

Máster en Sistemas Inteligentes
SIU043 – Trabajo final de máster
Curso 2014 - 2015



UNIVERSITAT
JAUME·I

**Aplicación para la captura de imágenes
multiespectrales, visualización y realce de
características para el análisis de obras de arte**

Escrito por: Vicent Marzá Grau
Dirigido por: Filiberto Pla Bañon
Castellón de la Plana, Septiembre de 2015



Índice de contenido

Agradecimientos.....	2
Resumen.....	3
1. Introducción.....	4
1.1. Motivación.....	4
1.2. Objetivos.....	4
1.3. Estructura de la memoria.....	4
2. Descripción del trabajo.....	5
2.1. Herramienta y metodología utilizada.....	5
2.2. Descripción del entorno de trabajo.....	5
2.3. Arquitectura del sistema.....	10
3. Fundamentos y metodología.....	11
3.1. Espectro electromagnético.....	11
3.1.1. Espectro visible.....	11
3.1.2. Radiación infrarroja.....	12
3.2. Imágenes multiespectrales.....	13
3.3. CCD.....	13
3.4. DCAM 1394 monocroma.....	13
3.5. Filtro LCTF.....	14
3.6. Visualización de bandas en falso color.....	14
3.7. Realce por transformación lineal de LUT.....	15
3.8. Realce por transformación de histogramas: ecualización.....	16
3.9. Realce por transformación de PCA.....	18
3.10. Realce por selección de bandas.....	20
3.11. Definiciones de ROIs.....	21
4. Desarrollo y resultados.....	22
4.1. Diseño funcional de la aplicación.....	22
4.2. Implementación.....	32
4.3. Resultados y discusión.....	33
4.3.1. Preparación de los experimentos - Diseño de la obra de arte Vicent.....	34
4.3.2. Experimentos.....	37
5. Conclusiones.....	62
ANEXO.....	63
Bibliografía.....	64

Agradecimientos

A mis padres.

Al departamento de lenguajes y sistemas informáticos de la Universidad Jaime I.

Resumen

Para facilitar el análisis de obras de arte con imágenes multiespectrales, se ha desarrollado una aplicación donde se utilizan los espectros visibles y los del infrarrojo cercano. Para ello se ha implementado un sistema de captura de imágenes multiespectrales con una cámara 1394 monocroma y el filtro sintonizable LCTF. Además se han incluido una serie de herramientas que facilitan la visualización y realce de ciertas características en imágenes multiespectrales.

1. Introducción

1.1. Motivación

Los análisis de obras de arte tienen una gran importancia a la hora de estimar el valor de las obras ya que por ejemplo una obra que no ha sido retocada desde su creación posee más valor que una obra que ha sido retocada posteriormente. En la actualidad las obras de arte son analizadas empleando distintas técnicas, una de ellas se basa en el realce de características con imágenes multiespectrales. Para ello se crea una imagen multiespectral donde para cada banda se obtiene información de distintos rangos de espectros electromagnéticos, para el análisis se utilizan métodos de realce de características pudiendo analizarse cada banda por separado o de forma conjunta.

1.2. Objetivos

Los objetivos de este trabajo son:

- Implementar una aplicación para la captura de imágenes multiespectrales.
- Crear una aplicación en Matlab para el realce de imágenes multiespectrales donde se integren funcionalidades para:
 - Visualización de bandas por separado y en falso color.
 - Realce por transformación lineal a trozos de LUT.
 - Realce por transformación de histogramas: ecualización.
 - Realce por transformación de PCA.
 - Realce por selección de bandas.
 - Definiciones de ROIs para aplicar las funciones solo a las áreas de interés.

1.3. Estructura de la memoria

En el **capítulo 2** se hace una descripción del trabajo donde se comentan las herramientas utilizadas, la descripción del entorno de trabajo y la arquitectura del sistema. En el **capítulo 3** se presenta una definición de conceptos de los aspectos más importantes del trabajo. En el **capítulo 4** se describe el diseño de la aplicación como una guía de uso de la misma, también se comenta la implementación, la realización de experimentos y los resultados. En el **capítulo 5** se exponen las conclusiones finales del trabajo. En el **capítulo 6** se propone el trabajo futuro para mejorar la aplicación. En el apartado **ANEXO** hay un enlace de un vídeo que explica el funcionamiento de la aplicación. En el apartado de la **Bibliografía** se detallan las fuentes utilizadas y los artículos que se han tenido en cuenta durante la realización del trabajo.

2. Descripción del trabajo

2.1. Herramienta y metodología utilizada

La herramienta utilizada para este trabajo es la siguiente:

Matlab R2014b - 64-bit (win64)

Con el paquete de soporte hardware *OS Generic Video Interface* y *DCAM Hardware*.

Matlab es el lenguaje de alto nivel y el entorno interactivo utilizado por millones de ingenieros y científicos en todo el mundo. Este permite explorar y visualizar ideas, así como colaborar interdisciplinariamente en procesamiento de señales e imagen, comunicaciones, sistemas de control y finanzas computacionales [1].

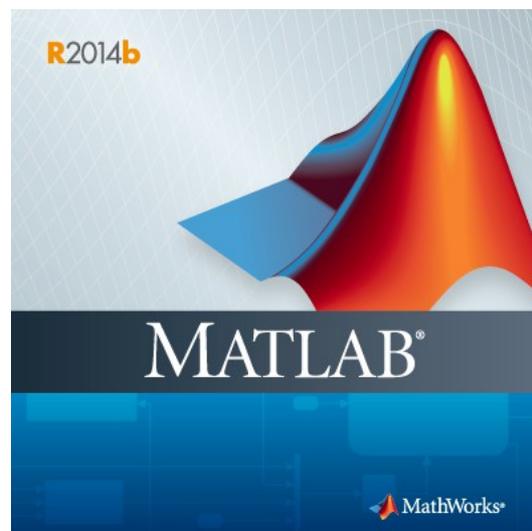


Figura 1: MATLAB R2014b [1].

Metodología utilizada:

- Se implementan funciones para la lectura de imágenes multiespectrales y herramientas para facilitar la visualización y realce de las imágenes que cumplan con las funcionalidades nombradas en el apartado **1.2 Objetivos**.
- Se crean funciones de captura de imágenes multiespectrales con una cámara 1394 monocroma y con el filtro sintonizable LCTF.
- Se crea la interfaz gráfica que facilite el uso de la herramienta implementada.
- Se crea la memoria del TFM.

2.2. Descripción del entorno de trabajo

El entorno de trabajo consta de:

Un equipo HP Compaq Intel(R) Core(TM)2 CPU 6400 @ 2.13GHz 2.13GHz con 3.5GB de memoria RAM. Sistema operativo Windows 7 Enterprise con Service Pack 1.

Cámara 1394 monocroma - Guppy F-044B NIR

En la **Figura 2** se muestran las especificaciones de la cámara.

Feature	Specification
Image device	Type 1/2 (diag. 8 mm) interlaced SONY CCIR/PAL CCD ICX429ALL/AKL with EXview HAD microlens for enhanced near infrared light sensitivity
Effective chip size	6.5 mm x 4.8 mm
Cell size	8.6 μm x 8.3 μm
Lens mount	C-Mount: 17.526 mm (in air), \emptyset 25.4 mm (32 tpi), mechanical flange back to filter distance: 9.5 mm (see Figure 29: Guppy C-Mount dimensions on page 71) CS-Mount: 12.526 mm (in air), \emptyset 25.4 mm (32 tpi), mechanical flange back distance: 8 mm (see Figure 30: Guppy CS-Mount dimensions on page 72)
Picture size (max.)	752 x 580 (Format_7 Mode_0)
ADC	12 bit
Frame rates	Variable frame rates in Format_7 from 0.15 fps up to 25 fps
Gain control	Manual: 0-24 dB (0.035 dB/step); auto gain
Shutter speed	62 μs ... 67,108,864 μs (~67s); auto shutter
External trigger shutter	Trigger_Mode_0, Trigger_Mode_15, trigger delay
Look-up table	One, user programmable (10 bit \rightarrow 8 bit); gamma (0.5)
Smart functions	<ul style="list-style-type: none"> AGC (auto gain control), AEC (auto exposure control), LUT (look-up table) only color: AWB (auto white balance) one configurable input, three configurable outputs, RS-232 port (serial port, IIDC V1.31)
Transfer rate	100 Mbit/s, 200 Mbit/s, 400 Mbit/s
Digital interface	IEEE 1394a IIDC V1.3, single port
Power requirements	DC 8 V - 36 V via IEEE 1394 cable or 8-pin HIROSE
Power consumption	Less than 2 watt (@ 12 V DC)
Dimensions	48.2 mm x 30 mm x 30 mm (L x W x H); w/o tripod and lens
Mass	50 g (without lens)
Operating temperature	+ 5 $^{\circ}\text{C}$... + 45 $^{\circ}\text{C}$ housing temperature (without condensation)
Storage temperature	- 10 $^{\circ}\text{C}$... + 60 $^{\circ}\text{C}$ ambient temperature (without condensation)
Regulations	FCC Class B, CE, RoHS (2002/95/EC)
Standard accessories	<ul style="list-style-type: none"> b/w: C/CS-Mount with built-in protection glass color: C/CS-Mount with built-in IR cut filter
Feature	Specification
Optional accessories	<ul style="list-style-type: none"> b/w: C/CS-Mount: IR cut filter / IR pass filter available as CS-Mount adapter. color: C/CS-Mount: protection glass available as CS-Mount adapter.
Software packages	<ul style="list-style-type: none"> AVT FirePackage (SDK and Viewer, 100% control the bus) Only on request: AVT Direct FirePackage (SDK and Viewer, compatible to DirectX and WDM) Only on request: AVT Fire4Linux (SDK and Viewer, compatible to RedHat and Suse Distributions)

Figura 2: Especificación Guppy F-044B NIR [2].

En la **Figura 3** se observa como el sensor CCD [3] de la cámara no tiene la misma sensibilidad a la hora de extraer información de las diferentes longitudes de onda de la luz. Por ello, el tiempo de exposición del CCD a la luz debe variar para obtener una sensibilidad igual en todas las longitudes de onda.

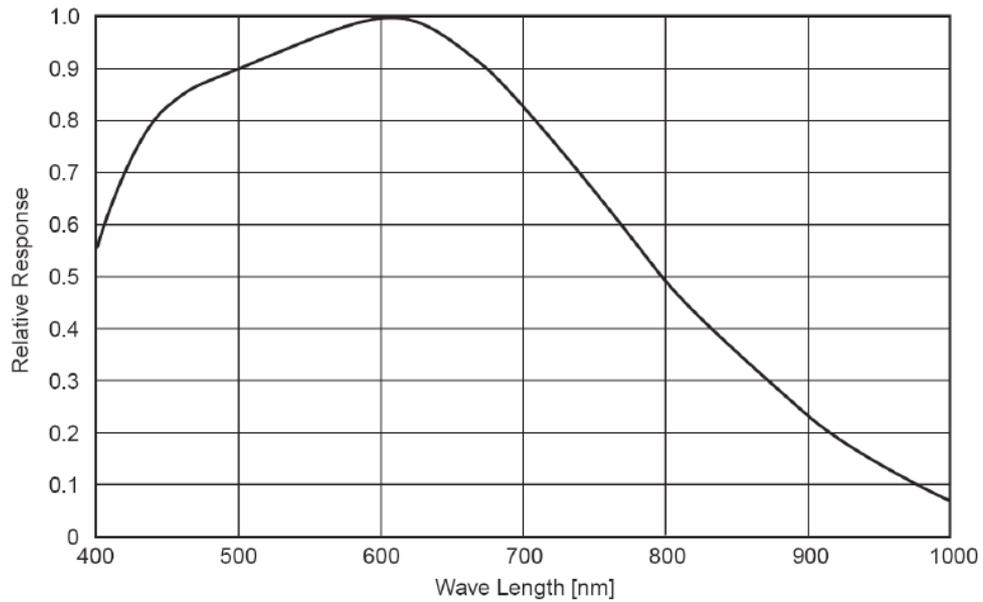


Figura 3: Sensibilidad espectral de Guppy F-044B NIR sin filtros ni ópticas [2]



Figura 4: DCAM Guppy [2].

Filtro sintonizable LCTF -VariSpec

En la **Figura 6** se muestran las especificaciones de los filtros.

En este trabajo se han utilizado los filtros:

- VariSpec VIS (400 - 720) nm
- VariSpec SNIR (650 - 1100) nm



Figura 5: CRI VariSpec [4].

Parameter	VariSpec VIS	VariSpec SNIR	VariSpec LNIR	VariSpec XNIR	VariSpec VISR	VariSpec NIRR
Wavelength range (nm)	400-720	650-1100	850-1800	1200-2450	480-720	650-1100
Bandwidth FWHM (nm)	7, 10, or 20	7 or 10	6 or 20	9	0.25 (best effort)	0.75 (best effort)
Working aperture (mm)	22 or 35	22	22	22	22	22
Angle-of-acceptance (half-angle)	7.5 degrees	7.5 degrees	3.5 degrees	3.5 degrees	3.5 degrees	3.5 degrees
Optics response time (ms) ¹	50	150	150	50	150	150
Single or dual-housing design ²	Single	Single	Single: 20-nm Dual: 06-nm	Dual	Dual	Dual
Wavelength accuracy	Bandwidth/8		Bandwidth/8		Bandwidth/8	
Maximum optical input	500 mW/cm ²		500 mW/cm ²		500 mW/cm ²	
Operating temperature	10-40 °C		10-40 °C		10-40 °C	
Storage temperature	-15-55 °C		-15-55 °C		-15-55 °C	
Computer interface	USB 1.1		USB 1.1		USB 1.1	
Power supply	USB bus-powered		USB bus-powered		USB bus-powered	

1. Optics response time depends on a number of factors including ambient temperature (colder temperatures cause the liquid crystal material to become more viscous and slower to respond) and model (NIR models are slower to respond than VIS models). Older filters (with electronics designed with a RS-232 serial interface) used a microprocessor that was not as fast as newer versions and, unless the palette function was utilized, might respond in 300 ms or more.
2. Dual-housing filters use two sets of optics and electronics. They must both be sent identical commands, but do not need to be addressed simultaneously.

Figura 6: Especificación filtros VariSpec [4].

En la **Figura 7** y la **Figura 8** se muestran las curvas de transmitancia espectral de los filtros VariSpec.

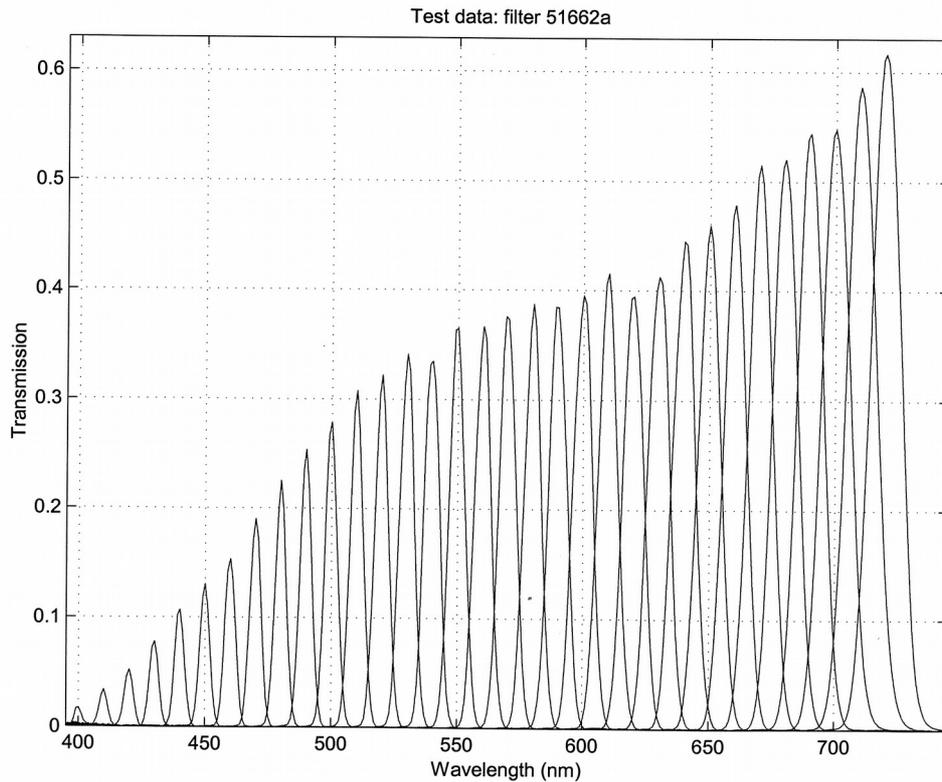


Figura 7: Curva de transmitancia espectral del filtro visible [4].

En la curva de transmitancia de la **Figura 7** se puede observar como la transmitancia en longitudes de onda cercanas a 400nm son entorno 30 veces más bajas que con longitudes de onda de 700nm. Para solucionar esto se debería ampliar el tiempo de exposición cuando se captan longitudes de onda cercanas a 400nm.

En la curva de la **Figura 8** se observa como las diferentes longitudes de onda influyen menos en la transmitancia, aún así los tiempos de exposición también deberían ser diferentes según las longitudes de onda.

