



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

# **ESTUDIO DE LA REPRESENTACIÓN 3D DE REGIONES DEL IRIS A PARTIR DE IMÁGENES DIGITALES BIDIMENSIONALES**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELÉCTRICO

**DIEGO BASTIAS GRUNWALD**

PROFESOR GUÍA  
CLAUDIO PÉREZ FLORES

MIEMBROS DE LA COMISIÓN  
PABLO ESTÉVEZ VALENCIA  
ALFREDO SCHNELL DRESEL

SANTIAGO DE CHILE

2016

## **ESTUDIO DE LA REPRESENTACIÓN 3D DE REGIONES DEL IRIS A PARTIR DE IMÁGENES DIGITALES BIDIMENSIONALES**

Actualmente se utilizan diversos métodos de reconocimiento de individuos mediante la biometría, es decir, identificando patrones de características físicas o de comportamiento. Específicamente la biometría basada en el iris es ampliamente usada en el mundo, por ejemplo en reconocimiento de ciudadanos o control fronterizo. Sin embargo, hoy en día se utilizan imágenes bidimensionales del iris para extraer la información de éste. En este trabajo se propone utilizar información tridimensional del iris, para lo que se construirá un modelo 3D a partir de un conjunto de imágenes bidimensionales del ojo.

En primer lugar, se realizó la construcción de un sistema de captura de imágenes bidimensionales del ojo desde diferentes ángulos, utilizando como hardware del sistema un computador, un computador de placa reducida Raspberry Pi y una cámara Raspberry Pi NoIR. Además, se diseñó e implementó una estructura de soporte que permite la toma de imágenes desde diferentes ángulos, con una iluminación y encuadre adecuados para enfocar el iris a corta distancia. El montaje experimental permitió además eliminar el reflejo de las fuentes luminosas sobre el iris.

Luego se tomaron 17 imágenes de un ojo, abarcando un arco de encuadre de 40°. A continuación se procesaron las imágenes capturadas para permitir la generación de modelos 3D. Se incluyó en el procesamiento: encuadre del iris, borrado de la pupila, ecualización del histograma y suavizado gaussiano. Fue posible determinar que la mejor secuencia para la construcción del modelo 3D incluyó *encuadre, suavizado gaussiano, borrado de pupila y ecualización*. Finalmente, se construyeron los modelos tridimensionales utilizando el software Python Photogrammetry Toolbox. Con el objetivo de mejorar los resultados se variaron parámetros de entrada del algoritmo, tales como, el número de imágenes y el CCD width (ancho del sensor de la cámara). De lo que se concluyó que con 6 imágenes y un CCD width igual a 3, se obtiene un modelo del iris bien formado en el que se aprecian texturas y patrones. Por otra parte, se analizó la capacidad de generalización del método, capturando y modelando 12 nuevos conjuntos de imágenes del iris. Concluyendo que el método funciona de forma parcial con conjuntos de imágenes nuevos, y por tanto debe ser mejorado en términos de su capacidad de generalización.

En base a la revisión bibliográfica se concluye que este es el primer sistema desarrollado que permite generar un modelo 3D del iris a partir de imágenes 2D de este. Los modelos resultantes pueden ser mejorados, ya que presentan ruido y este podría ser eliminado mediante la aplicación de un filtro gaussiano tridimensional, la utilización de un equipo fotográfico de mejores características, o el uso de múltiples cámaras.

## TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1	ANTECEDENTES .....	1
1.1.1	Biometría basada en Iris.....	1
1.1.1.1	Reconocimiento biométrico.....	1
1.1.1.2	Iris como patrón de reconocimiento.....	4
1.1.1.3	Problemas de oclusiones, ángulos y tridimensionalidad.....	5
1.1.2	Fotogrametría para el modelaje 3D.....	5
1.1.2.1	Métodos de modelaje 3D a partir de imágenes bidimensionales .....	6
1.1.2.2	Softwares de modelaje 3D a partir de imágenes bidimensionales .....	8
1.1.2.2.1	Python Photogrammetry Toolbox .....	8
1.1.2.2.2	ARC3D.....	8
1.1.2.2.3	Autodesk 123D Catch .....	8
1.1.2.3	Parámetros a considerar.....	9
1.1.2.4	Comparación de modelos 3D .....	9
1.1.3	Estado del Arte.....	9
1.1.3.1	Bases de imágenes y Adquisición de imagen del iris.....	9
1.1.3.2	Codificación y emparejamiento de textura.....	10
1.1.3.3	Modelamiento 3D.....	10
1.1.3.4	Modelamiento 3D de estructuras biométricas .....	10
1.2	Motivación .....	11
1.3	Hipótesis .....	11
1.4	Objetivos.....	11
1.4.1	Objetivo general .....	11
1.4.2	Objetivos específicos: .....	11
2	MARCO TEÓRICO .....	11
2.1	Procesamientos de imagen.....	12
2.1.1	Ecuación de histograma de imagen en escala de grises .....	12
2.1.2	Filtro Gaussiano 2D .....	12
3	DISEÑO, IMPLEMENTACIÓN Y RESULTADOS DEL SISTEMA DE MODELAMIENTO TRIDIMENSIONAL DEL IRIS.....	13
3.1	Sistema de adquisición de imágenes bidimensionales del iris.....	13

