horizontal y vertical, y que haciendo un escalado de la imagen del plano se puede conseguir un encaje mejor. Este desajuste se puede deber a dos causas. La primera es la irregularidad del terreno. Como ya se ha visto, en los planos de AutoCAD no se tiene información de la elevación del terreno (en este caso hay bastante desnivel). La segunda es la inexactitud a la hora de instalar los paneles. Los operarios no deben seguir los planos de manera muy precisa y en ocasiones se deben adaptar al propio terreno.

Para hacer el escalado en cualquiera de los ejes se pueden marcar dos distancias de desvío entre una mesa del plano y una de la ortofoto (en el eje correspondiente). Estas distancias deben tener diferentes valores para que de esta forma se calcule, realizando una interpolación lineal, el punto de referencia, es decir, el punto donde la desviación entre el plano y la foto es nula. A continuación, se calcula el factor de escalado como la ratio entre una de las distancias de desvío y la distancia al punto de referencia y se hace el escalado de la imagen del plano en el eje correspondiente tomando como base el punto de referencia.

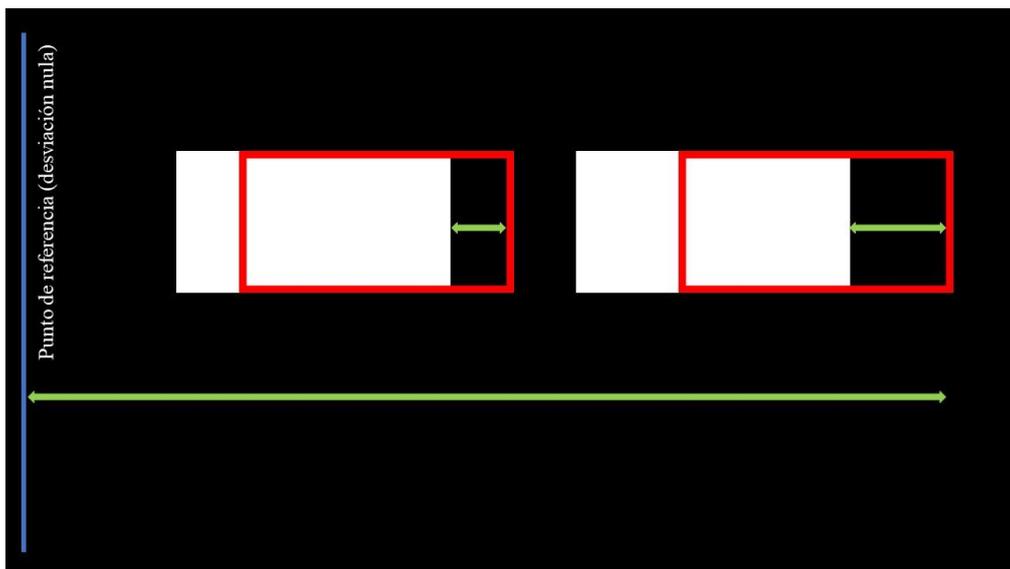


Figura 76: Ajuste de la desviación progresiva

Realizando estos ajustes se obtiene el siguiente resultado:



*Figura 77: Detalle de la ortofoto de la planta de Teruel con el plano de las mesas corregido superpuesto*

En cuanto al desajuste constante, en la ortofoto de Murcia (Figura 75) se observa el mismo desvío en el eje vertical para todas las mesas que se puede corregir moviendo la imagen del plano la cantidad necesaria (Figura 78). Esto se debe a la inexactitud de geoposicionamiento de la propia ortofoto. Cabe destacar que el desajuste en el eje horizontal en este caso se debe a que se trata de mesas con seguidores en el eje longitudinal y que en el momento de tomar las fotografías los paneles estaban muy inclinados (los centros de las mesas de la foto y de los planos coinciden ya que es el eje de giro).