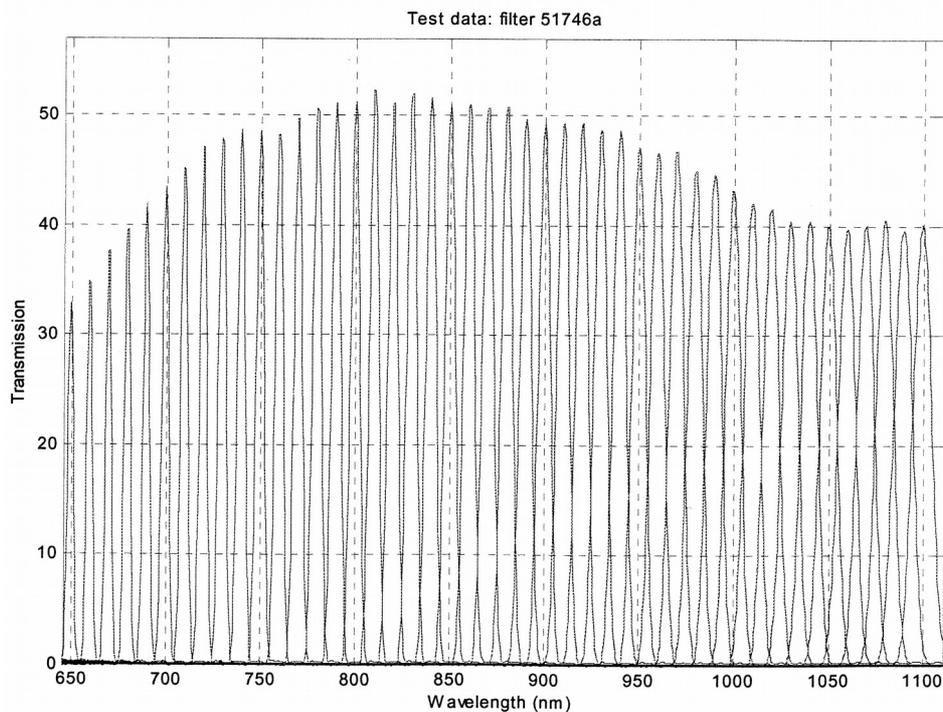


Figura 8: Curva de transmitancia espectral del filtro infrarrojo cercano [4].

2.3. Arquitectura del sistema

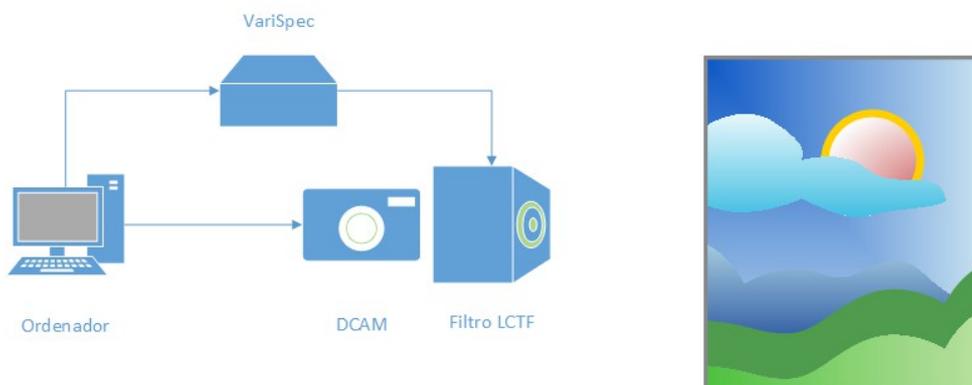


Figura 9: Arquitectura del sistema.

En la **Figura 9** se muestra la arquitectura del sistema que se comenta a continuación:

- El ordenador está conectado con el módulo electrónico de control VariSpec que es el encargado de controlar el filtro LCTF.
- El ordenador está conectado a una cámara digital 1394 monocroma (DCAM).
- La cámara digital está conectada físicamente con el filtro LCTF, aunque no hay comunicación entre los dos dispositivos.
- El ordenador es el encargado de controlar el filtro y la cámara digital.

3. Fundamentos y metodología

3.1. Espectro electromagnético

Se denomina espectro electromagnético a la distribución energética del conjunto de las ondas electromagnéticas. Referido a un objeto se denomina espectro electromagnético o simplemente espectro a la radiación electromagnética que emite (espectro de emisión) o absorbe (espectro de absorción) una sustancia. Dicha radiación sirve para identificar la sustancia de manera análoga a una huella dactilar. Los espectros se pueden observar mediante espectroscopios que, además de permitir ver el espectro, permiten realizar medidas sobre el mismo, como son la longitud de onda, la frecuencia y la intensidad de la radiación.

El espectro electromagnético se extiende desde la radiación de menor longitud de onda, como los rayos gamma y los rayos X, pasando por la luz ultravioleta, la luz visible y los rayos infrarrojos, hasta las ondas electromagnéticas de mayor longitud de onda, como son las ondas de radio. Se cree que el límite para la longitud de onda más pequeña posible es la longitud de Planck mientras que el límite máximo sería el tamaño del Universo aunque formalmente el espectro electromagnético es infinito y continuo [5].

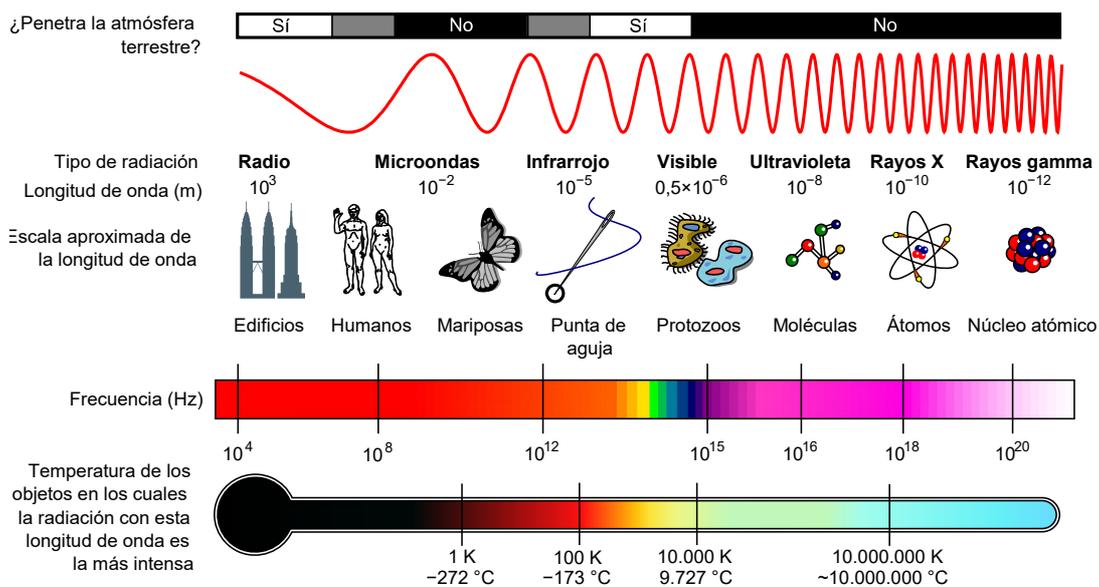


Figura 10: Diagrama del espectro electromagnético, mostrando el tipo, longitud de onda con ejemplos, frecuencia y temperatura de emisión de cuerpo negro [4].

3.1.1. Espectro visible

Se llama espectro visible a la región del espectro electromagnético que el ojo humano es capaz de percibir. A la radiación electromagnética en este rango de longitudes de onda se le llama luz visible o simplemente luz. No hay límites exactos en el espectro visible: un típico ojo humano responderá a longitudes de onda de 400 a 700 nm, aunque algunas personas pueden ser capaces de percibir longitudes de onda desde 380 hasta 780 nm.

Los ojos de muchas especies perciben longitudes de onda diferentes de las del espectro visible del ojo humano. Por ejemplo, muchos insectos, tales como las abejas pueden ver la luz ultravioleta que es útil para encontrar el néctar en las flores. Por esta razón, los éxitos reproductivos de las especies de plantas cuyos ciclos de vida están vinculados con la polinización de los insectos, dependen de que produzcan emisión ultravioleta, más bien que del colorido aparente a los ojos humanos [6].

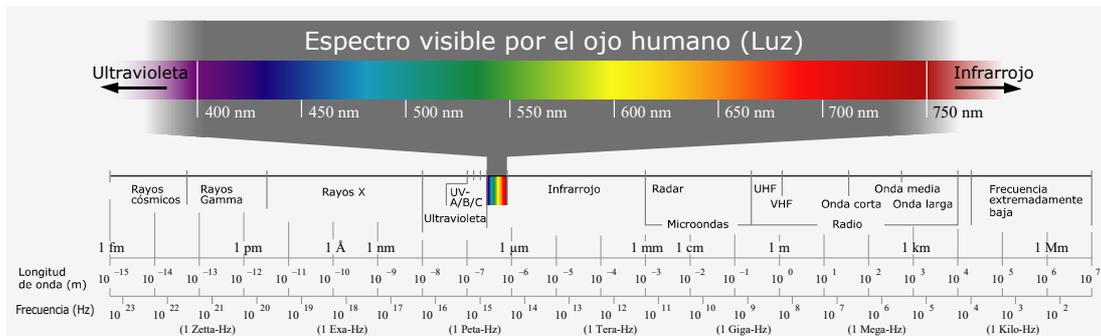


Figura 11: Espectro visible por el ojo humano (Luz) [8].

Para el desarrollo de este trabajo se ha utilizado el espectro visible (400 - 720) nm

3.1.2. Radiación infrarroja

La radiación infrarroja, o radiación IR es un tipo de radiación electromagnética y térmica, de mayor longitud de onda que la luz visible, pero menor que la de las microondas. Consecuentemente, tiene menor frecuencia que la luz visible y mayor que las microondas. Su rango de longitudes de onda va desde unos 0,7 hasta los 1000 micrómetros. La radiación infrarroja es emitida por cualquier cuerpo cuya temperatura sea mayor que 0 Kelvin, es decir, $-273,15$ grados Celsius (cero absoluto).

Los infrarrojos son clasificados, de acuerdo a su longitud de onda, de este modo:

- Infrarrojo cercano (de 800 nm a 2500 nm)
- Infrarrojo medio (de 2.5 μm a 50 μm)
- Infrarrojo lejano (de 50 μm a 1000 μm)

La materia, por su caracterización energética emite radiación. En general, la longitud de onda donde un cuerpo emite el máximo de radiación es inversamente proporcional a la temperatura de éste (Ley de Wien). De esta forma la mayoría de los objetos a temperaturas cotidianas tienen su máximo de emisión en el infrarrojo. Los seres vivos, en especial los mamíferos, emiten una gran proporción de radiación en la parte del espectro infrarrojo, debido a su calor corporal [9].

Para el desarrollo de este trabajo se ha utilizado el infrarrojo cercano (650 - 1000) nm, cabe destacar que el filtro llega a 1100nm pero la cámara llega a 1000nm.

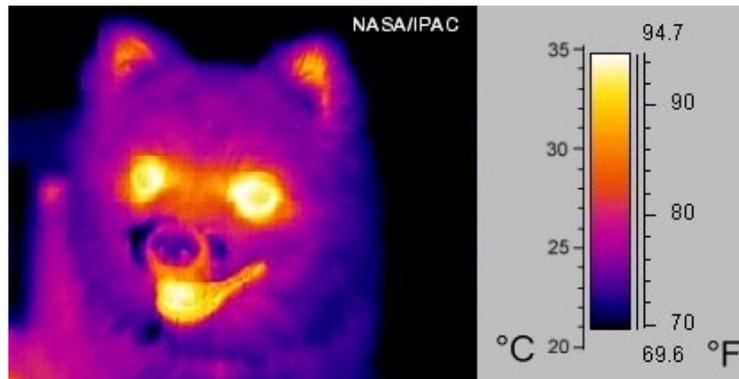


Figura 12: Imagen tomada con radiación infrarroja media (térmica) y coloreada [10].

3.2. Imágenes multispectrales

Una imagen multispectral es la que captura los datos de una imagen en frecuencias específicas en todo el espectro electromagnético. Las longitudes de onda pueden ser separadas por los filtros o por el uso de instrumentos que son sensibles a longitudes de onda particulares, incluyendo la luz de frecuencias más lejanas a la de la gama de luz visible, tales como infrarrojos. La imagen espectral puede permitir la extracción de la información adicional que el ojo humano no logra captar con sus receptores para el rojo, verde y azul. Originalmente este tipo de imágenes fueron desarrolladas para las imágenes del espacio.

Esta tecnología también ha ayudado en la interpretación de papiros antiguos, como los encontrados en Herculano, mediante imágenes de los fragmentos en el rango infrarrojo (1000 nm). A menudo, el texto de los documentos aparece a simple vista como negro de tinta sobre papel negro. En 1000 nm, la diferencia en la forma en que el papel y tinta reflejan la luz infrarroja hace que el texto sea claramente legible. También se ha utilizado para el palimpsesto de Arquímedes creando las imágenes de las hojas del pergamino con anchos de banda de 365 a 870 nm, y a continuación, utilizando técnicas avanzadas de procesamiento de imagen digital para revelar en el trabajo de Arquímedes el texto que había anteriormente [11].

3.3. CCD

Un dispositivo de carga acoplada, es un circuito integrado que contiene un número determinado de condensadores enlazados o acoplados. Bajo el control de un circuito interno, cada condensador puede transferir su carga eléctrica a uno o a varios de los condensadores que estén a su lado en el circuito impreso [3].

3.4. DCAM 1394 monocroma

DCAM significa “Cámara digital de especificación 1394” y define el comportamiento de las cámaras que proporcionan los datos de las imágenes sin comprimir y sin audio.

El estándar fue desarrollado por la IEEE 1394 Trade Association. El responsable de este grupo de trabajo es el IIDC (Instrumentación y Grupo de Trabajo de Control Industrial). El

estándar DCAM sólo es compatible con dispositivos con una interfaz FireWire (IEEE-1394). Esto suele ser una cámara FireWire con sus propiedades industriales [12].

3.5. Filtro LCTF

Filtros sintonizables de cristal líquido (LCTFs) son filtros ópticos que utilizan elementos de control electrónico de cristal líquido (LC) para transmitir una longitud de onda seleccionable de luz y de excluir a las otras.

Los filtros LCTFs son conocidos por permitir una alta calidad de imagen y una integración relativamente fácil con respecto al diseño del sistema óptico y el software de control pero teniendo valores de transmisión de picos relativamente bajos debido al uso de múltiples elementos polarizantes. Esto puede ser mitigado en algunos casos mediante el uso de diseños de pasos de banda más amplios, ya que pasos de banda más amplios dan como resultado más luz viajando a través del filtro. Algunos LCTFs están diseñados para sintonizar a un número limitado de longitudes de onda fijas, tales como los colores (rojo, verde y azul RGB) mientras que otros se pueden sintonizar en pequeños incrementos en un amplio rango de longitudes de onda tal como la visible o en el infrarrojo cercano del espectro de 400 hasta el límite actual de 2.450 nm. La velocidad de sintonización de LCTFs varía según el fabricante y el diseño, pero en general es de varias decenas de milisegundos, determinados principalmente por la velocidad de conmutación de los elementos de cristal líquido. Las temperaturas más altas pueden disminuir el tiempo de transición para que las moléculas del material de cristal líquido se alineen a sí mismas y para que el filtro sintonice una longitud de onda particular. Las temperaturas más bajas aumentan la viscosidad del material de cristal líquido y aumentan el tiempo de sintonización del filtro.

LCTFs se utilizan a menudo en sistemas de imágenes multispectrales o de formación de imágenes hiperespectrales debido a su alta calidad de imagen y ajuste rápido en un amplio intervalo espectral. Múltiples LCTFs se pueden utilizar en diseños ópticos con imágenes separadas por trayectorias cuando el rango de longitud de onda requerido excede las capacidades de un solo filtro, tales como en las aplicaciones de astronomía [13].

3.6. Visualización de bandas en falso color

Las técnicas conocidas como falso color se utilizan en la tecnología de imagen (astronomía, las imágenes de satélite, imágenes médicas, exploración o minería), donde podemos aprovechar para poner de relieve pequeñas variaciones de color gris.

Estas técnicas permiten asociar a un rango de gris un color específico que tiene el único propósito de hacer más visibles las áreas correspondientes. Algunos rangos específicos de colores reales (o de longitud de onda) característicos se convierten en componentes separados, que cuando se mezclan producen la imagen final en colores falsos. Esta técnica más avanzada es muy utilizada en la astronomía, geografía, agronomía o para uso militar y en la toma de fotos del satélite para la exploración de la Tierra.

La visualización en falso color es especialmente útil ya que la percepción humana del color

varía de un individuo a otro dependiendo de las características de la retina y la estructura de conos y bastones que da diferentes sensibilidades. Además, los factores genéticos pueden influir en el espectro de absorción de la retina, debido a la naturaleza y el contenido de pigmentos fotosensibles ligeramente diferentes. Los colores falsos pueden destacar algunas diferencias de la imagen en color sobre la base de lo que se busca y por lo tanto puede aumentar artificialmente la sensibilidad de la visión humana del color [14].