3.1.1	Hardware del sistema .....	14
3.1.1.1	Computador .....	15
3.1.1.2	Computador de placa reducida “ <i>Raspberry Pi 3 Model B</i> ” .....	15
3.1.1.3	Cámara “ <i>Raspberry Pi NoIR – Camera Board</i> ” .....	16
3.1.1.3.1	Modificación del enfoque Cámara Raspberry Pi .....	17
3.1.2	Estructura de toma de imágenes .....	17
3.1.2.1	Lente de realidad virtual .....	18
3.1.2.2	Estructura móvil para cámara .....	18
3.1.2.2.1	Base de Deslizamiento .....	19
3.1.2.2.2	Carcasa cámara .....	20
3.1.2.3	Circuito de luces LED .....	21
3.1.2.3.1	Arreglo de luces central .....	21
3.1.2.3.2	Luces laterales .....	22
3.1.3	Configuración del sistema .....	24
3.1.3.1	Configuración Raspberry Pi .....	24
3.1.3.2	Conexión SSH entre <i>Raspberry</i> y computador .....	24
3.1.3.3	Script de toma de imágenes .....	24
3.1.4	Adquisición de imágenes bidimensionales .....	25
3.1.4.1	Metodología toma de imágenes .....	25
3.1.4.1.1	Iniciación del sistema .....	25
3.1.4.1.2	Ejecución script de toma de imágenes .....	26
3.1.4.2	Resultados de toma de imágenes .....	26
3.2	Construcción de Modelo Tridimensional .....	27
3.2.1	Procesamiento de imágenes de Iris .....	27
3.2.1.1	Encuadrar el iris .....	28
3.2.1.2	Borrar pupila .....	28
3.2.1.3	Ecuilizar histograma imagen .....	29
3.2.1.4	Suavizado gaussiano de la imagen .....	29
3.2.1.5	Resultados Procesamientos .....	30
3.2.1.5.1	Encuadre .....	30
3.2.1.5.2	Encuadre y suavizado gaussiano .....	31
3.2.1.5.3	Encuadre, suavizado gaussiano y eliminación de pupila .....	31

3.2.1.5.4	Encuadre, suavizado gaussiano, eliminar pupila y ecualizar .....	32
3.2.2	Software de Modelamiento .....	32
3.2.2.1	Parámetros de entrada .....	32
3.2.2.1.1	Escala de la imagen .....	32
3.2.2.1.2	Ancho del sensor de la cámara (CCD width) .....	33
3.2.2.1.3	Número de imágenes .....	33
3.2.2.2	Parámetros de salida .....	33
3.2.2.2.1	Número de nubes de puntos preliminares .....	33
3.2.2.2.2	Número de puntos en el modelo .....	33
3.2.2.3	Variación del parámetro de entrada: Número de imágenes.....	33
3.2.3	Resultados del modelamiento 3D.....	34
3.2.3.1	Modelamiento de imágenes con <i>CCD width</i> original .....	34
3.2.3.2	Modelamiento de imágenes con diferentes <i>CCD width</i> .....	36
3.2.3.3	Modelamiento variando la cantidad de imágenes .....	41
3.3	Método resultante .....	47
3.3.1	Adquisición de imágenes del método resultante .....	47
3.3.2	Procesamiento de imágenes del método resultante .....	48
3.3.3	Modelamiento 3D del método resultante .....	48
4	VALIDACIÓN DEL MÉTODO .....	49
4.1	Validación con imágenes de Iris 1 .....	49
4.2	Validación con imágenes de Iris 2 .....	53
5	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	55
6	CONCLUSIONES.....	58
7	BIBLIOGRAFÍA .....	60
8	ANEXOS .....	63
Anexo A.	Modificación enfoque Cámara Raspberry Pi .....	63
Anexo B.	Guía de instalación Raspberry.....	63
Anexo C.	Pasos conexión SSH.....	64
Anexo D.	Script de toma de imágenes.....	65
Anexo E.	Resultados fotos cámara 1 .....	65
Anexo F.	Procesamiento Cámara 1 .....	67
Anexo G.	Script de eliminación de imágenes.....	71

Anexo H.	Resultados de los Modelos 3D obtenidos de las imágenes de la cámara 1 .....	73
H.1.	Modelamiento de imágenes con <i>CCD width</i> original .....	73
H.2.	Modelamiento de imágenes con diferentes <i>CCD width</i> .....	75
H.3.	Modelamiento variando la cantidad de imágenes.....	81
Anexo I.	Resultados de la Validación .....	82
I.1.	Conjuntos de imágenes Iris 1 .....	82
I.2.	Resultados variación <i>CCD width</i> Iris 1 .....	92
I.3.	Resultados variar combinaciones de imágenes Iris 1 .....	97
I.4.	Conjuntos de imágenes Iris 2.....	102
I.5.	Resultados variación <i>CCD width</i> Iris 2 .....	104
I.6.	Resultados variar combinaciones de imágenes Iris 2 .....	105