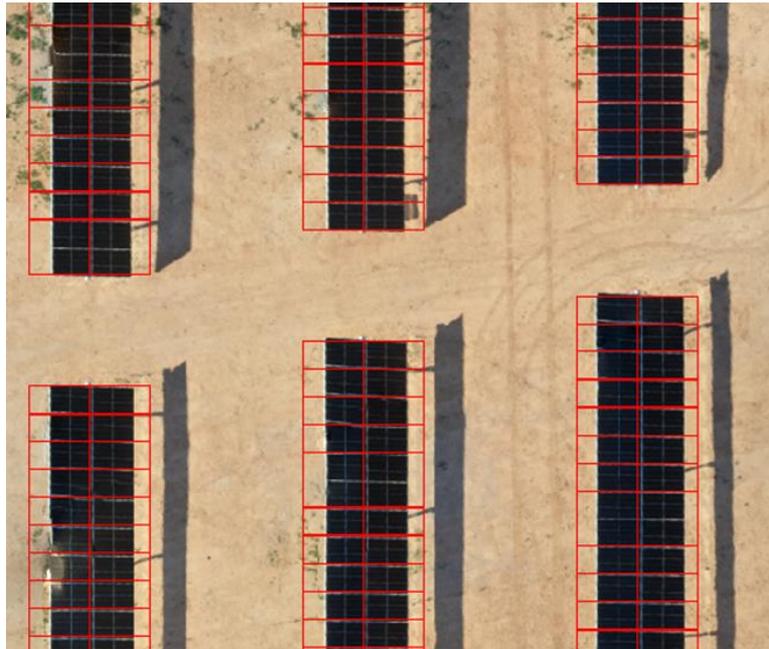


Figura 78: Detalle de la ortofoto de la planta de Murcia con el plano de las mesas corregido superpuesto

El resultado que se obtiene en ambos casos no es del todo perfecto, pero permite hacer un seguimiento de las mesas de paneles. Para ver el avance de construcción de cada mesa se crea una máscara binaria de las mesas del plano sustituyéndolas por rectángulos sólidos. A continuación, se aísla cada uno de estos rectángulos, se invierte y se resta a la máscara de las mesas de la ortofoto.

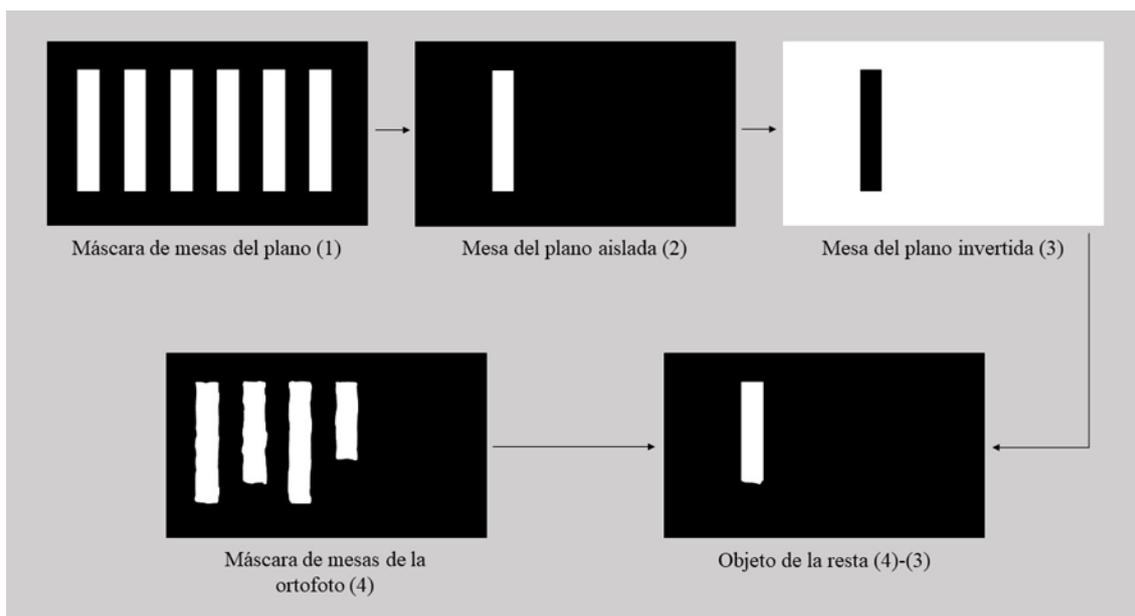
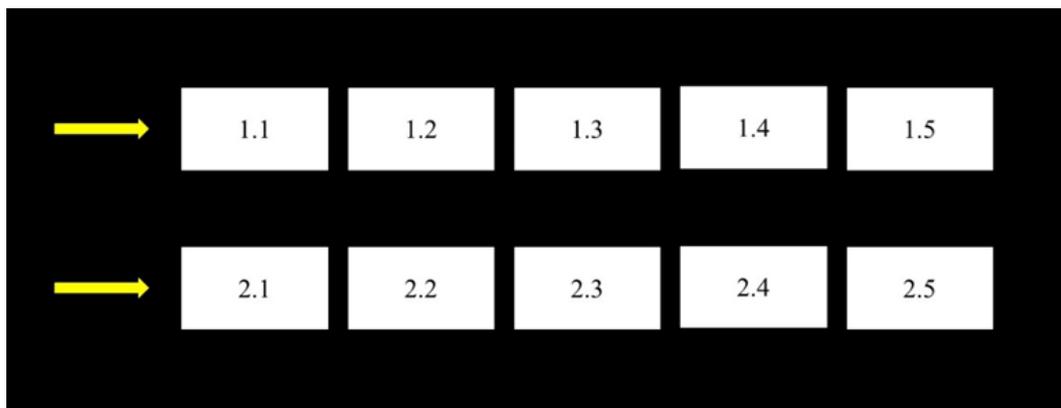