Figura 13: Imagen de la puerta de Alcalá en falso color.

En el trabajo se utilizan tres bandas para crear el falso color, una banda se asigna al rojo, otra al verde y otra al azul tal y como se muestra en la **Figura 13**.

3.7. Realce por transformación lineal de LUT

Una lookup table (del inglés "tabla de consulta") es, en informática, una estructura de datos, normalmente un vector o un Vector asociativo, que se usa para substituir una rutina de computación con una simple indexación de los vectores. Son muy útiles a la hora de ahorrar tiempo de procesamiento, porque sacar un valor de memoria es mucho más rápido que hacer una gran computación.

Las tablas pueden ser precalculadas y almacenadas en la memoria de un programa estático. Las tablas de consultas también se utilizan ampliamente para validar los valores de entrada, haciendo coincidir contra una lista de elementos válidos (o no válidos) en una matriz y, en algunos lenguajes de programación, pueden incluir funciones de puntero (o compensar a las etiquetas) para procesar las entradas correspondientes.

Un ejemplo práctico de la utilidad de una lookup table es su uso de obtener resultados de funciones sin necesidad de hacer el cálculo, utilizando como valor indexado el valor de entrada y como valor que toma la posición, el valor de la salida de la función. Cuando se utiliza para el procesamiento de imágenes, acostumbra a llamarse LUT [15].

En el trabajo se utiliza el LUT para resaltar características de las imágenes de tal forma que

mediante una gráfica de puntos se calcula una tabla LUT en la cual aparecen los valores de entrada y los valores que debería tener de salida y se aplica sobre las imágenes. Con este procedimiento se consigue que ciertos valores sean resaltados respecto al resto de valores y por tanto poder apreciar ciertas características que no se pueden apreciar bien a simple vista.

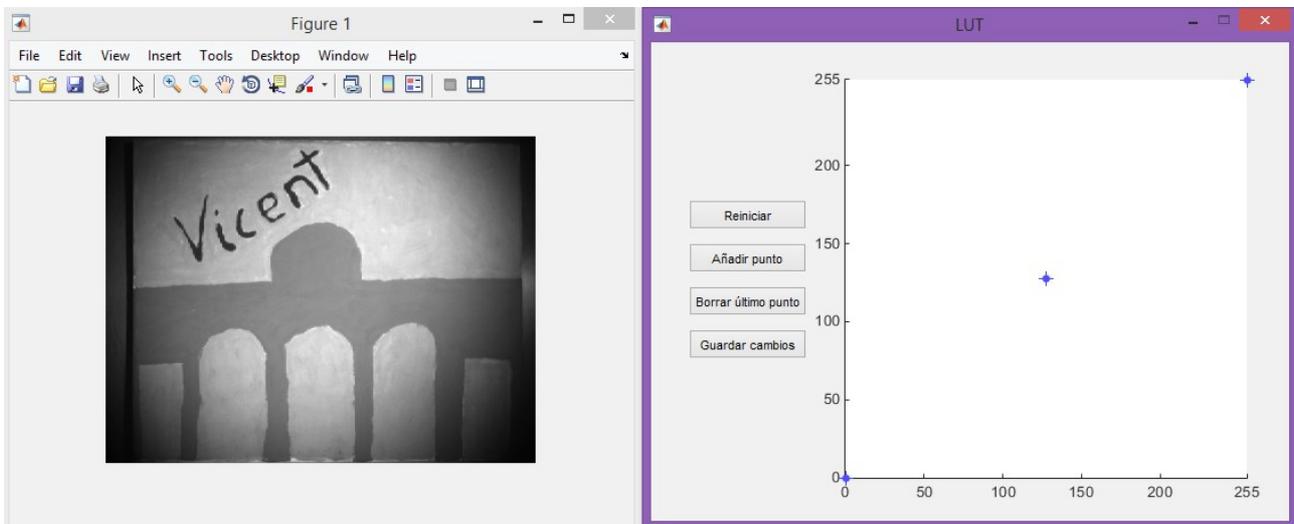


Figura 14: Imagen original con un LUT igual para los valores de entrada que los de salida.

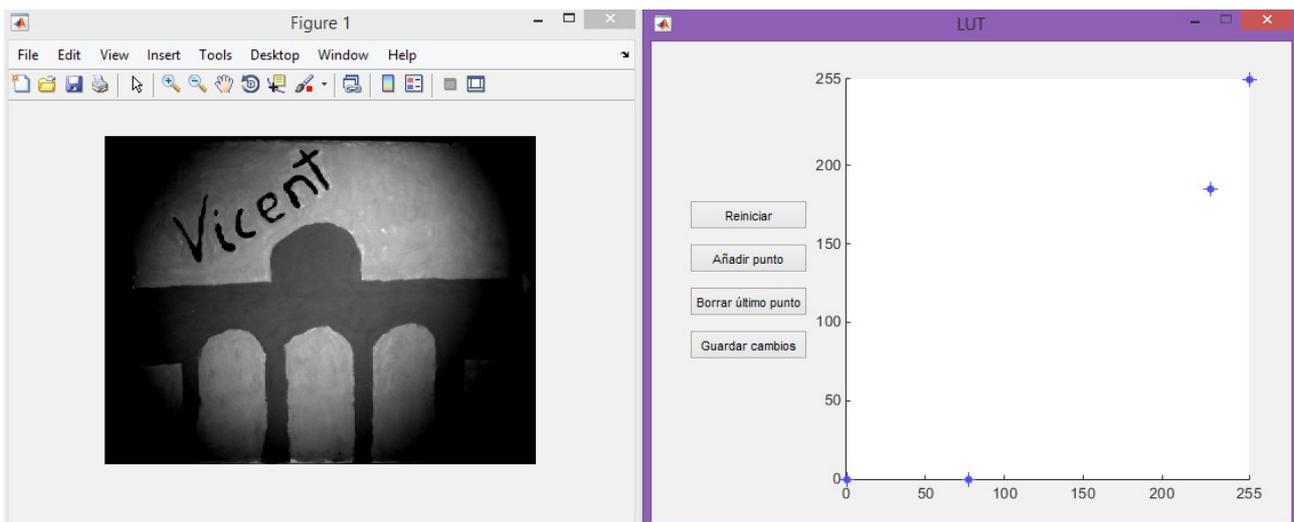


Figura 15: Imagen resaltada con un LUT.

Como se puede observar en las **Figuras 14 y 15** la imagen se ha adaptado a los puntos que representan el LUT de manera gráfica resaltando ciertas zonas de la imagen. Se puede observar como se han oscurecido los bordes ya que el filtro LCTF está dañado y retransmite menos luz en esas áreas. A parte de eso el monumento y el nombre se han oscurecido para resaltarse.

3.8. Realce por transformación de histogramas: ecualización

La ecualización del histograma de una imagen es una transformación que pretende obtener para una imagen un histograma con una distribución uniforme. Es decir, que exista el mismo número de pixels para cada nivel de gris del histograma de una imagen monocroma.

La función de la ecualización es:

$$factor = \frac{NM}{G} \quad p = parte_entera \left\{ \frac{H(m) - 1}{factor} \right\} \quad (1)$$

N y **M** representan las dimensiones de la imagen, **G** representa los niveles de gris de la imagen, **m** es el nivel de gris original, **H(m)** es el histograma acumulado, **p** es el nuevo nivel de gris.

En teoría, la aplicación de esta operación debería transformar el histograma en otro con una forma perfectamente uniforme sobre todos los niveles de gris. Sin embargo, en la práctica esto no se va a poder conseguir pues se estaría trabajando con funciones de distribución discretas en lugar de continuas. En la transformación, todos los pixels de un mismo nivel de gris se transformarán a otro nivel de gris, y el histograma se distribuirá en todo el rango disponible separando en lo posible las ocupaciones de cada nivel.

El resultado de la ecualización maximiza el contraste de una imagen sin perder información de tipo estructural, esto es, conservando su entropía (información) [16].

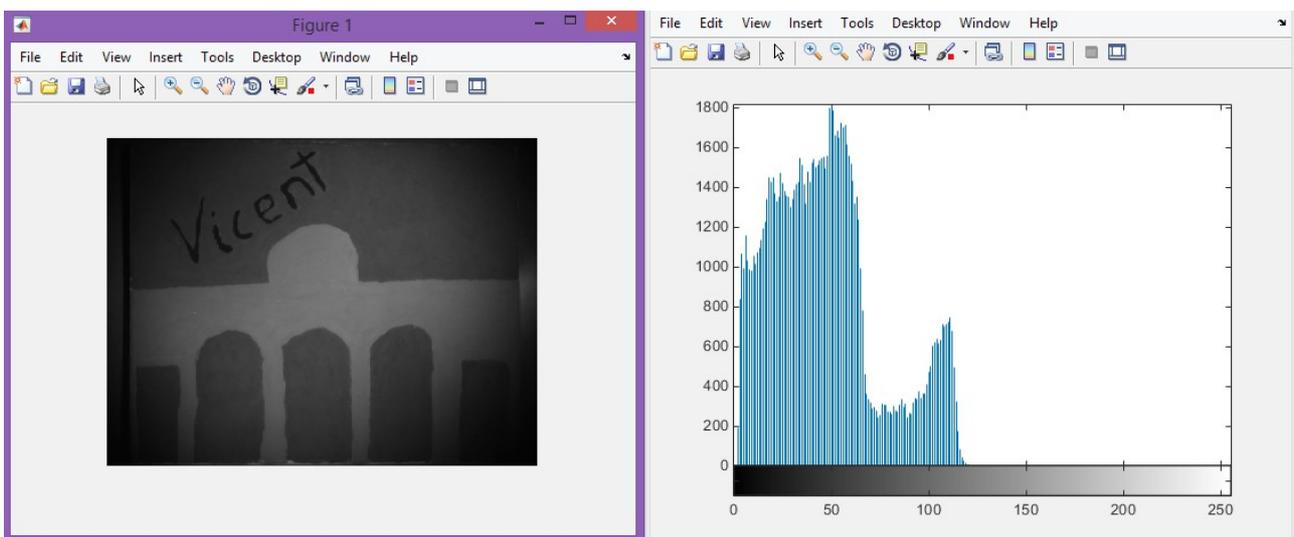


Figura 16: Imagen original e histograma original.

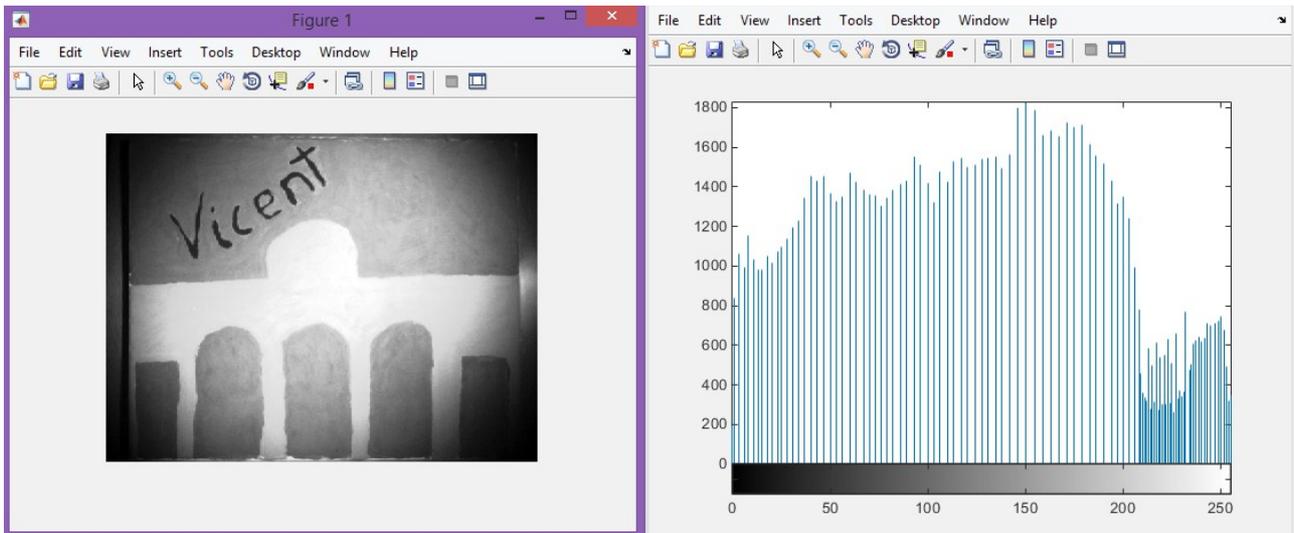


Figura 17: Imagen ecualizada e histograma ecualizado.

En la **Figura 17** se puede observar como el histograma se ha distribuido en todo el rango disponible respecto al histograma original de la **Figura 16** y también se puede observar como la imagen de la **Figura 17** muestra más contraste que la imagen de la **Figura 16**.

3.9. Realce por transformación de PCA

En estadística, el análisis de componentes principales es una técnica utilizada para reducir la dimensionalidad de un conjunto de datos. Intuitivamente la técnica sirve para hallar las causas de la variabilidad de un conjunto de datos y ordenarlas por importancia.

Técnicamente, el PCA busca la proyección según la cual los datos queden mejor representados en términos de mínimos cuadrados. El PCA se emplea sobre todo en análisis exploratorio de datos y para construir modelos predictivos. El PCA comporta el cálculo de la descomposición en autovalores de la matriz de covarianza, normalmente tras centrar los datos en la media de cada atributo.

El PCA construye una transformación lineal que escoge un nuevo sistema de coordenadas para el conjunto original de datos en el cual la varianza de mayor tamaño del conjunto de datos es capturada en el primer eje (llamado el Primer Componente Principal), la segunda varianza más grande es el segundo eje, y así sucesivamente. Para construir esta transformación lineal debe construirse primero la matriz de covarianza o matriz de coeficientes de correlación. Debido a la simetría de esta matriz existe una base completa de vectores propios de la misma. La transformación que lleva de las antiguas coordenadas a las coordenadas de la nueva base es precisamente la transformación lineal necesaria para reducir la dimensionalidad de datos. Además las coordenadas en la nueva base dan la composición en factores subyacentes de los datos iniciales.

Una de las ventajas del PCA para reducir la dimensionalidad de un grupo de datos, es que retiene aquellas características del conjunto de datos que contribuyen más a su varianza, manteniendo un orden de bajo nivel de los componentes principales e ignorando los de alto nivel. El objetivo es que esos componentes de bajo orden a veces contienen el aspecto "más

importante" de esa información.

Para aplicar el PCA se ha utilizado el **método basado en la matriz de covarianzas**, que se usa cuando los datos son dimensionalmente homogéneos y presentan valores medios similares. El objetivo es transformar un conjunto dado de datos \mathbf{X} de dimensión $n \times m$ a otro conjunto de datos \mathbf{Y} de menor dimensión $n \times l$ con la menor pérdida de información útil posible utilizando para ello la matriz de covarianza. Se parte de un conjunto n de muestras cada una de las cuales tiene m variables que las describen y el objetivo es que, cada una de esas muestras, se describa con solo l variables, donde $l < m$. Además, el número de componentes principales l tiene que ser inferior a la menor de las dimensiones de \mathbf{X} .

$$l \leq \min\{n, m\} \quad (2)$$

Los datos para el análisis tienen que estar centrados a media 0 (restándoles la media de cada columna) y/o autoescalados (centrados a media 0 y dividiendo cada columna por su desviación estándar).

$$\mathbf{X} = \sum_{a=1}^l \mathbf{t}_a \mathbf{p}_a^T + \mathbf{E} \quad (3)$$

Los vectores \mathbf{t}_a son conocidos como scores y contienen la información de cómo las muestras están relacionadas unas con otras además, tienen la propiedad de ser ortogonales. Los vectores \mathbf{p}_a se llaman loadings e informan de la relación existente entre las variables y tienen la cualidad de ser ortonormales. Al coger menos componentes principales que variables y debido al error de ajuste del modelo con los datos, se produce un error que se acumula en la matriz \mathbf{E} . El PCA se basa en la descomposición en vectores propios de la matriz de covarianza. La cual se calcula con la siguiente ecuación:

$$\text{cov}(X) = \frac{X^T X}{n - 1} \quad (4)$$

$$\text{cov}(X) \mathbf{p}_a = \lambda_a \mathbf{p}_a \quad (5)$$

$$\sum_{a=1}^m \lambda_a = 1 \quad (6)$$

Donde λ_a es el valor propio asociado al vector propio \mathbf{p}_a . Por último,

$$\mathbf{t}_a = X \mathbf{p}_a \quad (7)$$

Esta ecuación la podemos entender como que \mathbf{t}_a son las proyecciones de \mathbf{X} en \mathbf{p}_a , donde los valores propios λ_a miden la cantidad de varianza capturada, es decir, la información que representan cada uno de los componentes principales. La cantidad de información que captura cada componente principal va disminuyendo según su número es decir, el componente principal número uno representa más información que el dos y así

sucesivamente [17].