## ÍNDICE DE FIGURAS

Ilustración 1: Diagramas de bloques de las tareas de inscripción, verificación e identificación (Figura tomada de [1])......	3
Ilustración 2: Fotografía del iris. ....	4
Ilustración 3: Correspondencia de imágenes mediante correspondencias Locales y consistencia geométrica (imágenes tomadas de [17])......	6
Ilustración 4: Proyección tridimensional para encontrar orientación de la cámara (ilustración tomada de [17])......	7
Ilustración 5: triangulación de los puntos correspondientes entre las imágenes tomadas por las diferentes cámaras(tomada de [17]). ....	7
Ilustración 6: Clasificación de Voxels mediante cálculo de profundidades, triangulando las vistas de las cámaras (imagen tomada de[18]). ....	8
Ilustración 7: Imagen $f(x,y)$ y su respectivo histograma $H(f)$ .....	12
Ilustración 8: Filtros Gaussianos de 3x3 y 7x7 (imagen obtenida de [38])......	13
Ilustración 9: Componentes del sistema de adquisición de imágenes bidimensionales del iris ....	14
Ilustración 10: Esquema del hardware del sistema de toma de imágenes. ....	15
Ilustración 11: Computador de placa reducida Raspberry Pi 3 Model B, utilizado para controlar cámara Raspberry Pi.....	15
Ilustración 12: Cámara Raspberry Pi NoIR v1.3.....	17
Ilustración 13: Cámara Raspberry Pi NoIR v2.1 .....	17
Ilustración 14: Lentes de realidad virtual. ....	18
Ilustración 15: Impresión 3D y modelo de estructura móvil.....	19

Ilustración 16: Componentes y ensamblaje de estructura móvil. ....	19
Ilustración 17: Impresión 3D y modelo de base de deslizamiento. ....	20
Ilustración 18: Impresión 3D y modelo de carcasa de cámara (imagen de la derecha obtenida de [41]). ....	20
Ilustración 19: Esquema de circuito eléctrico de iluminación. ....	21
Ilustración 20: Placa de circuito de iluminación. ....	22
Ilustración 21: Sistema de iluminación. ....	22
Ilustración 22: Estructura de toma de imágenes. ....	23
Ilustración 23: Sistema de adquisición de imágenes. ....	24
Ilustración 24: Sistema de adquisición de imágenes equipado en persona. ....	25
Ilustración 25: Ejemplo de imágenes tomadas con cámara 2 luz infrarroja y blanca lateral. ....	27
Ilustración 26: Ejemplo de encuadre del iris en imagen 2D. ....	28
Ilustración 27: Ejemplo eliminación de la pupila que contiene la reflexión de fuentes luminosas. ....	29
Ilustración 28: Ejemplo ecualizar imagen de Iris 2D. ....	29
Ilustración 29: Ejemplo suavizar imagen con filtro gaussiano de 10x10. ....	30
Ilustración 30: Encuadre cámara 2 para centrar la imagen en el iris. ....	30
Ilustración 31: Encuadre y suavizado gaussiano de una imagen tomada con la cámara 2. ....	31
Ilustración 32: Encuadre, suavizado gaussiano y eliminación de la pupila para una imagen capturada con la cámara 2. ....	31
Ilustración 33: Encuadre, suavizado gaussiano, eliminación de la pupila y ecualizado de la imagen capturada con la cámara 2. ....	32
Ilustración 34: Modelo 3D ruidoso del ojo sin procesamiento desde 3 ángulos diferentes. ....	35
Ilustración 35: Modelo ruido cono desde 3 ángulos diferentes. ....	36
Ilustración 36: Modelo de sección del iris con ruido cono. En (a) se muestra el modelo frontalmente. En (b) se muestra el modelo frontalmente con acercamiento a la zona del iris. En (c) se muestra el modelo lateralmente donde solo se aprecia el ruido cono. ....	40
Ilustración 37: Modelo 1/2 iris con ruido cono. En (a) y (b) se muestra la cara frontal del modelo, donde se ve la mitad del iris, desde diferentes ángulos. En (c) se muestra el modelo desde la cara lateral donde solo se ve ruido cono. ....	43
Ilustración 38: Modelo 1/2 iris ruidoso. En (a) se muestra el modelo desde la parte baja del iris. En (b) se muestra desde un ángulo lateral izquierdo. En (c) se muestra desde un ángulo derecho. ....	44
Ilustración 39: Modelo 3/4 iris ruidoso. En (a) y (b) se muestra el modelo del iris desde el frente. En (c) se muestra el modelo desde el lado donde se aprecia el ruido. ....	44
Ilustración 40: Modelo 3/4 iris desde diferentes ángulos con 1/4 del iris ruidoso. ....	45
Ilustración 41: Modelo iris. En (a) y (b) se muestra el modelo frontalmente donde se aprecian las texturas. En (c) se muestra el modelo lateralmente donde se aprecia la forma del iris. ....	46
Ilustración 42: Menor conjunto de imágenes 2D que permiten generar un modelo del iris en 3D. ....	46
Ilustración 43: Características del sistema de adquisición de imágenes utilizadas en el método resultante. ....	48
Ilustración 44: Combinación de procesamientos de imágenes utilizada en el método resultante. ....	48