Figura 79: Proceso de comprobación del avance de las mesas

Analizando el resultado de la resta se puede calcular el avance de cada mesa. En un principio se planteaba comparar la superficie del objeto obtenido de la resta con la superficie de la mesa del plano, sin embargo, en el caso de una instalación con seguidores, aunque una mesa estuviera al 100% su superficie sería menor que en los planos debido al giro. La mejor opción es comparar la longitud de la mesa del plano con la longitud del objeto de la resta ya que los paneles se instalan siempre en el sentido longitudinal. De esta forma se elimina el efecto de giro de las mesas y de la posible pérdida de información al eliminar el espacio entre las filas para conseguir la máscara de los paneles. Además, el problema de que en la máscara de la ortofoto las mesas no están separadas se compensa con el hecho de que en los planos sí lo están, permitiendo individualizarlas.

Las mesas de los planos se indexan por filas y por el orden de aparición en estas para tener un sistema organizado que facilite la elaboración de informes. Para hacer esto la máscara de las mesas del plano se recorre en sentido horizontal o vertical, dependiendo de la orientación de las filas, en busca de estas.



*Figura 80: Indexación de las mesas del plano, orientación horizontal de las filas*

En un caso de seguimiento real la corrección del plano se haría sobre una ortofoto que tendría hincas con estructuras de apoyo y quizás algunos paneles. Una vez obtenida la imagen del plano corregido se debería poder usar para todas las ortofotos que se tomen de la misma zona. Sin embargo, debido a pequeñas discrepancias entre las diferentes ortofotos el plano corregido no encaja de la misma forma en todas ellas, como se observa en la siguiente figura:



*Figura 81: Detalle del plano corregido de las mesas de la planta de Teruel superpuesto sobre una ortofoto distinta de la que se ha usado para su corrección*

Al calcular el avance de las mesas en una ortofoto distinta de la usada para la corrección del plano se pueden obtener valores imprecisos debido al desajuste. Para solucionar esto se usa como referencia el avance obtenido de la ortofoto sobre la que se ha corregido el plano. Las mesas que estaban completadas al 100 % en la primera deberán estarlo también en la segunda. Esto permite obtener un factor para corregir el desajuste.

Sabiendo el avance de cada mesa se puede obtener el avance correspondiente de cada fila o incluso el total de la zona estudiada haciendo una ponderación en función de la superficie de las mesas en el plano ya que puede darse el caso de que haya mesas con diferente número de paneles. Además, se puede crear una representación visual como la de la Figura 82 para incluirla en los informes, donde cada mesa se representa de un color distinto en función de su avance.

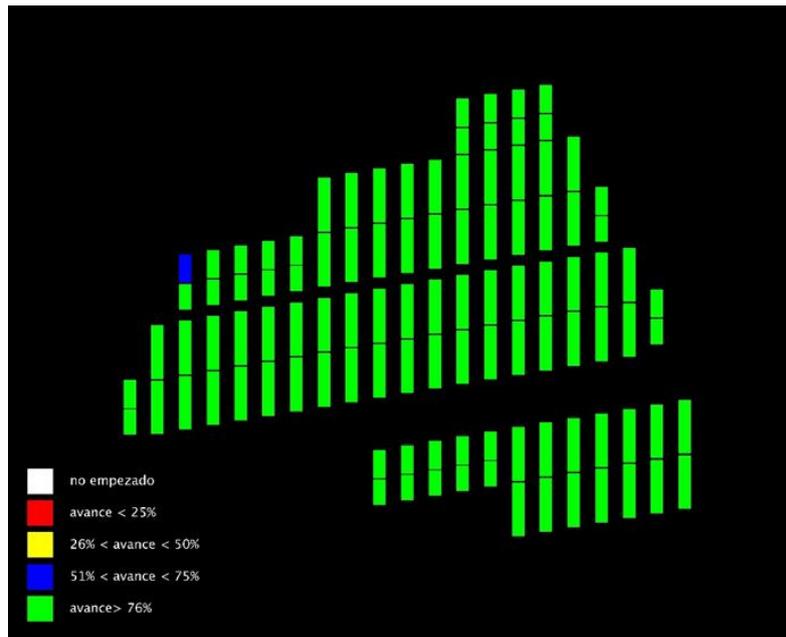


Figura 82: Avance de las mesas de la planta de Murcia

Además de los planos de las mesas también se pueden importar los planos del vallado, caminos internos, etc. De esta forma se puede realizar una inspección visual para determinar de forma aproximada si se han construido en el lugar adecuado. En el caso de los caminos (Figura 83), se puede medir su longitud de forma manual y comparar con el total que se debe realizar.