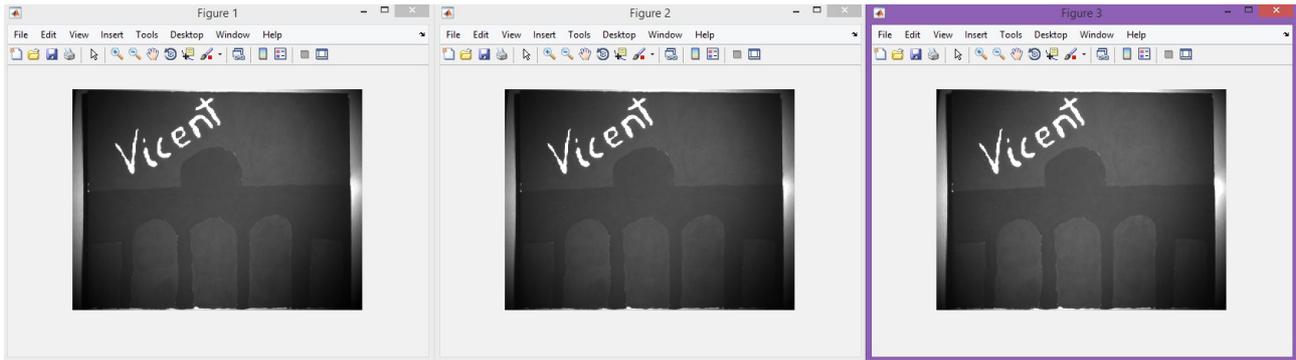


Figura 18: Imágenes originales que se utilizan para calcular el PCA.

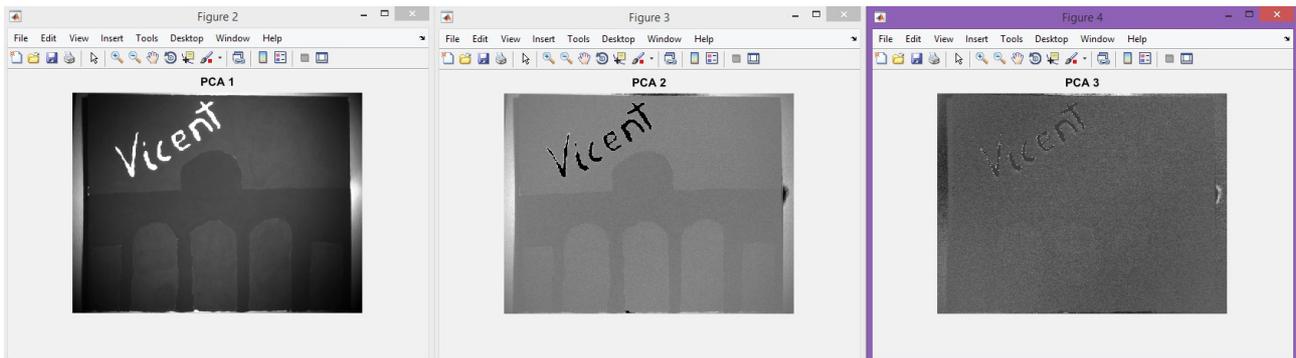


Figura 19: Imágenes que muestran el resultado del PCA.

En la **Figura 18** se muestran las imágenes originales que se han utilizado para calcular el PCA.

En la **Figura 19** se observa como el PCA 1 muestra las componentes principales más importantes, el PCA 2 muestra componentes que no son importantes y el PCA 3 muestra ruido.

3.10. Realce por selección de bandas

Las imágenes hiperespectrales al igual que las multiespectrales implican grandes cantidades de información. El trabajo [18] presenta una técnica para la reducción de dimensionalidad que lidia con imágenes hiperespectrales. El método propuesto en [18] se basa en una estructura de agrupación jerárquica a las bandas de grupo para reducir al mínimo la varianza intra-cluster y maximizar la varianza inter-cluster. Se persigue este objetivo mediante medidas de información, tales como distancias basadas en Información Mutua (WaLuMI) o divergencia Kullback-Leibler (WaLuDi), con el fin de reducir la redundancia de datos y la información no útil entre bandas de imágenes. La técnica presentada en [18] tiene un comportamiento estable para diferentes conjuntos de datos de imagen, y una precisión notable, principalmente a la hora de seleccionar pequeños conjuntos de bandas [18].

En este trabajo se ha utilizado el software *BandSelection_TGR07.exe* que se proporciona en [18] y para facilitar el uso se ha integrado el software dentro de la aplicación creada en

Matlab.

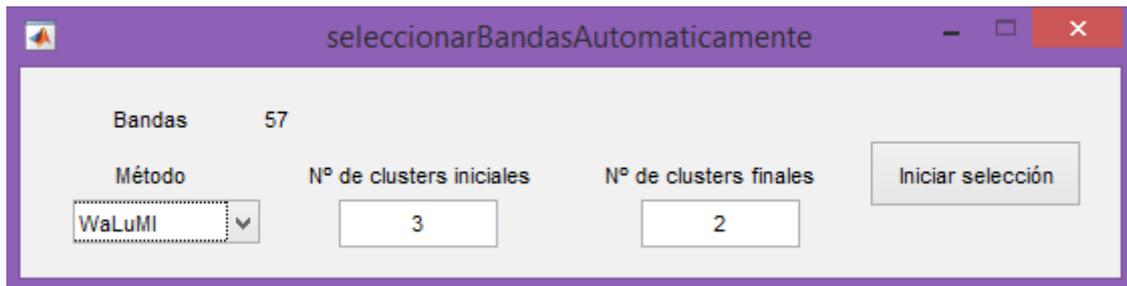


Figura 20: Interfaz gráfica en Matlab para el software BandSelection_TGR07.exe.

3.11. Definiciones de ROIs

Una región de interés (ROI), es un subconjunto seleccionado de muestras dentro de un conjunto de datos determinado para un propósito particular. En la visión por computador se definen las fronteras de un objeto bajo consideración [19].

En el trabajo se ha incluido una función que permite seleccionar una región de interés en la imagen multispectral para aplicar las técnicas de realce utilizando los datos de esa región lo que da como resultado realces más adecuados para esa región de la imagen.

4. Desarrollo y resultados

4.1. Diseño funcional de la aplicación

La aplicación se debe iniciar ejecutando la función **main.m** y matlab abrirá un ventana como la de la **Figura 21**.

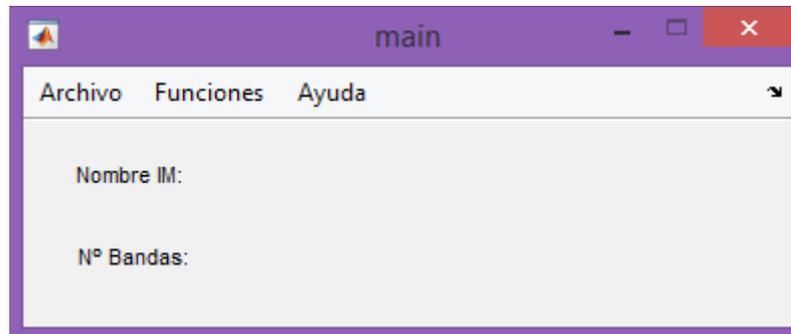


Figura 21: Interfaz gráfica en Matlab de main.m.

Desde esta ventana utilizando la barra de menú podemos acceder a diferentes opciones:

- **Archivo**
 - **Abrir IM** - Abre una imagen multiespectral.
 - **Salir** - Sale de la aplicación.
- **Funciones**
 - **Capturar** - Abre una ventana para capturar imágenes multiespectrales.
 - **Realzar** - Abre una ventana con opciones para realzar imágenes multiespectrales.
 - **Falso color** - Abre una ventana con la que se puede crear imágenes en falso color.
- **Ayuda**
 - **Acerca de ...** - Abre una ventana con información sobre la aplicación.

Si se quiere **Salir**, **Capturar** o ver **Acerca de ...** se puede acceder directamente. Para las opciones **Realzar** y **Falso color** es necesario abrir una imagen multiespectral con la opción **Abrir IM**.

Al seleccionar la opción **Abrir IM** se abrirá una ventana como la de la **Figura 22**

Desde esta ventana hay que seleccionar un archivo con extensión **.fla* que es el que contiene la imagen multiespectral, el archivo **.hdr* contiene los metadatos de la imagen multiespectral. Para abrir las imágenes multiespectrales es necesario que estén los dos archivos en el mismo directorio. Una vez seleccionado el archivo con extensión **.fla* pulsar sobre el botón Abrir y la aplicación se encargará de cargar los datos en memoria.

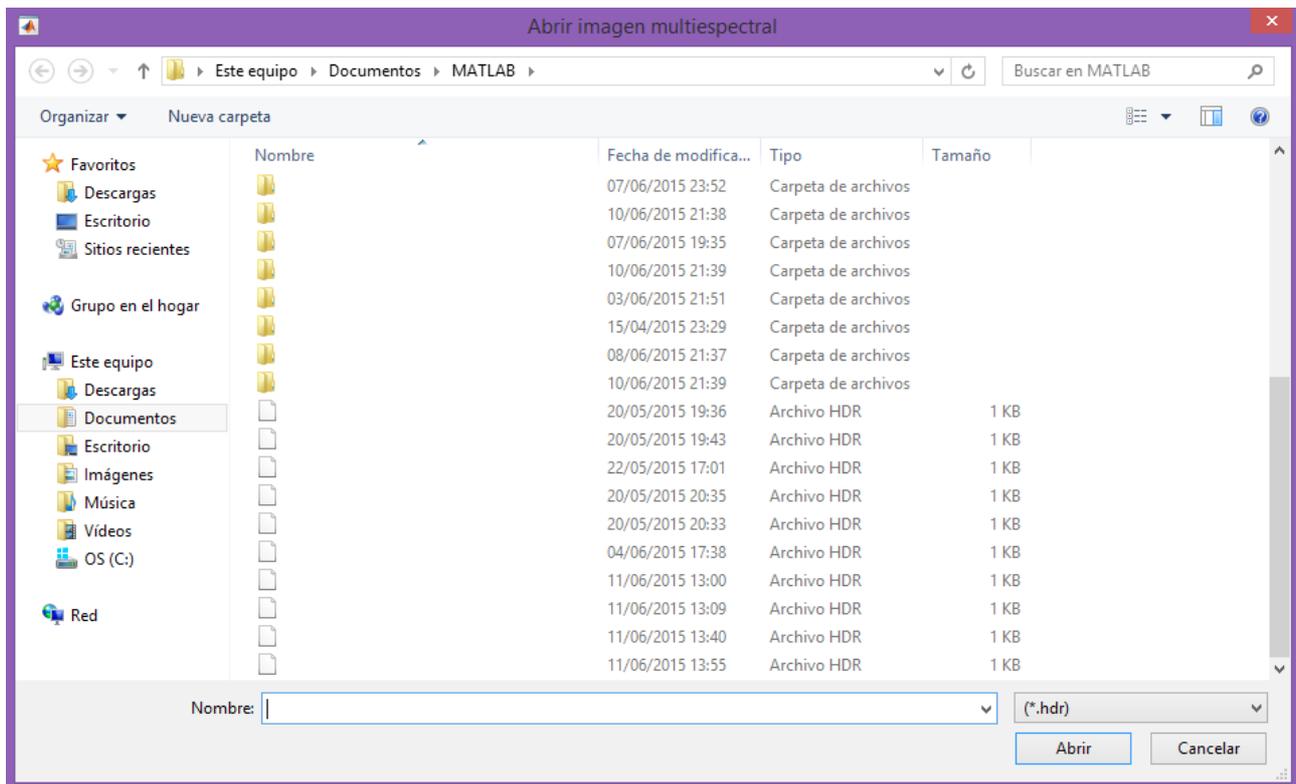


Figura 22: Interfaz gráfica en Matlab de main.m.

Una vez abierta una imagen multiespectral en la ventana de main aparecerá el nombre y el número de bandas que tiene la imagen multiespectral tal y como muestra la **Figura 23**.

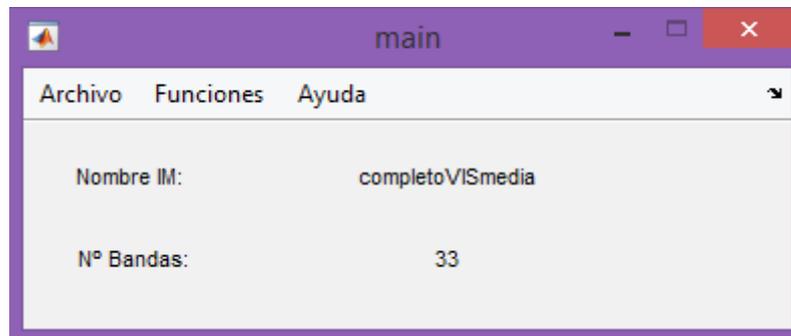


Figura 23: Interfaz gráfica en Matlab de main.m.

Si después de abrir una imagen multiespectral en la ventana **main** se selecciona **Realzar** se accede a las ventanas de **Realzar** y **Figure 1** tal y como se muestra en la **Figura 24**.

Con la ventana **Realzar** y la **Figure 1** se pueden ver las diferentes bandas con los botones << y >> que están en la parte inferior de la ventana **Realzar**.

Si se hace una selección de bandas manual hay que pulsar el botón **Guardar selección** para que se guarde la selección manual. Si la selección se realiza con el botón **Selección automática** no hace falta pulsar el botón **Guardar selección**.

Si se desea guardar la nueva selección como una nueva imagen multiespectral se debe

pulsar sobre el botón **Guardar IM** y aparecerá una ventana como la de la **Figura 28**.

Si se cierra intencionadamente o por error la ventana **Figure 1** será necesario abrir una nueva figura pulsando el botón **Abrir figura**.

Si se pulsa sobre el botón **Recortar (ROI)** y se posiciona el puntero sobre la imagen de la **Figure 1** aparecerá un rectángulo que se podrá seguir ajustando hasta que se pulse doble clic en el interior del rectángulo.

Al pulsar sobre el botón **Medir distancias** aparecerá en la **Figure 1** una línea que se puede estirar, contraer y posicionar los dos extremos en la zona de la imagen que se desea medir.

Si se pulsa sobre **LUT** se abrirá una ventana nueva como la de la **Figura 14**. Tal y como se muestra en la **Figura 15** se pueden añadir puntos y posicionarlos dentro de la gráfica para calcular una tabla LUT y ver como se realzan las características de la imagen multiespectral. Hay que tener en cuenta que para que los cambios se guarden es preciso pulsar el botón **Guardar cambios**. En caso de no querer guardar los cambios bastará con cambiar de banda desde la ventana **Realzar** con << o >> y se volverá a mostrar la banda tal cual estaba antes de acceder a **LUT**.

Si después de realizar algún tipo de realce como un **Stretching** o una **Ecualización** se desea volver a cargar la imagen multiespectral original solo es necesario pulsar sobre **Guardar selección**.

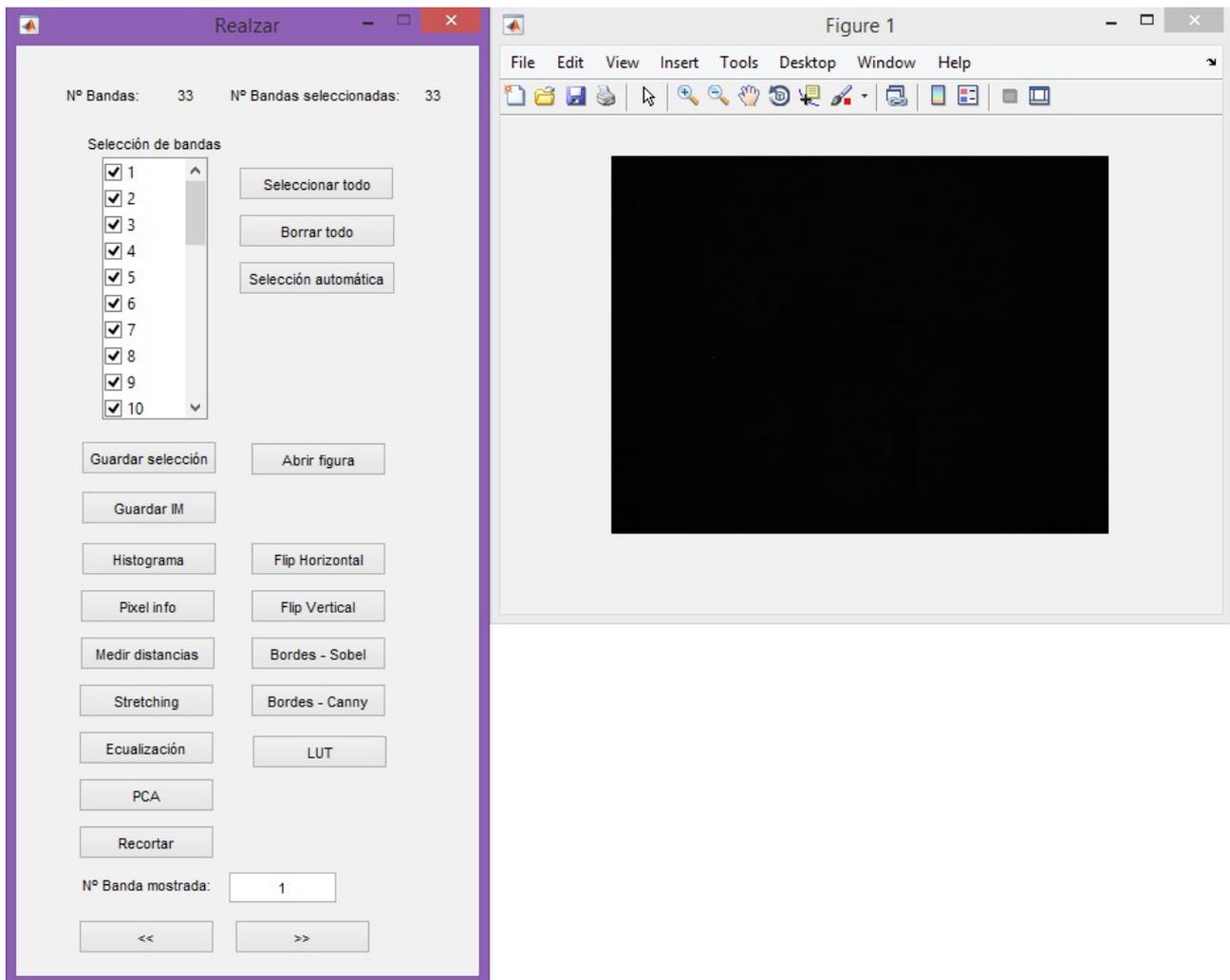


Figura 24: Interfaz gráfica para realzar imágenes multispectrales.