Ilustración 45: Metodología de variación de parámetros para el modelamiento 3D.....	49
Ilustración 46: Ejemplo imagen del Iris 1 para validación, sin procesamientos. ....	50
Ilustración 47: Ejemplo imagen del Iris 1 para validación, con encuadre, suavizado, borrar pupila y ecualizado. ....	50
Ilustración 48: Ejemplo imagen del Iris 2 para validación, sin procesamientos. ....	53
Ilustración 49: Ejemplo imagen del Iris 2 para validación, con encuadre, suavizado, borrar pupila y ecualizado. ....	53
Ilustración 50: Modelo ruidoso Iris 2. En (a) se muestra el modelo desde la izquierda mostrando el ruido existente. En (b) se muestra el modelo frontalmente donde se aprecian algunos patrones del iris. En (c) se muestra el iris desde la derecha, mostrando la forma de iris. ....	55
Ilustración 51: Modelo 3/4 ruidoso Iris 2. En (a) se ve el modelo lateralmente, se muestra el ruido existente en este. En (b) se muestra el modelo frontalmente y se aprecia que en el centro de este se muestran la textura del iris. En (c) se muestra el modelo ligeramente inclinado. ....	55
Ilustración 52: Llaves para modificar enfoque (imágenes obtenidas en [42]). ....	63
Ilustración 53: Conexión cable cámara Raspberry Pi (imagen obtenida en [46]). ....	64
Ilustración 54: Imágenes cámara 1 iluminación blanca e infrarroja. ....	66
Ilustración 55: Imágenes cámara 1 iluminación infrarroja. ....	67
Ilustración 56: Ecualización cámara 1. ....	68
Ilustración 57: Encuadre cámara 1. ....	68
Ilustración 58: Encuadre y ecualización cámara 1. ....	69
Ilustración 59: Encuadrar y borrar pupila cámara 1. ....	69
Ilustración 60: Encuadrar, borrar pupila y ecualizar cámara 1. ....	70
Ilustración 61: Encuadrar, ecualizar y borrar pupila cámara 1. ....	70
Ilustración 62: Encuadrar, suavizar, borrar pupila y ecualizar cámara 1. ....	71
Ilustración 63: Modelo iris ruidoso. ....	79
Ilustración 64: Conjunto de imágenes de validación iris 1_1. ....	82
Ilustración 65: Conjunto de imágenes de validación iris 1_2. ....	83
Ilustración 66: Conjuntos de imágenes de validación iris 1_3. ....	84
Ilustración 67: Conjuntos de imágenes de validación iris 1_4. ....	85
Ilustración 68: Conjuntos de imágenes de validación iris 1_5. ....	86
Ilustración 69: Conjuntos de imágenes de validación iris 1_6. ....	87
Ilustración 70: Conjuntos de imágenes de validación iris 1_7. ....	88
Ilustración 71: Conjuntos de imágenes de validación iris 1_8. ....	89
Ilustración 72: Conjuntos de imágenes de validación iris 1_9. ....	91
Ilustración 73: Conjuntos de imágenes de validación iris 1_10. ....	91
Ilustración 74: Conjunto de imágenes de validación iris 2_1. ....	102
Ilustración 75: Conjunto de imágenes de validación iris 2_2. ....	103

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Especificaciones de computador de placa reducida Raspberry Pi 3 Model B. ....	16
Tabla 2: Especificaciones técnicas de las Cámaras Raspberry Pi NoIR v1.3 y v2.1. ....	17



Tabla 3: Resultados del número de puntos y número de nubes con CCD width original sin y con procesamiento.....	35
Tabla 4: Resultados Imágenes sin procesamiento con diferentes CCD Width. ....	37
Tabla 5: Resultados Imágenes con encuadre diferentes CCD Width.....	38
Tabla 6: Resultados Imágenes con encuadre y suavizado diferentes para distintos valores de CCD Width. ....	38
Tabla 7: Resultados Imágenes con encuadre, suavizado y borrar pupila para diferentes CCD Width. ....	39
Tabla 8: Resultados de Imágenes con encuadre, suavizado, borrar pupila y ecualizado para diferentes valores de CCD Width.....	40
Tabla 9: Resultados en número de puntos y nubes al eliminar imágenes con encuadre, suavizado, borrar pupilas y ecualizado con CCD width 3.....	42
Tabla 10: Modelos que entregaron la mejor descripción del modelo o mayor cantidad de puntos, al variar el CCD width para cada conjunto de validación del Iris 1.....	51
Tabla 11: Modelos con mejor descripción de modelos de cada conjunto de validación del Iris 1. ....	52
Tabla 12: Modelos que entregaron la mejor descripción del modelo o mayor cantidad de puntos, al variar el CCD width para cada conjunto de validación del Iris 2.....	54
Tabla 13: Modelos con mejor descripción de modelos de cada conjunto de validación del Iris 2. ....	54
Tabla 14: Resultados cámara 1 IR con CCD width original. ....	74
Tabla 15: Resultados cámara 1 IR + Blanca con CCD width original. ....	74
Tabla 16: Resultados cámara 1 IR con encuadre con diferentes CCD width.....	75
Tabla 17: Resultados cámara 1 IR blanca con encuadre con diferentes CCD width. ....	75
Tabla 18: Resultados cámara 1 IR con encuadre y ecualizado con diferentes CCD width.....	76
Tabla 19: Resultados cámara 1 IR + blanca con encuadre y ecualizado con diferentes CCD width. ....	76
Tabla 20: Resultados cámara 1 IR con encuadre y borrar pupila con diferentes CCD width. ....	77
Tabla 21: Resultados cámara 1 IR + blanca con encuadre y borrar pupila con diferentes CCD width. ....	77
Tabla 22: Resultados cámara 1 IR con encuadre, borrar pupila y ecualizado con diferentes CCD width. ....	77
Tabla 23: Resultados cámara 1 IR +blanca con encuadre, borrar pupila y ecualizado con diferentes CCD width.....	78
Tabla 24: Resultados cámara 1 IR con encuadre, ecualizado y borrar pupila con diferentes CCD width. ....	78
Tabla 25: Resultados cámara 1 IR + blanca con encuadre, ecualizado y borrar pupila con diferentes CCD width.....	79
Tabla 26: Resultados cámara 1 IR con encuadre, suavizado, ecualizado y borrar pupila con diferentes CCD width. ....	80
Tabla 27: Resultados cámara 1 IR + blanca con encuadre, suavizado, ecualizado y borrar pupila con diferentes CCD width. ....	80