Figura 83: Ortofoto de la planta de Murcia con el plano del camino interno superpuesto.

### 4.6.Elaboración de informes

Resulta interesante plasmar la información obtenida en Matlab en un documento Excel ya que esta es la herramienta que se usa en la empresa para realizar el seguimiento de la instalación de parques fotovoltaicos. Como ejemplo se ha creado un archivo Excel con varias hojas de cálculo en las que se incluyen de forma automática:

- El avance total de la zona y ortofoto con filas marcadas (Figura 84)
- El avance de cada mesa por filas (Figura 85)
- El avance de cada fila (Figura 86)

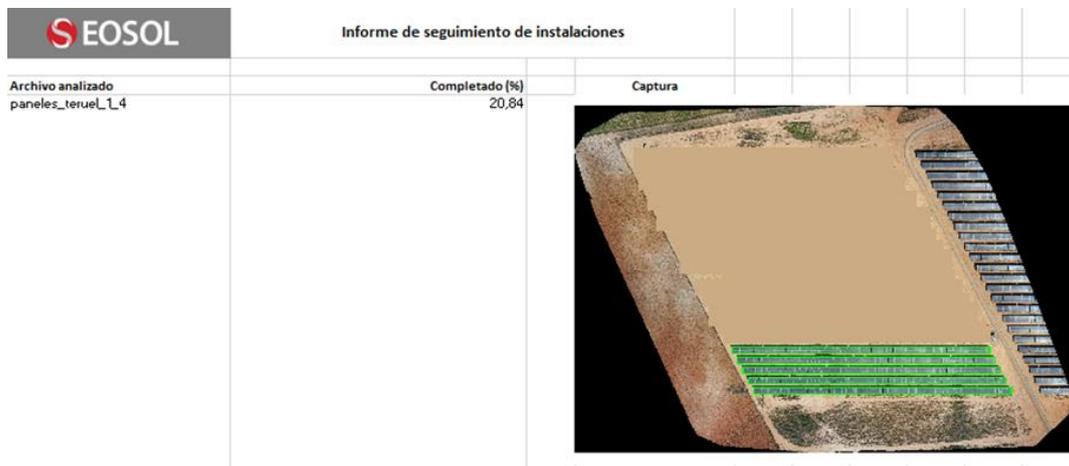


Figura 84: Ejemplo del informe en Excel con el avance total y ortofoto marcada

EOSOL		Informe de avance de las mesas individuales																							
Avance (%)	Fila 1	Fila 2	Fila 3	Fila 4	Fila 5	Fila 6	Fila 7	Fila 8	Fila 9	Fila 10	Fila 11	Fila 12	Fila 13	Fila 14	Fila 15	Fila 16	Fila 17	Fila 18	Fila 19	Fila 20	Fila 21	Fila 22	Fila 23	Fila 24	
Mesa 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	100	100	100	43	
Mesa 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	100	100	100	100	
Mesa 3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	100	100	100	100	
Mesa 4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	100	100	100	100	
Mesa 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	100	100	100	100	
Mesa 6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	100	100	100	100	
Mesa 7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	100	100	100	100	
Mesa 8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	100	100	100	100	
Mesa 9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	100	100	100	100	
Mesa 10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	100	100	100	100	
Mesa 11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	100	100	100	100	
Mesa 12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	100	100	100	100	
Mesa 13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	100	100	100	100	
Mesa 14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	100	100	100	100	
Mesa 15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	34	100	100	100	100	
Mesa 16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	100	100	100	100	
Mesa 17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	100	100	100	100	
Mesa 18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	100	100	100	100	
Mesa 19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	100	100	100	100	
Mesa 20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	100	100	100	100	
Mesa 21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	100	100	100	100	
Mesa 22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	100	100	100	100	
Mesa 23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	100	100	100	100	
Mesa 24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	100	100	100	100	

Figura 85: Ejemplo del informe en Excel con el avance de cada mesa por filas

EOSOL		Informe de avance por filas																								
Avance %		PB1	PB2	PB3	PB4	PB5	PB6	PB7	PB8	PB9	PB10	PB11	PB12	PB13	PB14	PB15	PB16	PB17	PB18	PB19	PB20	PB21	PB22	PB23	PB24	TOT
Modulos instalados		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	43	100	100	100	100	98	23
Faltan por instalar		100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	57	0	0	0	0	2	77