Si desde la ventana **main** se selecciona la opción **Falso color** aparecerán las ventanas **falso_color** y **Figure 1** tal y como se muestra en la **Figura 25**. Hay que tener en cuenta que al iniciar la ventana hay una función que asigna los valores de R, G y B según el número de bandas de la imagen multispectral.

Para seleccionar otras bandas basta con cambiar el número de las bandas que se desean cambiar y pulsar sobre el botón **Falso Color** para que se muestre la imagen en falso color con las nuevas bandas.

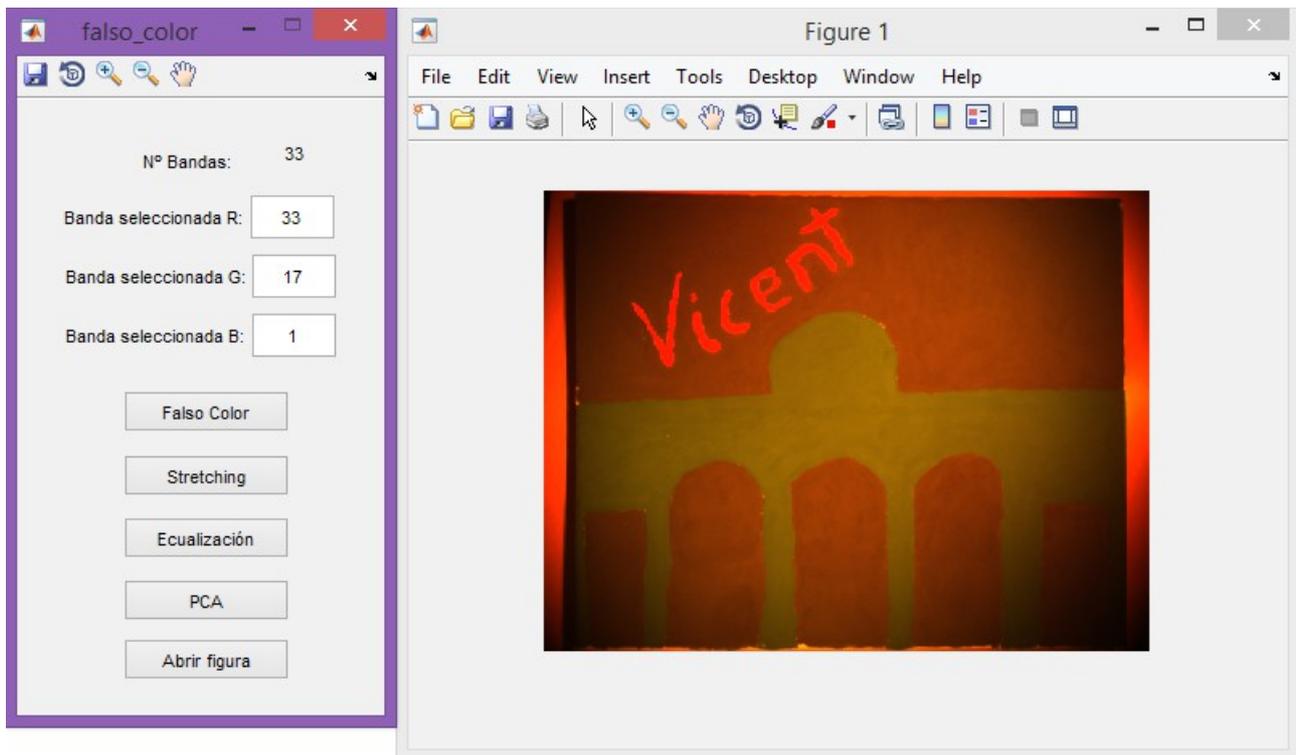


Figura 25: Interfaz gráfica para crear imágenes en falso color.

Si desde la ventana **main** se selecciona la opción **Capturar** se abrirán dos ventanas como las que se muestran en la **Figura 26**.

La cámara por defecto se iniciará con el primero de los formatos soportados por la cámara, en caso de querer cambiar el formato, primero se debe seleccionar un nuevo formato y seguidamente pulsar el botón **Iniciar cámara**.

Con los botones **Previsualizar** y **Parar previsualizar** se puede ver que es lo que capta la cámara o parar la previsualización. Es interesante previsualizar para ajustar el enfoque de la cámara y configurar las características de la cámara con el botón **Configurar DCAM**. También es interesante tener la previsualización iniciada para la configuración del filtro LCTF que se hace pulsando el botón **Configurar LCTF**.

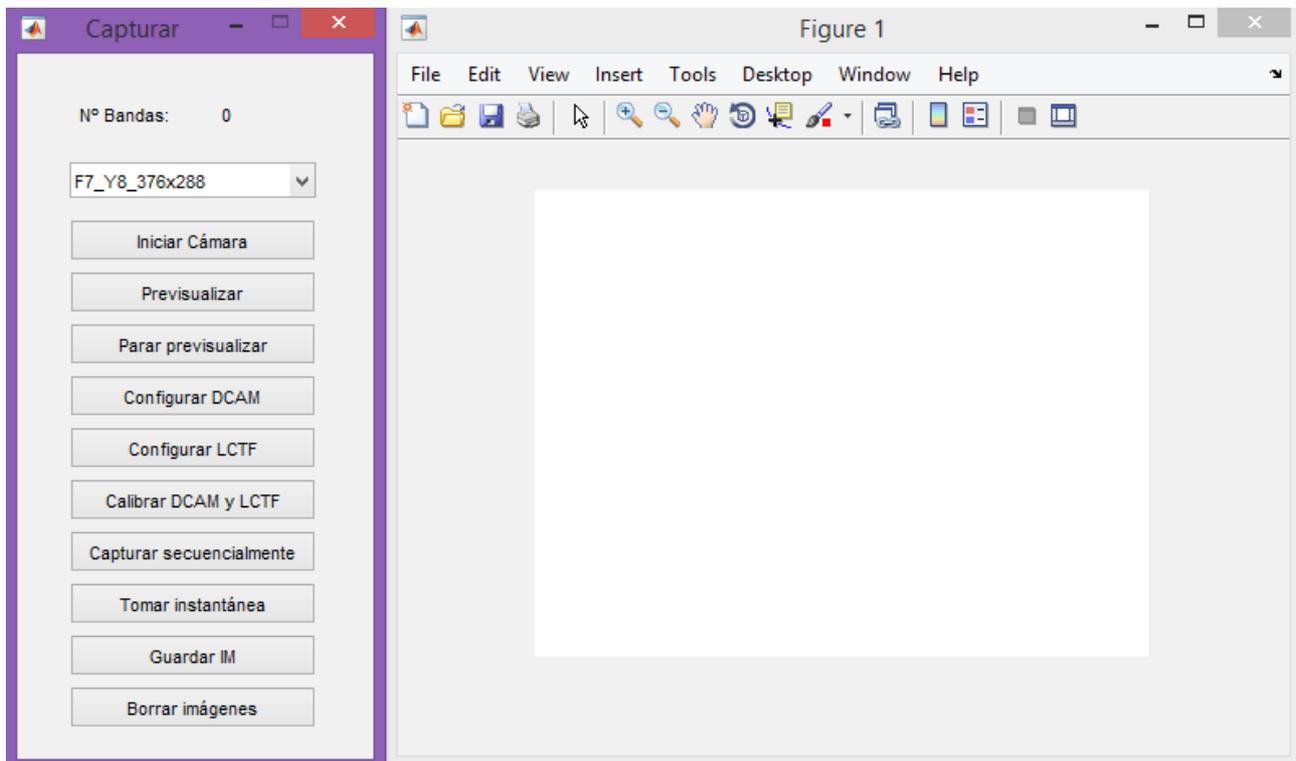


Figura 26: Interfaz gráfica con opciones para capturar imágenes multispectrales.

Un botón interesante para hacer pequeñas pruebas es **Tomar instantánea** con el que se toma una instantánea y se va creando una imagen multispectral que seguidamente se puede guardar con el botón **Guardar IM**. Hay que tener en cuenta que al tomar instantáneas no se está controlando el tiempo de obturación.

Para controlar el tiempo de obturación y la longitud de onda es preciso crear un archivo de texto simple con extensión **.seq* en el que en cada línea debe ser como las de este ejemplo:

```
Time 100.000000 ms - Wavelength 400.000 nm
Time 100.000000 ms - Wavelength 410.000 nm
Time 100.000000 ms - Wavelength 420.000 nm
Time 100.000000 ms - Wavelength 430.000 nm
```

Donde después de Time hay un espacio en blanco y luego el tiempo en milisegundos espacio en blanco y ms espacio en blanco y – espacio en blanco y Wavelength espacio en blanco y la longitud de onda espacio en blanco y nm.

Es importante mantener esta estructura para el buen funcionamiento de la aplicación con los botones **Calibrar DCAM** y **LCTF** y **Capturar secuencialmente**.

Estos botones abren una ventana como la mostrada en la **Figura 27** en la que se debe seleccionar un archivo con extensión **.seq*. Por ejemplo, en la **Figura 27** para calibrar con el filtro del espectro visible se debe seleccionar el archivo *whiteVIS.seq* el cual contiene los tiempos del obturador y las longitudes de onda que se deben calibrar. Este archivo al ser de calibración todos los tiempos serán 100 milisegundos y las longitudes de onda tendrán un

paso de 10 nm es decir la primera será 400 nm y la segunda 410 nm y la tercera 420 nm y así sucesivamente hasta 720 nm que es la última longitud de onda del campo visible que el filtro LCTF permite. Para el filtro del infrarrojo las longitudes de onda irán de 650nm a 1000nm ya que aunque el filtro puede llegar a 1100nm la cámara guppy solo detecta hasta 1000nm.

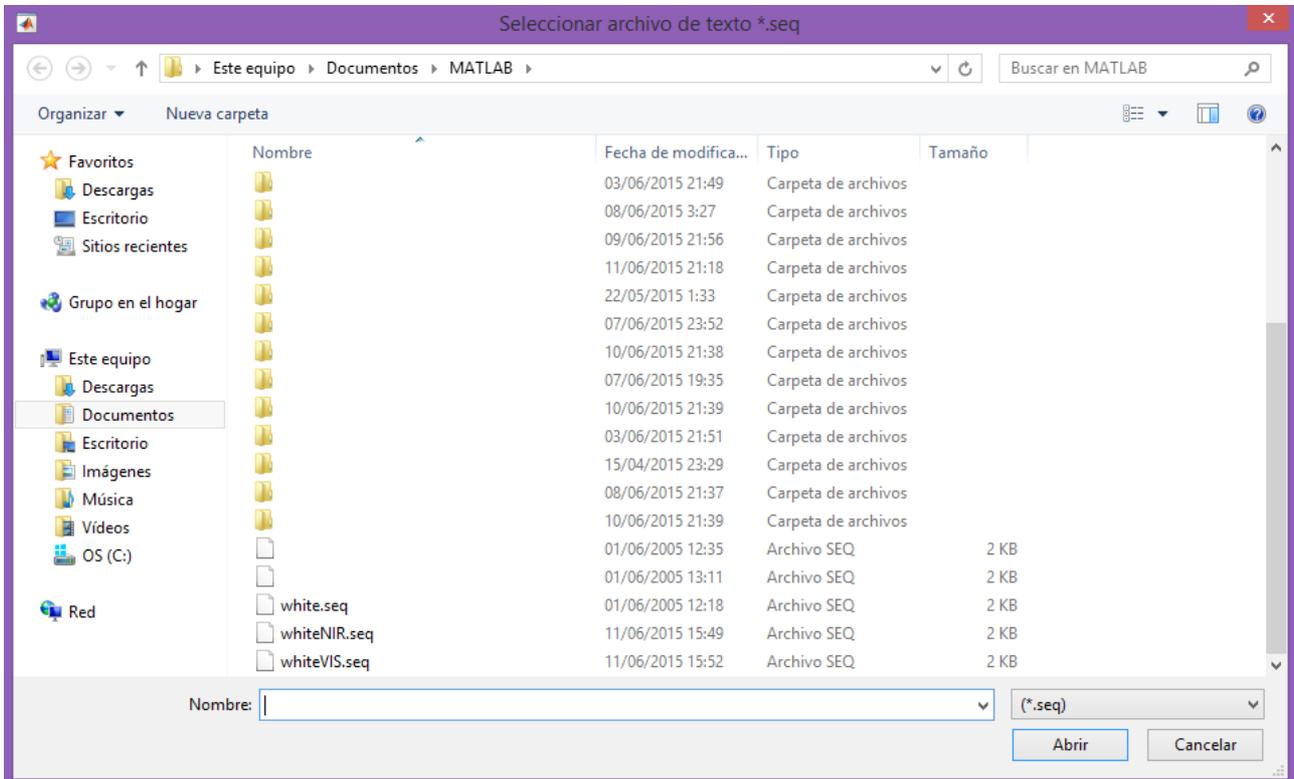


Figura 27: Interfaz gráfica para seleccionar una secuencia de tiempos y bandas.

Como se comenta en el apartado **2.2 Descripción del entorno de trabajo** se debe compensar la percepción del CCD y de los filtros VariSpec en ciertos espectros, para ello se ha creado una función que calcula los tiempos que el sistema necesita para una percepción óptima. Se necesita un blanco patrón que transmita por igual en todas las longitudes de onda. Esta función se puede aplicar pulsando el botón **Calibrar DCAM y LCTF**.

El botón **Calibrar DCAM y LCTF** abre un fichero **.seq* este debe ser un fichero de calibración con todos los tiempos de captura iguales. La aplicación captura secuencialmente un conjunto de imágenes con el filtro adecuado para cada banda según indique el fichero **.seq* y con ello crea una imagen multiespectral. La imagen que debe capturar debe ser el blanco patrón. Una vez finalizado este proceso se deberá seleccionar en la figura la parte de la imagen que se considere más adecuada y se recortará. Con esta selección la aplicación seleccionará una ventana 5x5 con la que calculará las medias que utilizará para calcular los tiempos. Finalmente creará un nuevo fichero **_TiemposNuevos.seq* en el que se crearán las nuevas líneas con los tiempos adecuados.

El botón **Capturar secuencialmente** captura secuencialmente un conjunto de imágenes con el filtro adecuado para cada banda según indique el fichero **.seq* y con ello crea una imagen multiespectral. Esta imagen se puede guardar pulsando el botón **Guardar IM** que abre una

ventana como la mostrada en la **Figura 28**. En esta ventana hay que escribir el nombre que se va a dar a la imagen multiespectral y pulsar **Guardar**. Esta acción creará dos archivos, uno con extensión **.hdr* con los metadatos de la imagen multiespectral y otro con la extensión **.fla* que contiene la imagen multiespectral. Es importante tener en cuenta que son necesarios los dos archivos para poder abrir posteriormente la imagen multiespectral.