Tabla 28: Resultados eliminación de imágenes cámara 1 IR con encuadre, ecualizado y borrar pupila con CCD width 4,7. ....	81
Tabla 29: Resultados eliminación de imágenes cámara 1 IR + blanca con encuadre, ecualizado y borrar pupila con CCD width 2,5. ....	81
Tabla 30: Resultados variar combinaciones CCD width, en el conjunto de imágenes de validación iris 1_1. ....	92
Tabla 31: Resultados variar combinaciones CCD width, en el conjunto de imágenes de validación iris 1_2. ....	92
Tabla 32: Resultados variar combinaciones CCD width, en el conjunto de imágenes de validación iris 1_3. ....	93
Tabla 33: Resultados variar combinaciones CCD width, en el conjunto de imágenes de validación iris 1_4. ....	93
Tabla 34: Resultados variar combinaciones CCD width, en el conjunto de imágenes de validación iris 1_5. ....	94
Tabla 35: Resultados variar combinaciones CCD width, en el conjunto de imágenes de validación iris 1_6. ....	94
Tabla 36: Resultados variar combinaciones CCD width, en el conjunto de imágenes de validación iris 1_7. ....	95
Tabla 37: Resultados variar combinaciones CCD width, en el conjunto de imágenes de validación iris 1_8. ....	95
Tabla 38: Resultados variar combinaciones CCD width, en el conjunto de imágenes de validación iris 1_9. ....	96
Tabla 39: Resultados variar combinaciones CCD width, en el conjunto de imágenes de validación iris 1_10. ....	96
Tabla 40: Resultados variar combinaciones de imágenes, en el conjunto de imágenes de validación iris 1_1. ....	97
Tabla 41: Resultados variar combinaciones de imágenes, en el conjunto de imágenes de validación iris 1_2. ....	97
Tabla 42: Resultados variar combinaciones de imágenes, en el conjunto de imágenes de validación iris 1_3. ....	98
Tabla 43: Resultados variar combinaciones de imágenes, en el conjunto de imágenes de validación iris 1_4. ....	98
Tabla 44: Resultados variar combinaciones de imágenes, en el conjunto de imágenes de validación iris 1_5. ....	99
Tabla 45: Resultados variar combinaciones de imágenes, en el conjunto de imágenes de validación iris 1_6. ....	99
Tabla 46: Resultados variar combinaciones de imágenes, en el conjunto de imágenes de validación iris 1_7. ....	100
Tabla 47: Resultados variar combinaciones de imágenes, en el conjunto de imágenes de validación iris 1_8. ....	100
Tabla 48: Resultados variar combinaciones de imágenes, en el conjunto de imágenes de validación iris 1_9. ....	100

Tabla 49: Resultados variar combinaciones de imágenes, en el conjunto de imágenes de validación iris 1_10. ....	101
Tabla 50: Resultados variar combinaciones CCD width, en el conjunto de imágenes de validación iris 2_1. ....	104
Tabla 51: Resultados variar combinaciones CCD width, en el conjunto de imágenes de validación iris 2_2. ....	104
Tabla 52: Resultados variar combinaciones de imágenes, en el conjunto de imágenes de validación iris 2_1. ....	105
Tabla 53: Resultados variar combinaciones de imágenes, en el conjunto de imágenes de validación iris 2_2. ....	105

# 1 INTRODUCCIÓN

El presente trabajo se enmarca en investigar mejoras de las tecnologías para el reconocimiento de individuos, particularmente en la biometría basada en el iris. Aquí se estudia un novedoso enfoque para la extracción de información del iris, utilizando la fotogrametría para la obtención de modelos tridimensionales y nuevas tecnologías para la toma de imágenes del iris. Se introducirán temas como la biometría basada en el iris, las dificultades que enfrenta en la actualidad, la fotogrametría y el estado del arte con respecto a este enfoque de biometría.

## 1.1 ANTECEDENTES

### 1.1.1 Biometría basada en Iris

#### 1.1.1.1 Reconocimiento biométrico

Muchos sistemas requieren reconocer a un individuo de forma segura de manera de confirmar o determinar la identidad de una persona. El objetivo de estos métodos es asegurar que quien intenta acceder a un servicio es el legítimo usuario y no un impostor. Algunos ejemplos de los sistemas que requieren de estos métodos serían edificios, celulares, computadores portátiles y cajeros automáticos [1]. Es en este contexto en que se hace uso de la biometría: “Biometría es la ciencia y la tecnología dedicada a medir y analizar datos biológicos. En el terreno de la tecnología de la información, la biometría hace referencia a las tecnologías que miden y analizan las características del cuerpo humano, como el ADN, las huellas dactilares, la retina y el iris de los ojos, los patrones faciales o de la voz y las medidas de las manos a efectos de autenticación de identidades”[2].

En la misma línea se tiene el reconocimiento biométrico, el cual trata sobre el reconocimiento automático de una persona basado en sus características físicas o de comportamiento. La idea es reconocer a las personas según “quien es” y no “que posee” o “que recuerda” [1].

De esta forma la biometría es un término que puede ser usado ya sea para hablar de características o de un proceso [3]:

- Característica: Una característica biológica medible que puede ser usada para reconocimiento automático.
- Proceso: Métodos de reconocimiento automático para reconocer a un individuo según características biológicas medibles.

Para el desarrollo de un método de reconocimiento biométrico es necesario escoger características biométricas adecuadas, es por esto que se deben tener en cuenta los siguientes requerimientos:

- Universalidad: Cada persona debe tener esta característica.