Figura 86: Ejemplo del informe en Excel con el avance de cada fila

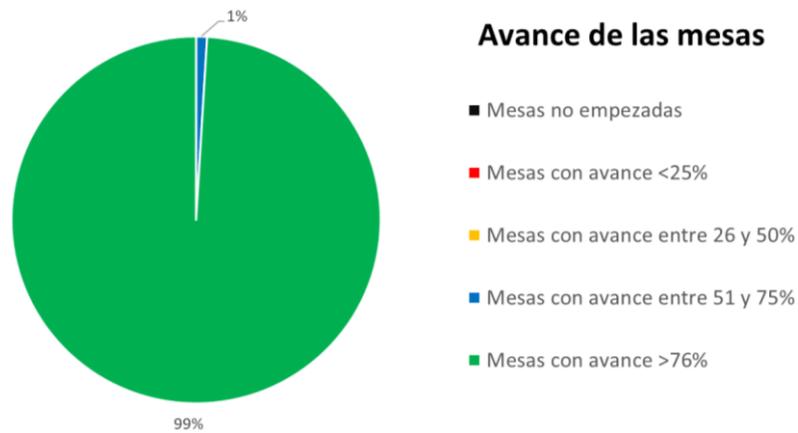


Figura 87: Ejemplo de gráfica de seguimiento del avance de las mesas

## 5. Interfaz en LabVIEW

Para facilitar y hacer más intuitivo el manejo de algunos programas de Matlab se ha creado una interfaz gráfica en LabVIEW ya que este software permite incorporar de forma fácil scripts de Matlab y añadirles elementos de control y visualización.

Esta interfaz (representada en la Figura 89 y la Figura 90) permite cargar una ortofoto y obtener la máscara binaria de las filas de paneles. Se puede elegir entre crear la máscara de forma semiautomática según el proceso descrito en la Figura 53, en cuyo caso se muestran los tamaños de los elementos estructurales de apertura y cerramiento que se usan, o de forma manual realizando cada paso por separado y eligiendo el tamaño de los elementos estructurales. A parte de la eliminación automática de objetos pequeños también se pueden seleccionar los blobs indeseados de forma manual o filtrarlos por área estableciendo un umbral mínimo. Para hacer esto último las superficies de los blobs se muestran en una gráfica para facilitar su visualización. Esta limpieza manual también se puede aplicar a la máscara que se obtiene de forma semiautomática.

Una vez que se tiene la máscara, se pueden marcar las filas de paneles en la ortofoto y contar los paneles indicando la información pertinente, tal y como ya se ha visto. Finalmente, existe la posibilidad de comparar visualmente el avance respecto de una ortofoto anterior y guardar los resultados obtenidos, entre los que se encuentran: una ortofoto con filas marcadas, una ortofoto con filas marcadas según su novedad (si se ha realizado la comparación) y un archivo *mat* con la máscara de los paneles y los datos de georreferenciación para posteriores comparaciones.

Cada script de Matlab correspondiente a una función específica se encuentra en una estructura *case* que se activa al pulsar su botón. Todo el programa está embebido en un bucle *while* para que esté en continuo funcionamiento, aunque se añade una espera de 100 ms entre bucles para evitar que se consuma la totalidad de la CPU del ordenador durante la ejecución del programa (Figura 88).