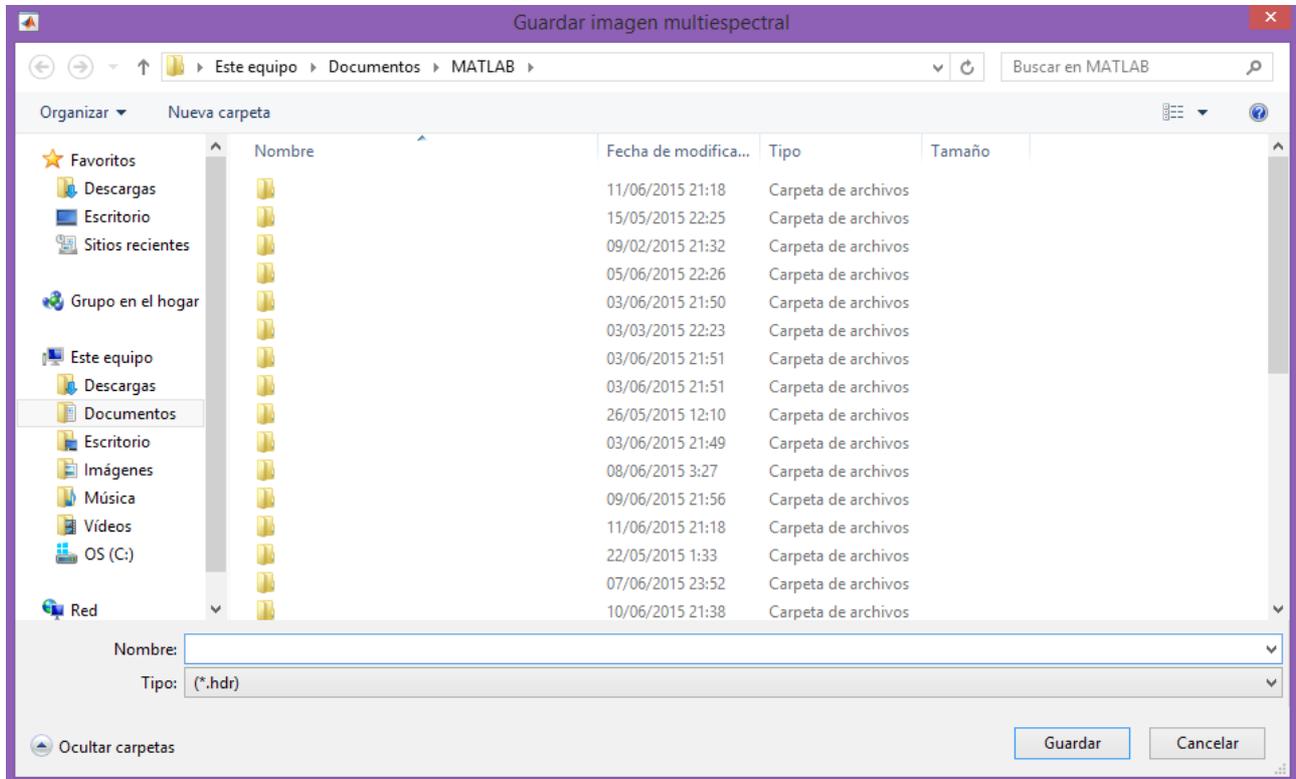


Figura 28: Interfaz gráfica para guardar una imagen multiespectral.

Para configurar la cámara de forma manual pulsando sobre **Configurar DCAM** se abre una ventana como la de la **Figura 29**.

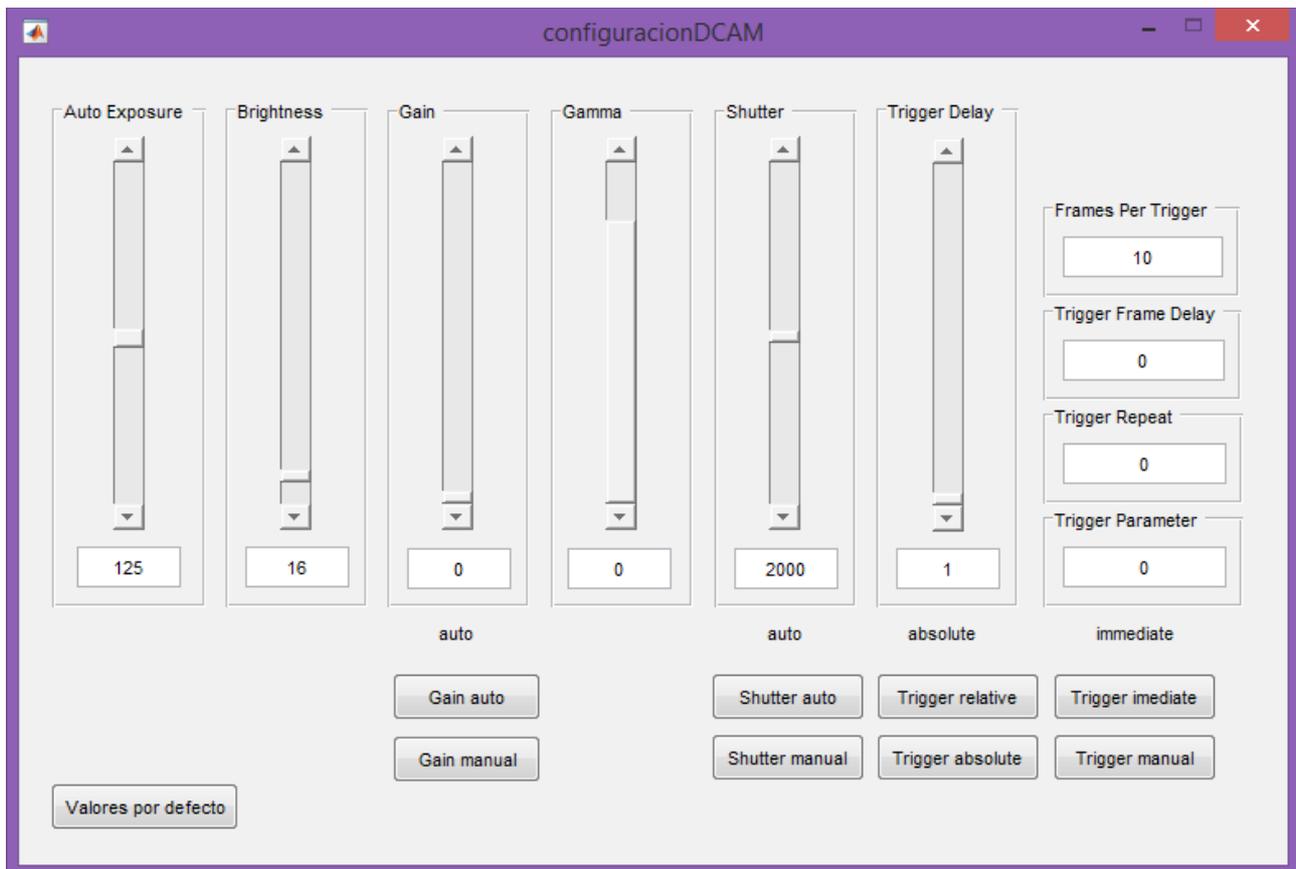


Figura 29: Interfaz gráfica para configurar la cámara digital.

Esta ventana permite modificar ciertos parámetros de la cámara. Pero cuando se pulsa sobre el botón **Capturar secuencialmente** de la ventana de la **Figura 26** se modifican ciertos parámetros para que la cámara capture las imágenes con los filtros adecuados de manera adecuada. En este caso $\text{Trigger Repeat} = 0$ para poner la cámara en (one-shot acquisition), $\text{Trigger Frame Delay} = 0$, $\text{Frames Per Trigger} = 1$ y Shutter se pone en modo manual. De esta manera para evitar errores por alguna modificación que no es compatible con la captura secuencial se ponen los valores por defecto al pulsar el botón **Capturar secuencialmente**.

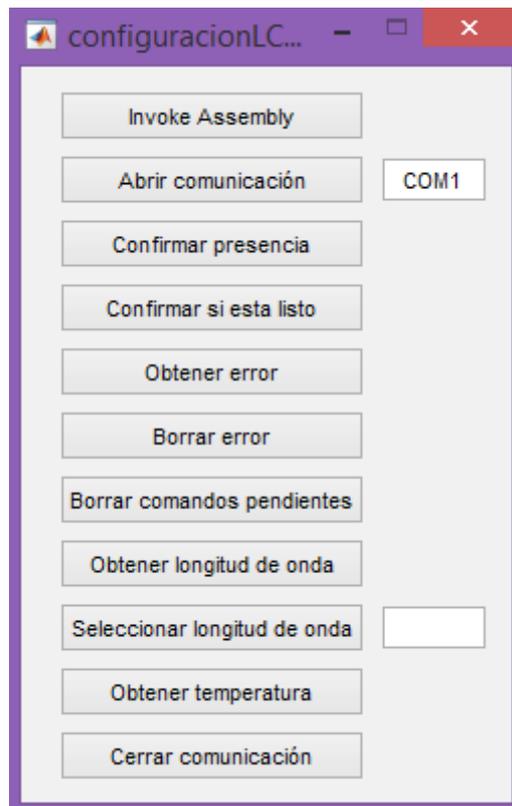


Figura 30: Interfaz gráfica para configurar/usar el filtro LCTF de forma manual.

Si se pulsa sobre el botón **Configurar LCTF** de la ventana que se muestra en la **Figura 26** aparece la ventana mostrada en la **Figura 30** con la que se puede configurar el filtro LCTF por ejemplo para utilizarlo cuando se toma una instantánea. La ventana de la **Figura 30** tiene unos pasos importantes que se deben seguir para utilizar el filtro LCTF correctamente. Primero se debe pulsar el botón **Invoke Assembly** que crea un objeto que utiliza la interfaz del filtro. Luego se debe pulsar sobre **Abrir comunicación** con el puerto de comunicación adecuado que el sistema operativo utiliza para la comunicación en este caso **COM1**. Para averiguar el puerto que está utilizando el sistema operativo hay que ir a Panel de control -> Sistema -> Administrador de dispositivos. Después de estos pasos ya se puede utilizar el filtro LCTF, hay que tener en cuenta que cuando se termina de utilizar el filtro LCTF hay que cerrar la comunicación pulsando el botón **Cerrar comunicación**. Para cambiar la longitud de onda del filtro se debe escribir la longitud de onda deseada y pulsar el botón **Seleccionar longitud de onda** que enviará las señales necesarias para que el filtro LCTF active esa longitud de onda.

Si en la **Figura 21** se selecciona **Acerca de ...** se abre la ventana de la **Figura 31** donde hay una breve explicación de que hace la aplicación, el autor, la versión y la licencia que utiliza la aplicación.

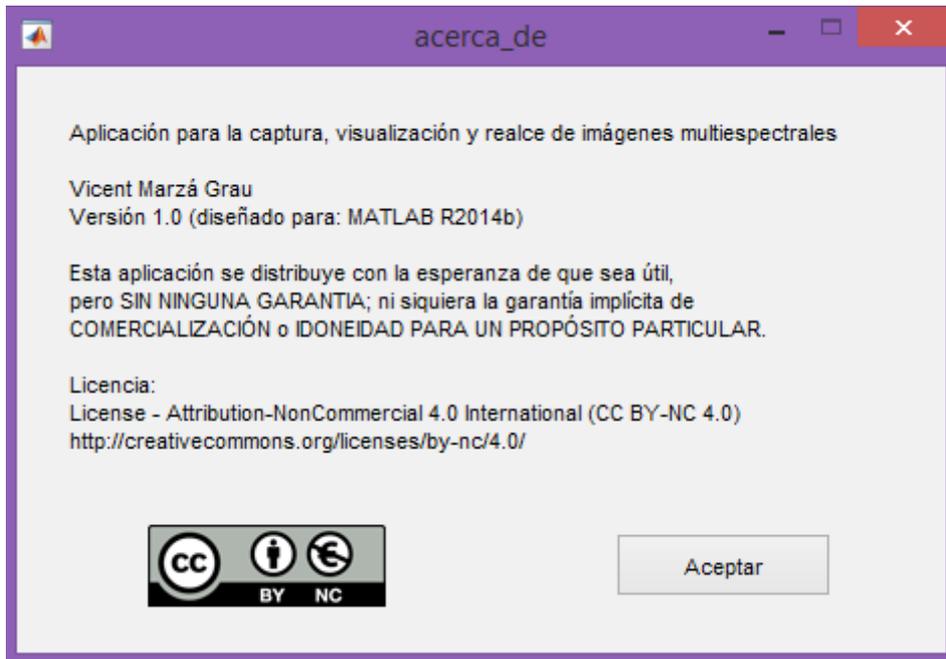


Figura 31: Interfaz gráfica en Matlab de acerca_de.m.

4.2. Implementación

Para la implementación de la aplicación en Matlab se ha hecho uso de dos librerías y del software *BandSelection_TGR07.exe* [19].

Para el manejo de la cámara Guppy se ha instalado el paquete de soporte de Matlab para las cámaras DCAM IEEE 1394. Este paquete ofrece una serie de funciones que facilitan el manejo de una cámara DCAM 1394 como es Guppy.

Para el manejo de los filtros VariSpec se han instalado los drivers que se comunican con el módulo electrónico de control VariSpec que es el que controla el filtro LCTF. Estos drivers ofrecen una serie de funciones para el manejo con Matlab.

Para la selección automática de bandas se ha utilizado el software comentado en el punto **3.10 Realce por selección de bandas** de esta memoria.

El diagrama de flujo de la **Figura 32** muestra las partes más importantes de la aplicación.

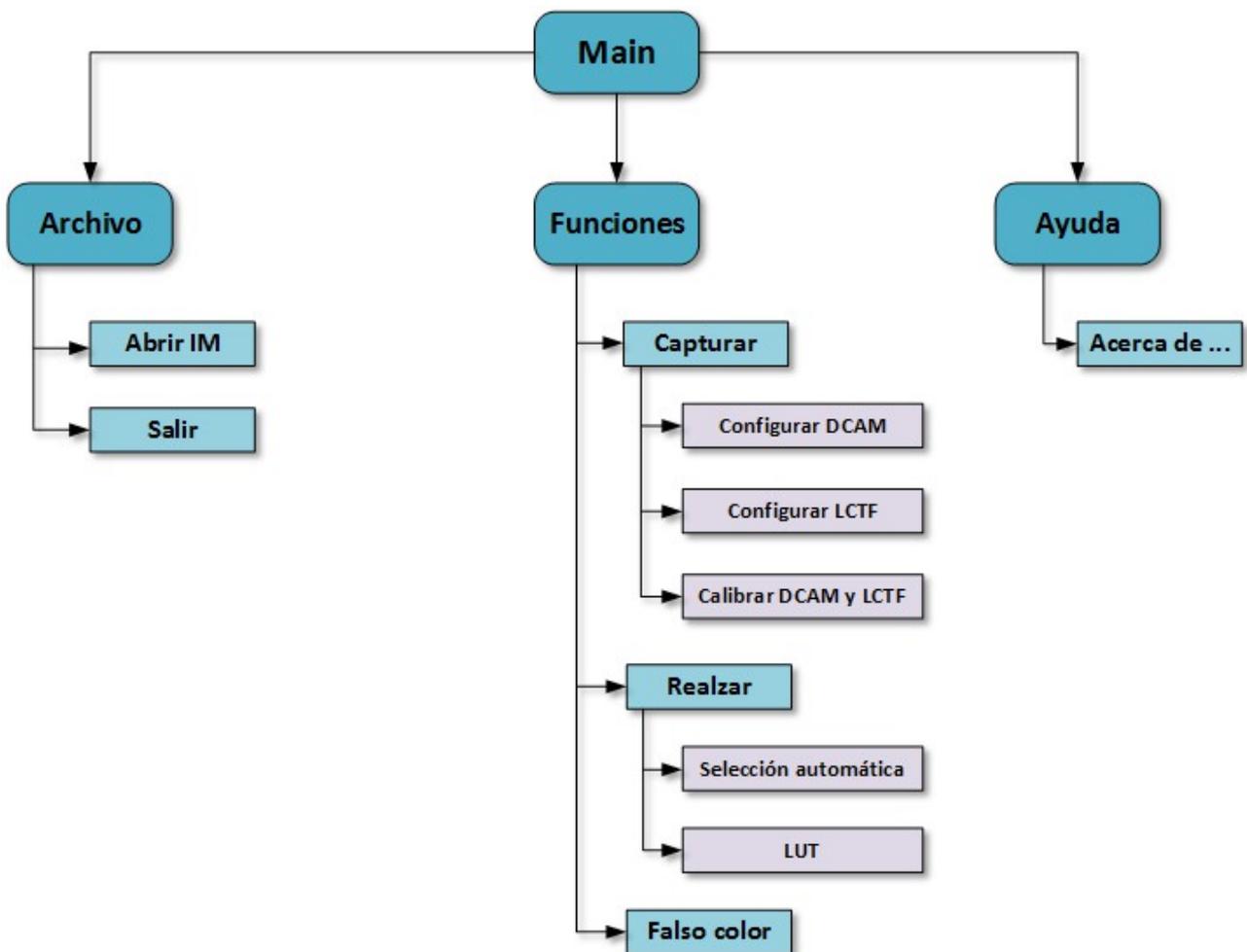


Figura 32: Diagrama de flujo de la aplicación.

4.3. Resultados y discusión

Los experimentos realizados a la aplicación constan de la captura y realce de una obra de arte (**Vicent**) y el realce de dos obras de arte (**Escena** y **Barcos**) capturadas anteriormente por el grupo de visión por ordenador del departamento de lenguajes y sistemas informáticos de la Universidad Jaime I.

Características de las imágenes multiespectrales obtenidas de las obras de arte:

- **Vicent**
 - **Rango visible (400 - 720)nm:**
 - Número de bandas: 33
 - Resolución: 376x288
 - **Rango infrarrojo cercano (650 - 1100)nm:**
 - Número de bandas: 36
 - Resolución: 376x288
- **Escena**
 - **Rango visible (400 - 720)nm:**
 - Número de bandas: 33

- Resolución: 1032x778
- **Rango infrarrojo cercano (650 - 1100)nm:**
 - Número de bandas: 46
 - Resolución: 1032x778
- **Barcos**
 - **Rango visible (400 - 720)nm:**
 - Número de bandas: 33
 - Resolución: 676x516
 - **Rango infrarrojo cercano (650 - 1050)nm:**
 - Número de bandas: 41
 - Resolución: 676x516

4.3.1. Preparación de los experimentos - Diseño de la obra de arte **Vicent**

Para realizar los experimentos para este trabajo se ha creado la obra de arte **Vicent** la cuál permite ver claramente los resultados que la aplicación ofrece con el realce de las imágenes multispectrales.