- Distinción: Cualquier par de personas debería ser lo suficientemente diferente en términos de esta característica.
- Permanente: la característica debe ser lo suficientemente invariante sobre un cierto periodo de tiempo.
- Medible: La característica puede ser medida de forma cuantitativa.

Por otra parte para fines prácticos se deben tener en cuenta otras consideraciones como la precisión, velocidad y recursos computacionales utilizados por el sistema. También se debe considerar que el sistema pueda tomar las características de forma inofensiva, que sea aceptado por los usuarios y que sea robusto contra fraudes.[4]

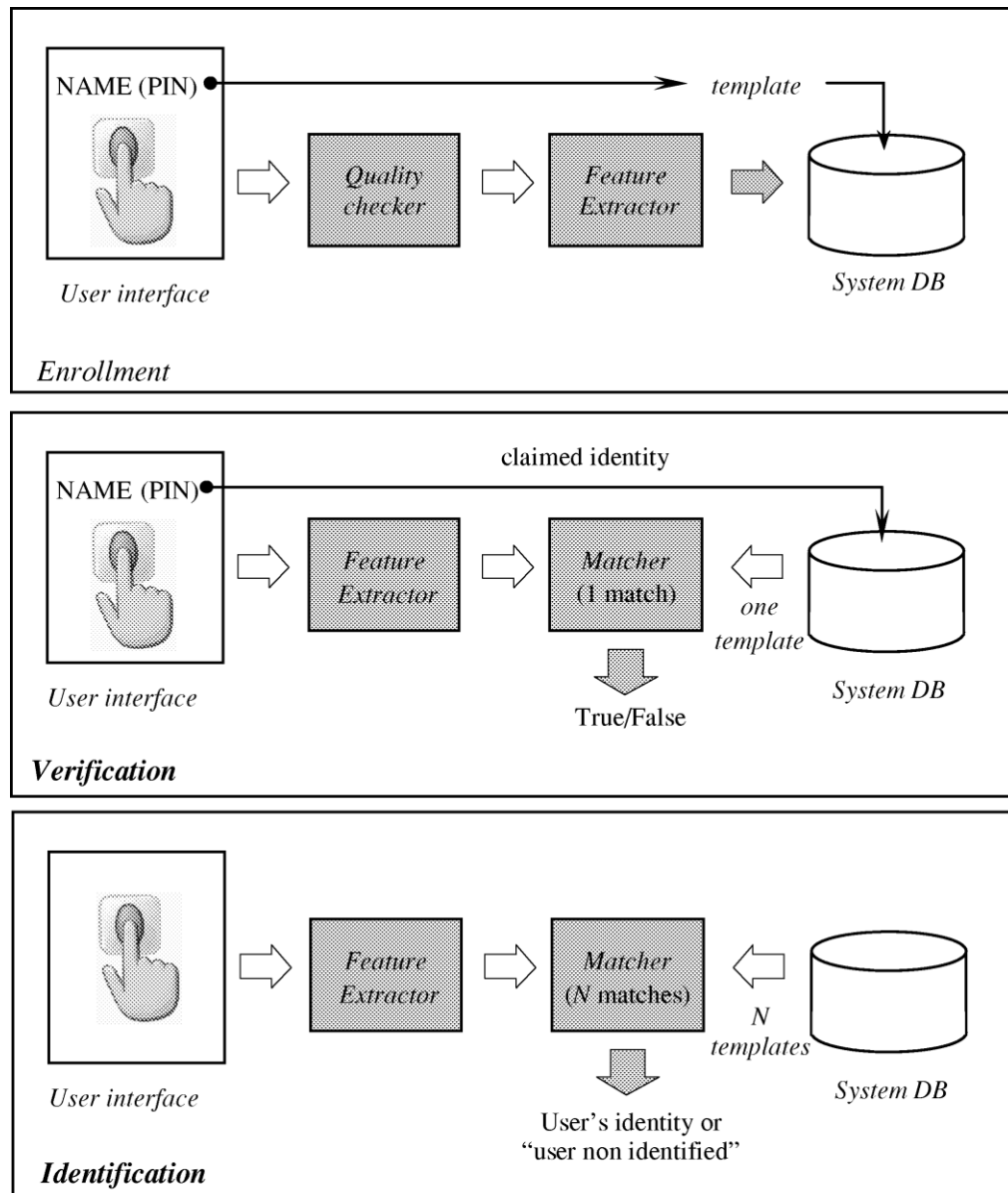
Más específicamente un sistema de reconocimiento biométrico es un reconocedor de patrones de las características físicas o de comportamiento de un sujeto. El proceso de reconocimiento se puede dividir en las siguientes etapas [5]:

- Adquisición de Datos: ya sea la obtención de una imagen, un scanner o el tipo de medición necesario para el tipo de biometría a utilizar.
- Pre-procesamiento: se realizan los procesamientos previos necesarios para la obtención de características (Ejemplo: detección de líneas en el scanner de una huella digital).
- Extracción de características: Se extraen las características a utilizar y se construye un vector de características.
- Calce de patrones: se realizan comparaciones entre los vectores de características y se decide si es que provienen de la misma persona o no.
- Almacenamiento de Datos: Se guardan los datos conseguidos para futuras comparaciones.