Figura 88: Detalle del programa de LabVIEW

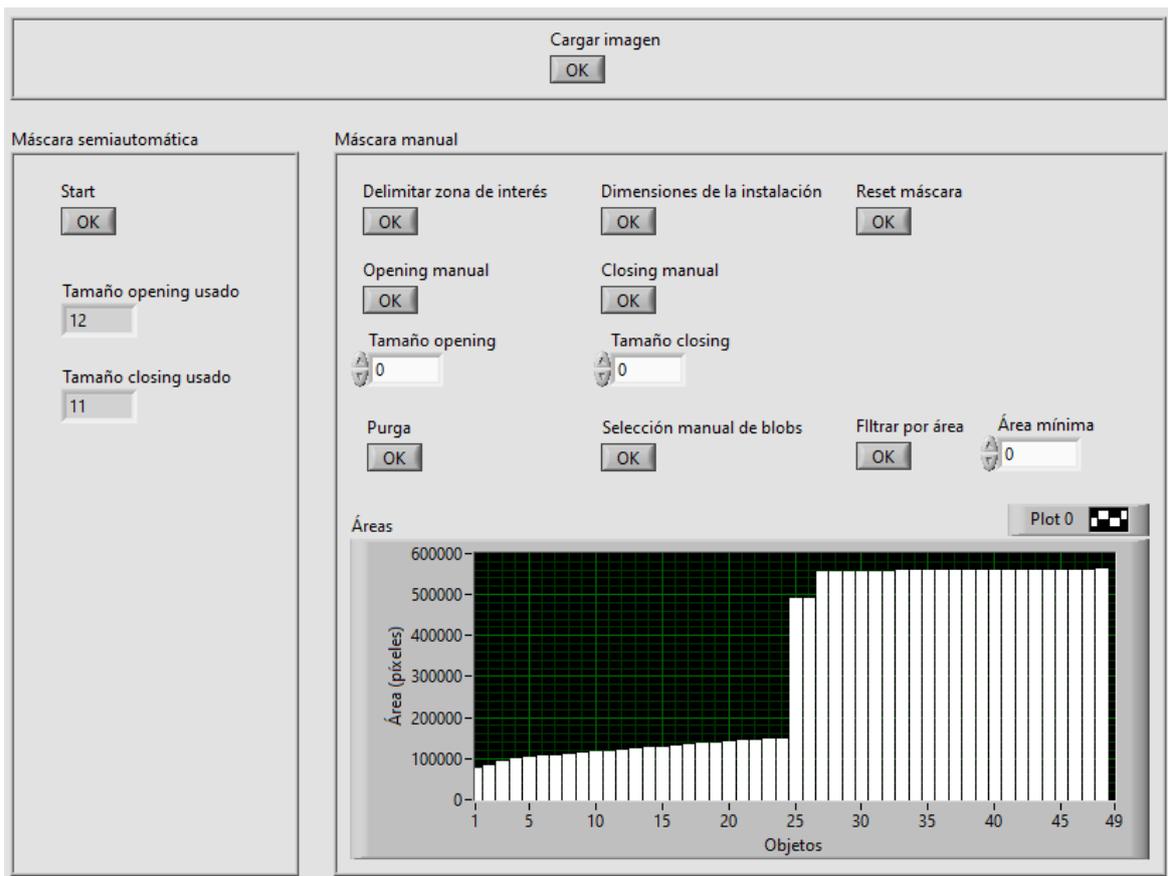


Figura 89: Interfaz del programa de LabVIEW (1/2)

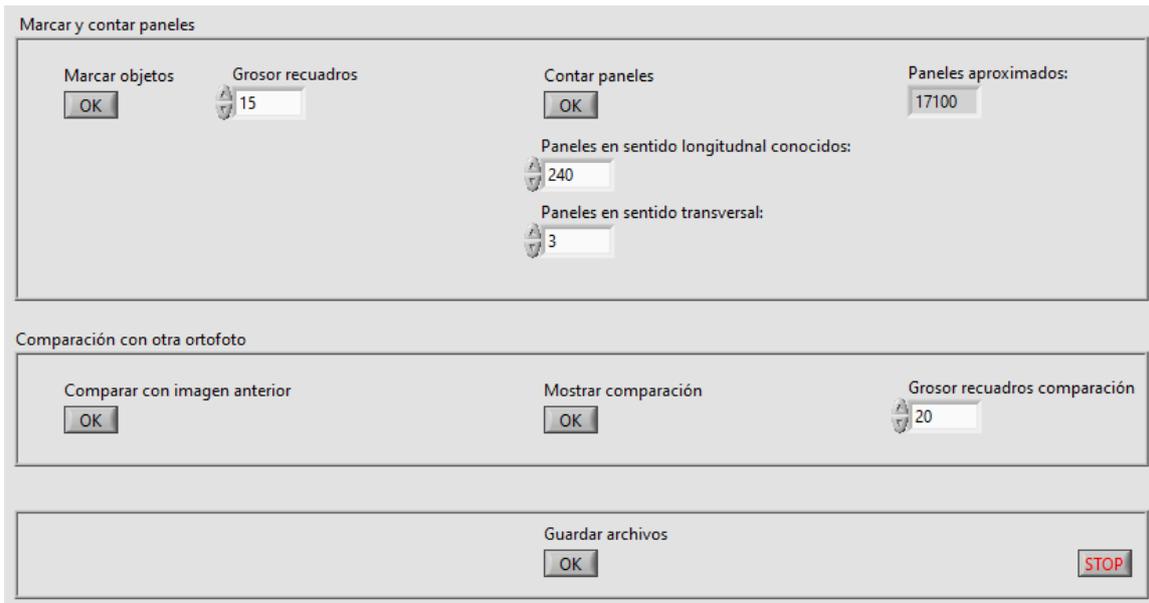


Figura 90: Interfaz del programa de LabVIEW (2/2)