A continuación se muestran los pasos del diseño de la obra de arte **Vicent**:

1. Se ha dibujado un boceto en el lienzo con un portaminas **Figura 33**.



Figura 33: Boceto 1 - Palacio de Westminster.

2. Se ha pintado en rojo el primer boceto **Figura 34**.



Figura 34: Cuadro 1 - Palacio de Westminster.

3. Se ha dibujado un boceto nuevo encima del primer cuadro **Figura 35**.



Figura 35: Cuadro 1 - Boceto 2 - Palacio de Westminster - Puerta de Alcalá.

4. Se ha pintado en verde el segundo boceto **Figura 36**.



Figura 36: Cuadro 2 - Palacio de Westminster - Puerta de Alcalá.

5. Se ha pintado el fondo en Azul tapando por completo el primer cuadro **Figura 37**.



Figura 37: Cuadro 2 - Puerta de Alcalá.

4.3.2. Experimentos

Se han realizado seis transformaciones diferentes para cada imagen multiespectral, consistentes en mostrar las funcionalidades implementadas para:

1. Falso color
2. Stretching
3. LUT
4. Ecualización
5. PCA
6. ROI

1. Falso color (realce por selección de bandas)

Experimento realizado con la obra de arte *Vicent*.

Para este experimento se ha realizado una *selección manual* de bandas y las bandas seleccionadas son las que se han utilizado para obtener la imagen en falso color. Se ha realizado el experimento sobre la obra de arte **Vicent** para las bandas del rango *visible*.

Para las bandas del rango *visible* se muestran las tres bandas seleccionadas manualmente **Figura 38** banda R, **Figura 39** banda G, **Figura 40** banda B. En la **Figura 41** se muestran las tres bandas en una imagen en falso color.



Figura 38: Vicent - Visible - Banda R.

En la **Figura 38** se puede observar como la luz proviene del color rojo, como el nombre está escrito en color rojo éste es el que más luz emite en esta banda.



Figura 39: Vicent - Visible - Banda G.

En la **Figura 39** se puede observar como la luz proviene del color verde, como la puerta de Alcalá esta pintada en verde es la que más luz emite en esta banda.



Figura 40: Vicent - Visible - Banda B.

En la **Figura 40** se puede observar como la luz proviene del color azul, como el fondo esta pintado en azul este es el que más luz emite en esta banda.



Figura 41: Vicent - Visible - Imagen en falso color

En la **Figura 41** se puede observar como la selección de las bandas en los rangos apropiados nos permiten ver una imagen en falso color parecida a la imagen real de la obra de arte.

Experimento realizado con la obra de arte *Escena*.

Para este experimento se ha realizado una *selección manual* de bandas y las bandas seleccionadas son las que se han utilizado para obtener la imagen en falso color. Se ha realizado el experimento sobre la obra de arte **Escena** para las bandas del rango *visible*.

Para las bandas del rango *visible* se muestran las tres bandas seleccionadas manualmente **Figura 42** banda R, **Figura 43** banda G, **Figura 44** banda B. En la **Figura 45** se muestran las tres bandas en una imagen en falso color.



Figura 42: Escena - Visible - Banda R.

En la **Figura 42** se puede observar la luz que proviene de la banda roja.



Figura 43: Escena - Visible - Banda G.

En la **Figura 43** se puede observar la luz que proviene de la banda verde.



Figura 44: Escena - Visible - Banda B.

En la **Figura 44** se puede observar la luz que proviene de la banda azul.



Figura 45: Escena - Visible - Banda RGB.

En la **Figura 45** se puede observar como la selección de las bandas en los rangos apropiados nos permiten ver una imagen en falso color parecida a la imagen real de la obra de arte.

*Experimento realizado con la obra de arte **Barcos**.*

Para este experimento se ha realizado una *selección automática de bandas* y las bandas automáticamente seleccionadas son las que se han utilizado para obtener la imagen en falso color. Se ha utilizado el método WaLuMI y se ha realizado el experimento sobre la obra de arte **Barcos** para las bandas del rango *visible* y las bandas del rango del *infrarrojo cercano*.

Para las bandas del rango *visible* se muestran las tres bandas seleccionadas automáticamente **Figura 46** banda R, **Figura 47** banda G, **Figura 48** banda B. En la **Figura 49** se muestran las tres bandas en una imagen en falso color.

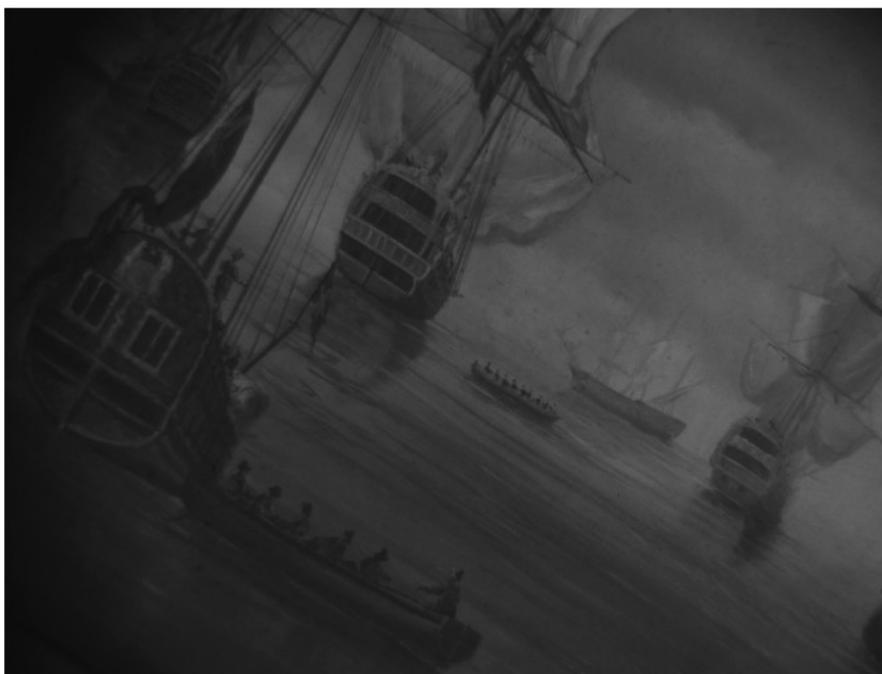


Figura 46: Barcos - Visible - Banda R.

En la **Figura 46** en el barco central se puede ver como encima de la primera vela hay una bandera que tapa la segunda vela. En la bandera se pueden diferenciar unas líneas propias del diseño de la bandera.

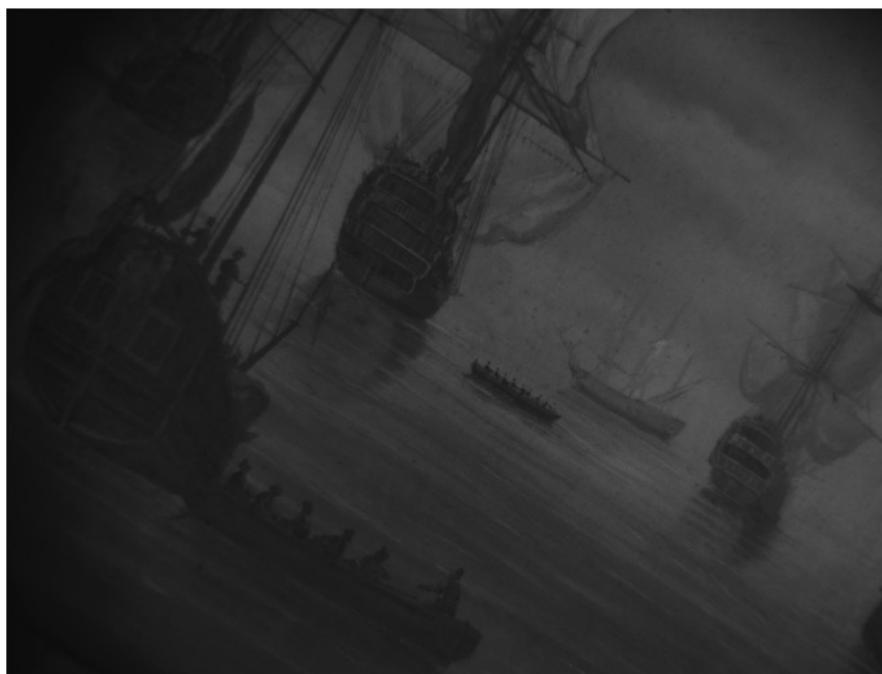


Figura 47: Barcos - Visible - Banda G.

En la **Figura 47** en el barco central se puede ver como hay una bandera oscura que tapa la primera y la segunda vela.

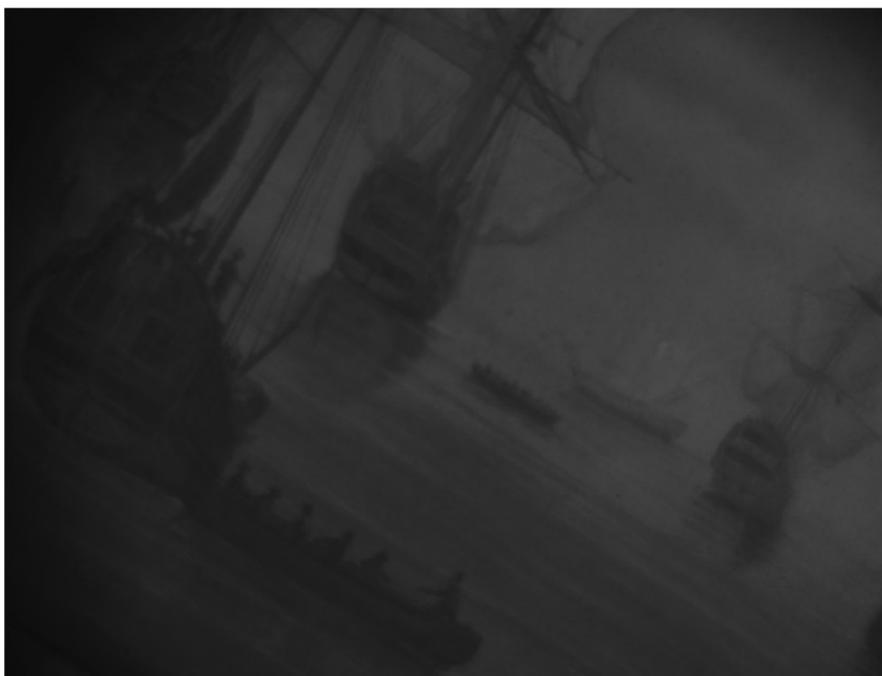


Figura 48: Barcos - Visible - Banda B.

En la **Figura 48** en el barco central se puede ver como hay una bandera clara que tapa la primera y la segunda vela.



Figura 49: Barcos - Visible - Imagen en falso color.

En la **Figura 49** en el barco central se puede ver como hay una bandera roja con la parte superior oscura con unas líneas rojas del diseño de la bandera.

En la **Figura 47** y la **Figura 48** no se ven las rayas de la bandera que hay en la **Figura 46**, con el realce de falso color se observa una unión de dichas figuras. Con los distintos colores se pueden observar las diferencias respecto a las bandas originales.

Para las bandas del rango *infrarrojo cercano* se muestran las tres bandas seleccionadas automáticamente **Figura 50** banda R, **Figura 51** banda G, **Figura 52** banda B. En la **Figura 53** se muestran las tres bandas en una imagen en falso color.



Figura 50: Barcos - Infrarrojo cercano - Banda R.

En la **Figura 50** en el barco derecho que corresponde al barco central de las figuras **Figura 46**, **Figura 47**, **Figura 48** y **Figura 49** se puede ver como no se distingue ninguna bandera que claramente tape las velas.



Figura 51: Barcos - Infrarrojo cercano - Banda G.

En la **Figura 51** en el barco derecho que corresponde al barco central de las figuras **Figura 46**, **Figura 47**, **Figura 48** y **Figura 49** se puede ver como no se distingue ninguna bandera que claramente tape las velas.



Figura 52: Barcos - Infrarrojo cercano - Banda B.

En la **Figura 52** en el barco derecho que corresponde al barco central de las figuras **Figura 46**, **Figura 47**, **Figura 48** y **Figura 49** se puede ver como encima de la primera vela hay una bandera que tapa parte de la segunda vela. En la bandera se pueden diferenciar unas rayas propias del diseño de la bandera. Esta bandera no se ha podido distinguir fácilmente en las figuras **Figura 50** y **Figura 51**.



Figura 53: Barcos - Infrarrojo cercano - Imagen en falso color.

En la **Figura 53** en el barco derecho que corresponde al barco central de las figuras **Figura 46**, **Figura 47**, **Figura 48** y **Figura 49** se puede ver como encima de la primera vela hay una bandera (amarilla) que tapa parte de la segunda vela. En la bandera se pueden diferenciar difícilmente unas rayas propias del diseño de la bandera. Esta imagen en falso color no ofrece los colores parecidos a los reales ya que se han utilizado bandas del infrarrojo cercano.

2. Stretching

Experimento realizado con la obra de arte *Vicent*.

En la **Figura 54** se presenta la última banda capturada del infrarrojo cercano es decir entre (1000nm-1010nm) al ser parte del espectro del infrarrojo se pueden distinguir partes del palacio de Westminster.



Figura 54: Vicent - Infrarrojo cercano - Imagen original.

En la **Figura 55** se ha realizado un stretching para ajustar los valores de los pixels entre 0 y 255. Como resultado ha habido un realce en la imagen en la cuál se puede diferenciar mejor el palacio de Westminster e incluso los bocetos tanto del palacio de Westminster como de la puerta de Alcalá.



Figura 55: Vicent - Infrarrojo cercano - Stretching.

Experimento realizado con la obra de arte *Escena*.

En la **Figura 56** se presenta la última banda capturada del infrarrojo cercano es decir entre (1000nm-1010nm).



Figura 56: Escena - Infrarrojo cercano - Imagen original.

En la **Figura 57** se ha realizado un stretching para ajustar los valores de los pixels entre 0 y 255. Como resultado ha habido un realce en la imagen en la cuál se pueden diferenciar mejor las figuras de la escena.



Figura 57: Escena - Infrarrojo cercano - Stretching.

Experimento realizado con la obra de arte **Barcos**.

En la **Figura 58** se presenta la última banda capturada del infrarrojo cercano es decir entre (1000nm-1010nm).



Figura 58: Barcos - Infrarrojo cercano - Imagen original.

En la **Figura 59** se ha realizado un stretching para ajustar los valores de los pixels entre 0 y 255. Como resultado ha habido un realce en la imagen en la cuál se pueden diferenciar mejor los elementos de la escena.



Figura 59: Barcos - Infrarrojo cercano - Stretching.

3. LUT

Experimento realizado con la obra de arte *Vicent*.

Hay que tener en cuenta que la imagen original es la que se muestra en la **Figura 54**. En la **Figura 60** se muestran los puntos que representan la tabla de LUT. En la **Figura 61** se puede apreciar el realce conseguido con la tabla de LUT con el cuál se ha realizado el palacio de Westminster mejor que con el realce por stretching.

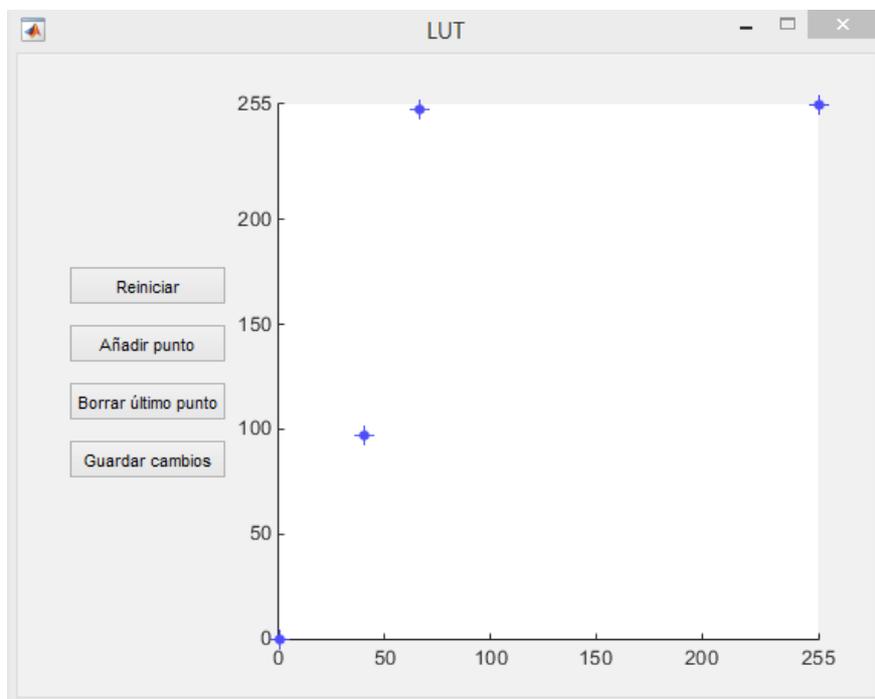


Figura 60: Representación gráfica de la tabla LUT.