Por otra parte dependiendo de la aplicación de los sistemas de reconocimiento biométrico estos pueden ser usados como verificadores o identificadores:

- Verificador: Caso donde un usuario dice ser una persona y esto debe ser verificado por el sistema de reconocimiento. En este caso la comparación realizada entre los vectores de características es uno a uno y solo se debe decidir si la distancia de la comparación realizada entre el vector guardado en la base de datos y el nuevo es lo suficiente pequeña para considerarse la misma persona. (Ejemplo: Sistemas de seguridad donde primero se utiliza un tarjeta de identificación y luego un sistema biométrico como huella dactilar, iris u otro) [1].
- Identificador: Caso en el que la única información que se tiene sobre el usuario son los datos biométricos obtenidos por el sistema y se debe decidir que usuario es el que intenta acceder. Para este caso se tienen dos posibles escenarios, el primero donde se asume que el usuario que está accediendo ya está en la base de datos y solo se debe indicar que usuario es el que ingresa. Este tipo de situaciones se da cuando es importante saber quién ingresa al sistema pero no si quien intenta ingresar es externo a la base de datos, en este caso la comparación se realiza entre el usuario que ingresa contra toda la base de datos y se entrega como usuario identificado el que tiene la menor distancia de comparación (ejemplo: Sistema de control de hora de ingreso de empleados). El otro escenario es cuando es necesario identificar pero sin saber si el usuario es parte de la base de datos, en este caso se debe realizar la comparación de un usuario contra toda la base de datos y la decisión a tomar

es si el usuario es parte de la base de datos y que usuario es el que está accediendo (ejemplo: Sistema de seguridad que solo cuenta con sistema de biometría)[1, 3].



**Ilustración 1: Diagramas de bloques de las tareas de inscripción, verificación e identificación** (Figura tomada de [1]).

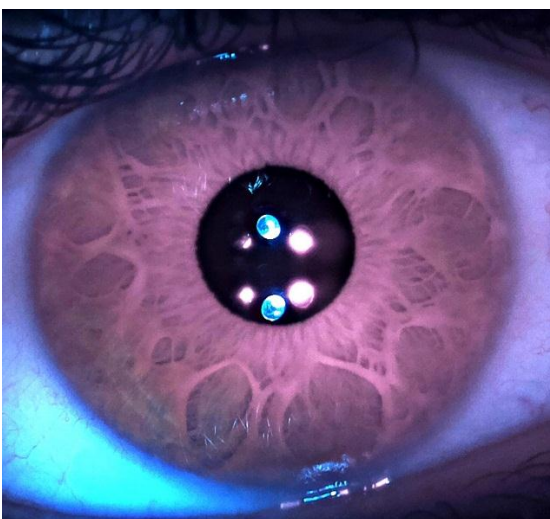
Como se ve en la Ilustración 1, un típico sistema biométrico está compuesto por 5 componentes: un sensor usado para adquirir los datos y convertir la información a formato digital.

Un algoritmo de procesamiento de señal que extrae las características y crea los *templates*<sup>1</sup>. Un componente de almacenamiento de datos que guarda la información con la que los nuevos *templates* biométricos serán comparados. Un algoritmo de calces que compara los nuevos *templates* con uno o más de los *templates* en el almacenador de datos. Y finalmente un proceso de decisión que usa los resultados de los calces para llegar a una decisión a nivel del sistema [3].

### 1.1.1.2 Iris como patrón de reconocimiento

El iris (*Ilustración 2*) es la parte coloreada del ojo, está constituido por venas, tejido conectivo, melanocitos y otras células pigmentadas que son las responsables del coloreado del iris. El iris es la estructura que separa la cámara interna del ojo de la cámara exterior, además contiene músculos que le permiten contraerse y expandirles dejando pasar más o menos luz al interior del ojo [6, 7].

Sus complejos patrones pueden contener muchas características distintivas como pueden ser, ligamentos arqueados, surcos, crestas, anillos, coronas, pecas y collar zigzagueante [8].



*Ilustración 2: Fotografía del iris.*

<sup>1</sup> Templates: plantilla que contiene las características procesadas de tal modo que luego puedan ser comparadas con otras plantillas.

El iris (Ilustración 2) es una estructura con una gran variabilidad matemática entre persona y persona, la distribución de variación de *secuencia de fase*<sup>2</sup> entre diferentes ojos es binomial y con 244 grados de libertad. Esta variabilidad estadística corresponde a una densidad de entropía del iris es de  $3,2\text{bitsmm}^{-2}$ [9]. En términos más prácticos esto implica que la probabilidad de que un ojo por casualidad comparta la misma secuencia de fase que otro en un 70% es de uno entre 7 billones [10].

Por otra parte el iris es una estructura interna aunque visible externamente, es por eso que está bien protegido del medio ambiente y es bastante estable en el tiempo [8].

Actualmente el reconocimiento de personas basado en iris es utilizado en diferentes aplicaciones alrededor del mundo, en India se utiliza como un método de identificación de sus ciudadanos[11], en los Emiratos Árabes es utilizado como un medio de control de frontera para no permitir la entrada de exiliados[12] y en Londres y Amsterdam se utiliza como forma de acelerar el paso por el control de fronteras[11].

### **1.1.1.3 Problemas de oclusiones, ángulos y tridimensionalidad**

En las imágenes que se toman del iris existen diversos tipos de ruidos que ocuyen la verdadera textura del iris como: parpados, pestañas, sombras o reflejos de luz [8, 13].

Por otra parte existen desafíos relacionados con el ángulo de la toma de fotografía, en primer lugar se tiene que al tomar la fotografía con un ángulo que no sea completamente frontal existen zonas del iris que quedaran más alejadas y otras más cercanas produciendo que el enfoque en estas zonas no sea perfecto y por lo tanto viéndose borroso [14]. Otro aspecto a considerar es el efecto *Limbus* [15], el cual corresponde a una oclusión de los bordes del iris por la membrana semi-transparente llamada limbo, este efecto se acentúa con ángulos no frontales. Finalmente se tiene que la refracción de luz producida por la córnea varía según el ángulo de toma de fotografía creando una distorsión en la imagen del iris [14, 15].