## 6. Conclusión y líneas futuras

Se puede concluir que se ha conseguido cumplir el objetivo principal de este proyecto ya que se ha realizado el estudio de viabilidad económico y técnico de la automatización del seguimiento de la construcción de parques fotovoltaicos. Se deduce que se trata de una idea factible, en especial si se aplica a plantas de potencia moderada donde el tiempo de vuelo es reducido. Además, se ha creado una herramienta capaz de ayudar en las tareas de seguimiento. Aunque el proceso obtenido no es completamente automático ya que se sigue requiriendo la supervisión y colaboración de personal, supone una mejora considerable respecto de los procedimientos utilizados hasta ahora ya que se elimina la necesidad de recorrer toda la planta para contar los paneles instalados y se agiliza la recolección de información, así como la elaboración de informes.

Como se ha visto, la creación de algoritmos de procesamiento digital de imágenes puede verse afectada por los propios datos que se usan para tal fin, por lo que es muy importante tener una base de datos variada para llevar a cabo las comprobaciones pertinentes y llegar a obtener un procedimiento versátil y robusto.

A modo de resumen se incluye el tiempo total necesario, desde la programación del vuelo del dron hasta la obtención de los informes, para una planta de 5 MW (43.500 m<sup>2</sup> aprox.) y otra de 50 MW (435.000 m<sup>2</sup> aprox.):

	Planta de 5 MW	Planta de 50 MW
<b>Programación del vuelo (S)</b>	10 min	10 min
<b>Vuelo del dron (S)</b>	10 min, 1 batería	75 min, 4 baterías
<b>Generación ortofoto (NS)</b>	30 min	250 min
<b>Análisis ortofoto (S)</b>	15 min	15 min
<b>Generación informe (NS)</b>	5 min	5 min
<b>Total</b>	<b>1 h 10 min</b>	<b>5 h 55 min</b>
	35 min (S)	1 h 40 min (S)
	35 min (NS)	4 h 15 min (NS)

Tabla 5: Comparación de tiempos para plantas de 5 y 50 MW, S: supervisado, NS: no supervisado

Como cabría esperar, una planta de más potencia, y por lo tanto de más superficie, requiere más tiempo que una de menos potencia. Cabe destacar que en el caso de la planta de 5 MW el 50% del tiempo lo ocupan tareas que no requieren la supervisión de un trabajador, mientras que en la de 50 MW estas tareas suponen el 72%. Esto se debe a la tarea de generación de la ortofoto ya que es la que más tiempo ocupa y no se debe supervisar.

Por otro lado, la tarea del vuelo del dron, aunque se realiza de forma automática debe estar controlada por una persona cualificada según la ley [11]. Para plantas fotovoltaicas grandes se necesitan varias baterías para cubrir toda la superficie, por lo que resulta interesante la tecnología de drones con recarga inductiva [12] para aplicaciones futuras. De esta forma el dron volaría automáticamente al punto de recarga y se eliminaría la necesidad de detenerlo, cambiar su batería y recargar la gastada.

Como propuesta futura, se debería realizar un estudio del posible uso de la Inteligencia Artificial o Machine Learning para la detección de paneles solares y otros elementos. De esta forma se conseguiría una automatización completa del proceso. Esto no se ha podido aplicar durante la realización del presente proyecto ya que no se contaba con una base de datos en forma de imágenes lo suficientemente grande para entrenar los algoritmos, pero a medida que se vaya usando la herramienta desarrollada se tendrá más material con el que trabajar.

La falta de vuelos, debida a causas como la indisponibilidad de personal con licencia y de proyectos en obras o condiciones meteorológicas adversas, ha impedido realizar el estudio de la detección de elementos como las hincas, estructuras de apoyo de los paneles o zanjas de cableado en las fases iniciales de construcción. El seguimiento de estos elementos podría aportar aún más valor a los informes, así como aumentar el control sobre el proceso. Así mismo, se podría automatizar la creación de informes directamente en Word o PDF a partir de los realizados en Excel para hacer que esta labor sea más amena para los responsables encargados de ello.

Como punto final se incluye la siguiente tabla con el estado actual de los procesos y propuestas futuras para mejorarlos. El objetivo último debería ser la incorporación de todas las funciones en un único software.