Figura 61: Vicent - Infrarrojo cercano - LUT.

*Experimento realizado con la obra de arte **Escena**.*

Hay que tener en cuenta que la imagen original es la que se muestra en la **Figura 56**. En la **Figura 62** se muestran los puntos que representan la tabla de LUT. En la **Figura 63** se puede apreciar el realce conseguido con la tabla de LUT con el cuál se ha realizado la escena mejor que con el realce por stretching ya que se ha conseguido más contraste.

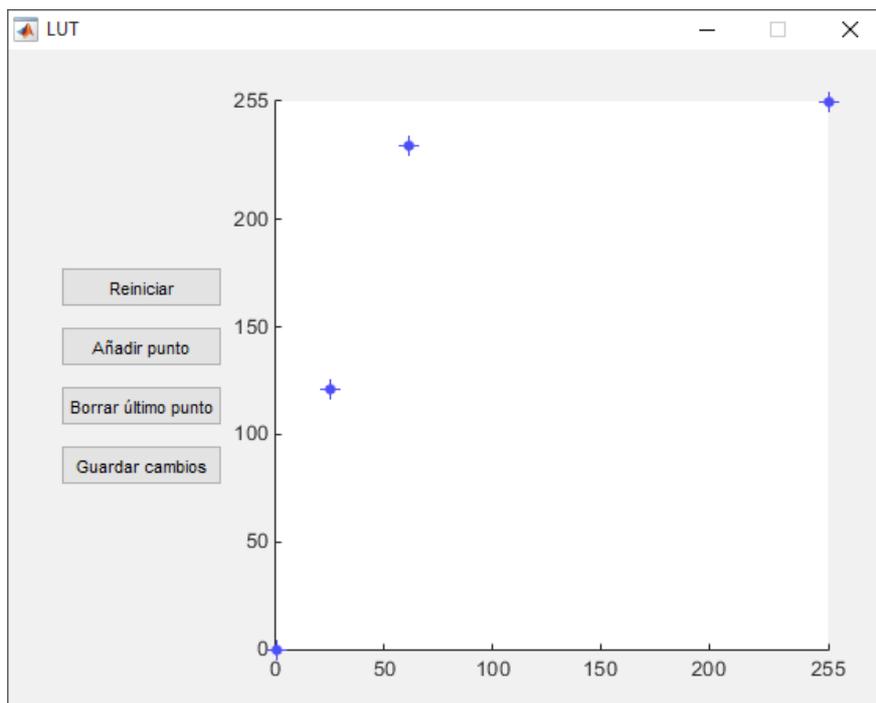


Figura 62: Representación gráfica de la tabla LUT.



Figura 63: Escena - Infrarrojo cercano - LUT.

Experimento realizado con la obra de arte *Barcos*.

Hay que tener en cuenta que la imagen original es la que se muestra en la **Figura 58**. En la **Figura 64** se muestran los puntos que representan la tabla de LUT. En la **Figura 65** se puede apreciar el realce conseguido con la tabla de LUT, en este caso se ha realizado la sombra de los barcos.

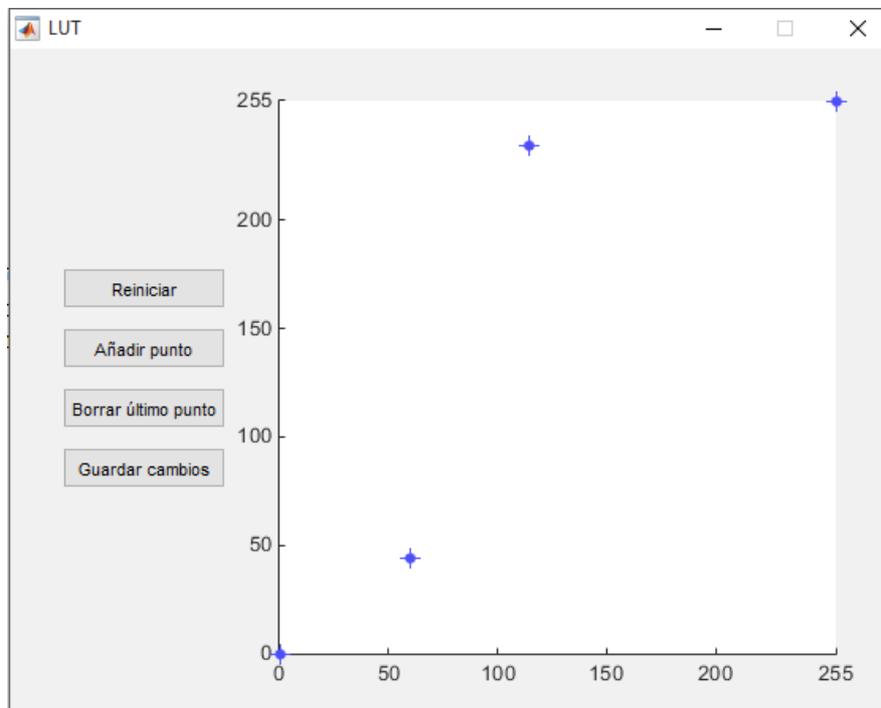


Figura 64: Representación gráfica de la tabla LUT.



Figura 65: Escena - Infrarrojo cercano - LUT.

4. Ecuación

*Experimento realizado con la obra de arte **Vicent**.*

En la **Figura 54** se muestra la imagen original, en la **Figura 66** se muestra la imagen ecualizada. Esta función realza la imagen respecto a la original.



Figura 66: Vicent - Infrarrojo cercano - Ecuación.

*Experimento realizado con la obra de arte **Escena**.*

En la **Figura 56** se muestra la imagen original, en la **Figura 67** se muestra la imagen ecualizada. Esta función realza la imagen respecto a la original, se puede observar mucho contraste entre las figuras y los diferentes elementos de la escena.



Figura 67: Escena - Infrarrojo cercano - Ecuación.

*Experimento realizado con la obra de arte **Barcos**.*

En la **Figura 58** se muestra la imagen original, en la **Figura 68** se muestra la imagen ecualizada. Esta función realza la imagen respecto a la original.



Figura 68: Barcos - Infrarrojo cercano - Ecuación.

5. PCA

Experimento realizado con la obra de arte *Vicent*.

Para realizar el PCA se necesitan tres bandas, se han seleccionado al azar la 10, 24 y 33.

En la **Figura 69** se muestra la banda original 10, en la **Figura 70** se muestra la banda original 24 y en la **Figura 71** se muestra la banda original 33.

Utilizando estas tres imágenes se ha calculado el PCA y el resultado del PCA 1 se muestra en la **Figura 72**, el PCA 2 y el PCA 3 no se muestran ya que solo es ruido que se ha eliminado del resultado del PCA 1.

Se puede observar en la **Figura 72** como el realce de características permite visualizar mejor la imagen.



Figura 69: Vicent - Infrarrojo cercano - Banda 10.



Figura 70: Vicent - Infrarrojo cercano - Banda 24.



Figura 71: Vicent - Infrarrojo cercano - Banda 33.



Figura 72: Vicent - Infrarrojo cercano - PCA 1.

Experimento realizado con la obra de arte *Escena*.

Para realizar el PCA se necesitan tres bandas, se han seleccionado al azar la 10, 24 y 33.

En la **Figura 73** se muestra la banda original 10, en la **Figura 74** se muestra la banda original 24 y en la **Figura 75** se muestra la banda original 33.

Utilizando estas tres imágenes se ha calculado el PCA y el resultado del PCA 1 se muestra en la **Figura 76**, el PCA 2 y el PCA 3 no se muestran ya que solo es ruido que se ha eliminado del resultado del PCA 1.

Se puede observar en la **Figura 76** como el realce de características permite visualizar mejor la imagen. Por ejemplo el reloj que esta en la parte superior derecha se puede ver

mejor con el PCA. También el gato de la parte inferior derecha se puede distinguir mejor.



Figura 73: Escena - Visible - Banda 10.



Figura 74: Escena - Visible - Banda 24.



Figura 75: Escena - Visible - Banda 33.



Figura 76: Escena - Visible - PCA 1.

Experimento realizado con la obra de arte **Barcos**.

Para realizar el PCA se necesitan tres bandas, se han seleccionado al azar la 10, 24 y 33.

En la **Figura 77** se muestra la banda original 10, en la **Figura 78** se muestra la banda original 24 y en la **Figura 79** se muestra la banda original 33.

Utilizando estas tres imágenes se ha calculado el PCA y el resultado del PCA 1 se muestra en la **Figura 80**, el PCA 2 y el PCA 3 no se muestran ya que solo es ruido que se ha

eliminado del resultado del PCA 1.

Se puede observar en la **Figura 80** como el realce de características permite visualizar mejor la imagen.



Figura 77: Barcos - Infrarrojo cercano - Banda 10.



Figura 78: Barcos - Infrarrojo cercano - Banda 24



Figura 79: Barcos - Infrarrojo cercano - Banda 33.



Figura 80: Barcos - Infrarrojo cercano - PCA1.

6. ROI

Experimento realizado con la obra de arte *Vicent*.

Se ha recortado la imagen para aplicar una ecualización únicamente en esa zona. Esta práctica da resultados diferentes al utilizar únicamente los datos de esa región para hacer los cálculos de las distintas funciones a diferencia de aplicar la función sobre toda la imagen entera.

En la **Figura 81** se ha aplicado una ecualización sobre toda la imagen y luego se ha

recortado. En la **Figura 82** se ha recortado la imagen y luego se le ha aplicado la ecualización. Se puede ver como se ha realizado mejor la **Figura 82** que la **Figura 81**. Se demuestra con este experimento que aplicar las funciones en una región de la imagen puede dar realces mejores en esas áreas que aplicando las funciones en la imagen completa.



Figura 81: Vicent - Infrarrojo cercano - Ecualización imagen completa.



Figura 82: Vicent - Infrarrojo cercano - Ecualización imagen recortada.

Experimento realizado con la obra de arte *Escena*.

Utilizando las bandas 10, 24 y 33 se ha recortado la escena para aplicar el PCA únicamente en esa zona de la imagen. Esta práctica da resultados diferentes al utilizar únicamente los datos de esa región para hacer los cálculos de las distintas funciones.

En la **Figura 83** se ha aplicado un PCA sobre toda la imagen y luego se ha recortado. En la **Figura 84** se ha recortado la imagen y luego se ha aplicado un PCA. Se puede ver como se ha realizado mejor la **Figura 84** que la **Figura 83**. Se demuestra con este experimento que aplicar las funciones en una región de la imagen puede dar realces mejores en esas áreas que aplicando las funciones en la imagen completa.



Figura 83: Gato - Visible - Banda 33 original.

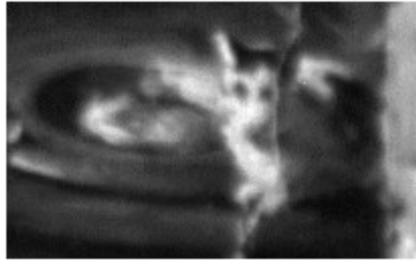


Figura 84: Gato - Visible - PCA 1.

Experimento realizado con la obra de arte *Barcos*.

Se ha recortado la imagen para aplicar una ecualización únicamente en esa zona. Esta práctica da resultados diferentes al utilizar únicamente los datos de esa región para hacer los cálculos de las distintas funciones a diferencia de aplicar la función sobre toda la imagen entera.

En la **Figura 85** se ha aplicado una ecualización sobre toda la imagen y luego se ha recortado. En la **Figura 86** se ha recortado la imagen y luego se le ha aplicado la ecualización. Se puede ver como se ha realizado mejor la **Figura 86** que la **Figura 85**. Se demuestra con este experimento que aplicar las funciones en una región de la imagen puede dar realces mejores en esas áreas que aplicando las funciones en la imagen completa.



Figura 85: Barco - Infrarrojo cercano - Ecualización imagen completa.

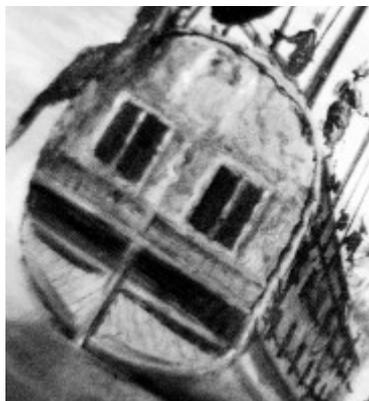


Figura 86: Barco - Infrarrojo cercano - Ecualización imagen recortada.

5. Conclusiones

En este trabajo se ha realizado una aplicación para la captura de imágenes multiespectrales, visualización y realce de características para el análisis de obras de arte.

Los experimentos han demostrado como el realce de características en imágenes multiespectrales facilitan el análisis de obras de arte.

Las transformaciones de LUT son útiles para el realce de zonas del rango dinámico de la profundidad de los píxeles.

La transformación de PCA es una herramienta que realza detalles allí donde la transformación de LUT y otras transformaciones más sencillas no consiguen un contraste suficiente para la visualización de detalles más difusos de la imagen.

Los resultados han sido los esperados, es decir, se ha creado una aplicación para la captura de imágenes multiespectrales, visualización y realce de características para el análisis de obras de arte. Se ha demostrado su funcionamiento y los resultados óptimos de las funciones implementadas. Los análisis de las obras de arte son ahora más fáciles de realizar con esta aplicación.

Personalmente el nivel de conocimientos que tenía se ha visto reforzado y aumentado durante la ejecución de este trabajo. Me he dado cuenta de que hay todo un mundo dentro del campo de visión por ordenador que desconocía y estoy seguro de que todavía hay mucho más. Ha sido una grata experiencia trabajar con el grupo de visión por ordenador. Ahora soy capaz de implementar aplicaciones de visión por ordenador y realce de características.

La aplicación que se ha desarrollado puede ampliarse a otras funciones de procesado y realce de imágenes multiespectrales. También se pueden mejorar las funciones de captura ampliando la aplicación para permitir el uso de otras DCAM.

ANEXO

Se ha creado un vídeo explicativo del funcionamiento de la aplicación, en el que se explica como:

- Abrir una imagen multiespectral
- Realzar una imagen multiespectral
- Obtener una imagen en falso color

Para poder ver el vídeo seguir este enlace:

http://youtu.be/q1b221m_NUY

Bibliografía

- [1] <http://es.mathworks.com/products/matlab/>
- [2] http://www.aprolink.jp/download/av/guppy/english/Guppy_TechMan_V7.1.0_en.pdf
- [3] https://es.wikipedia.org/wiki/Dispositivo_de_carga_acoplada
- [4] VariSpec™ Liquid Crystal Tunable Filters – User's Manual - October 2006 CRI
- [5] http://es.wikipedia.org/wiki/Espectro_electromagn%C3%A9tico
- [6] «EM Spectrum Properties es» de Crates. Original version in English by Inductiveload - Translation from English version. Disponible bajo la licencia Dominio público vía Wikimedia Commons - https://commons.wikimedia.org/wiki/File:EM_Spectrum_Properties_es.svg#/media/File:EM_Spectrum_Properties_es.svg
- [7] https://es.wikipedia.org/wiki/Espectro_visible
- [8] «Electromagnetic spectrum-es». Publicado bajo la licencia CC BY-SA 3.0 vía Wikimedia Commons - https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Electromagnetic_spectrum-es.svg#/media/File:Electromagnetic_spectrum-es.svg.
- [9] https://es.wikipedia.org/wiki/Radiaci%C3%B3n_infrarroja
- [10] «Infrared dog» de NASA/IPAC - http://coolcosmos.ipac.caltech.edu/image_galleries/ir_zoo/dog.html. Disponible bajo la licencia Dominio público vía Wikimedia Commons - https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Infrared_dog.jpg#/media/File:Infrared_dog.jpg
- [11] https://en.wikipedia.org/wiki/Multispectral_image
- [12] <https://de.wikipedia.org/wiki/DCAM>
- [13] http://en.wikipedia.org/wiki/Liquid_crystal_tunable_filter
- [14] https://es.wikipedia.org/wiki/Falso_color
- [15] https://es.wikipedia.org/wiki/Lookup_table
- [16] https://es.wikipedia.org/wiki/Ecualizaci%C3%B3n_del_histograma
- [17] https://es.wikipedia.org/wiki/An%C3%A1lisis_de_componentes_principales
- [18] http://www.vision.uji.es/BandSelectionTool_files/BandSelectionTool.htm
- [19] https://en.wikipedia.org/wiki/Region_of_interest
- [20] http://www.itc.nl/library/papers_2009/general/PrinciplesRemoteSensing.pdf
- [21] <http://math.ewha.ac.kr/~jylee/SciComp/dip-diml.yonsei/chap4-1.pdf>

(1) Visión por computador, fundamentos y métodos. Arturo de la Escalera, Prentice-Hall. Y Image Processing. The fundamentals. Maria Petrou and Panagiota Bosdogianni. Wiley, 1999.

(2 - 7) https://es.wikipedia.org/wiki/An%C3%A1lisis_de_componentes_principales