	Proceso actual	Programas actuales	Proceso futuro	Programas futuros
<b>Vuelo</b>	Semiautomático	DJI Pilot PE	Automático. Recargas programables	Software que integre todas las funciones y permita el control desde un único PC
<b>Montaje ortofoto</b>	Automático	WebODM	Automático	
<b>Detección de paneles y comparación</b>	Semiautomático	Matlab y LabVIEW	Automático. Posible uso de IA	
<b>Seguimiento de caminos</b>	Manual	Matlab	Automático. Posible uso de IA	
<b>Seguimiento del perímetro</b>	Manual	Matlab	Automático. Posible uso de IA	
<b>Seguimiento de hincas</b>	-	-	Automático. Posible uso de IA	

Tabla 6: Estado actual de los procesos y propuestas futuras

## 7. Bibliografía

- [1] <https://www.abovesurveying.com/?lang=es>
- [2] <https://www.sitemark.com/>
- [3] <https://www.maxar.com/>
- [4] <http://argongra.es/>
- [5] <https://www.mapsmadeeasy.com/>
- [6] <https://cloud.pix4d.com/>
- [7] <https://www.opendronemap.org/>
- [8] <https://es.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/4698-simulating-photoshop-s-magic-wand-tool>
- [9] <https://es.mathworks.com/help/images/color-based-segmentation-using-the-l-a-b-color-space.html>
- [10] <https://idena.navarra.es/navegar/>
- [11] Real Decreto 1036/2017 publicado en «BOE» núm. 316, de 29 de diciembre de 2017, páginas 129609 a 129641
- [12] <https://www.wibotic.com/>
- [13] <https://www.aerial-insights.co/blog/6-aplicaciones-para-planificar-el-vuelo-de-tu-dron/>
- [14] [https://www.youtube.com/watch?v=UauHDOJQej8&ab\\_channel=6thGenFarmer](https://www.youtube.com/watch?v=UauHDOJQej8&ab_channel=6thGenFarmer)
- [15] <https://github.com/OpenDroneMap/WebODM>
- [16] <https://es.mathworks.com/help/images/detecting-a-cell-using-image-segmentation.html>
- [17] <https://es.mathworks.com/help/map/creating-map-displays-with-data-in-projected-coordinate-reference-system.html>

- [18] <https://es.mathworks.com/help/images/color-based-segmentation-using-k-means-clustering.htm>

## 8. Anexos

### 8.1. Archivos adjuntos

Junto con el presente documento se adjunta una carpeta con los siguientes archivos:

- *1\_mascara\_y\_comparacion.m*
- *2\_conteo\_paneles.m*
- *3\_superposicion\_plano.m*
- *4\_ajuste\_plano.m*
- *5\_indexacion\_y\_avance.m*
- *6\_exportar\_excel.m*
- *Interfaz.vi*
- *demo\_interfaz.mp4*
- *ortofoto\_ejemplo.tif*

El archivo *.vi* es la interfaz hecha en LabVIEW mientras que los archivos *.m* son scripts de Matlab. Estos últimos se deben ejecutar según el orden de numeración e incluyen instrucciones para su correcto uso. Así mismo, se adjunta un video con la demostración del uso de la interfaz y una ortofoto de ejemplo para su procesamiento.

Se deben tener instalados los siguientes add-ons de Matlab: *Mapping Toolbox*, *Computer Vision Toolbox* e *Image Processing Toolbox*. Además, una parte de la función *geotiffinfo.m* de *Mapping Toolbox* se debe modificar de la siguiente manera para que funcione correctamente:

```
265 %----- info functions -----
266
267 function info = readinfo(filename)
268 % Read the GeoTIFF info from the file and return the information structure.
269
270 % Obtain the TIFF information structure from the file.
271 - tiff_info = tiffinfo(filename);
272
273 - tiff_info = tiff_info(1); % force to use the first layer
274 - tiff_info(1).GeoTIFFTags = tiff_info(1).GeoTIFFTags(1); % force to use the first GeoTag
```

Figura 91: Modificación de la función *geotiffinfo.m*

Para realizar esta modificación Matlab se debe ejecutar como administrador.

## **8.2.Otros casos**

Aprovechando los avances y resultados obtenidos en este proyecto, se ha colaborado con otros departamentos de la empresa EOSOL en un estudio centrado sobre la detección de malas hierbas en campos de cultivos. Para realizar esta detección se debían conseguir imágenes aéreas de los campos, por lo que la información sobre las imágenes satelitales, así como la programación de vuelos automáticos de drones, expuestas en este documento, fueron de gran utilidad. Además, se intentaron aplicar algunas de las técnicas de procesamiento digital de imágenes a las ortofotos, aunque los resultados obtenidos no fueron satisfactorios al no haber una diferencia significativa de color entre las malas hierbas y los propios cultivos.