Otro aspecto importante a tener en consideración es el hecho de que el iris es tridimensional, tiene surcos y rugosidades, luego dependiendo del ángulo de que se tome la imagen del iris se obtendrán diferentes vistas de la estructura [14, 15].

### **1.1.2 Fotogrametría para el modelaje 3D**

La Fotogrametría es la ciencia de obtener información a través de imágenes [16], existen diversas aplicaciones en las que se utiliza la fotogrametría, como la obtención de mapas, dibujos, mediciones, pero la que interesa para este trabajo es el modelaje 3D. Los modelos 3D que se

<sup>2</sup> Secuencia de fase se refiere a los patrones del iris que son detectados por los algoritmos de codificación.

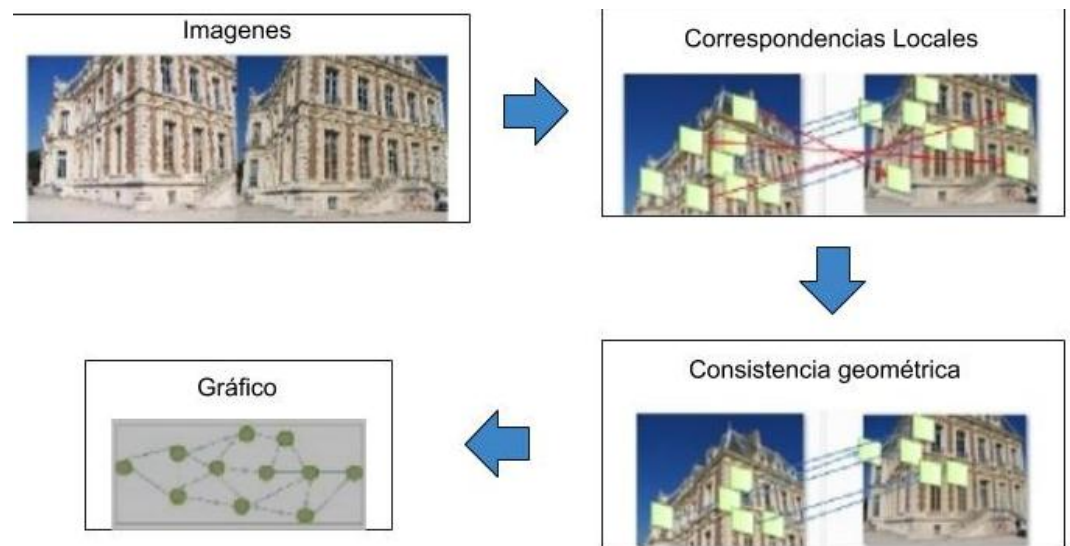


obtienen al aplicar este método, son nubes de puntos en el espacio, estos puntos forman la representación del objeto que se desea modelar.

### 1.1.2.1 Métodos de modelaje 3D a partir de imágenes bidimensionales

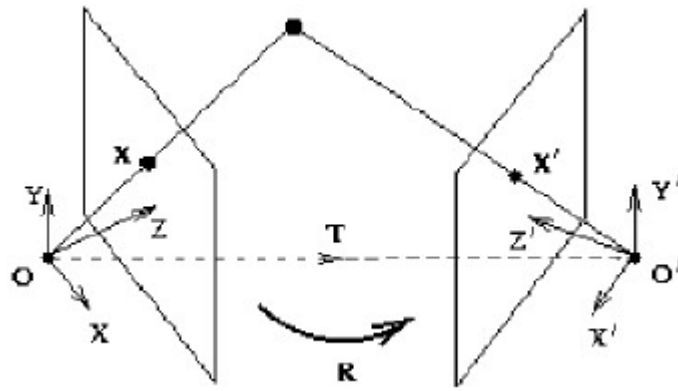
Existen diversos métodos para realizar modelaje 3D a partir de imágenes bidimensionales, algunos de estos son:

- 1) Con estimación de posición cámara [17]: Este método consta de 4 pasos:
  - a. Correspondencia de imágenes (*Ilustración 3*): se calculan descriptores locales de la imagen (como puntos SIFT o SURF), se encuentran las mejores correspondencias entre los descriptores locales y se revisa la consistencia geométrica de las correspondencias. Una vez que se encuentran las correspondencias correctas entre imágenes se construye un gráfico geométrico.



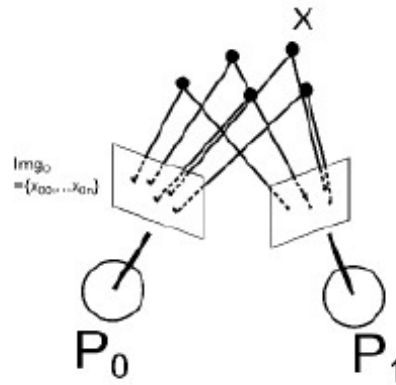
*Ilustración 3: Correspondencia de imágenes mediante correspondencias Locales y consistencia geométrica (imágenes tomadas de [17]).*

- b. Estimación posición de la cámara: Para estimar la posición de la cámara se debe resolver el problema de estimación de posición relativa. La estimación de posición relativa consiste en estimar la traslación y rotación que existe entre dos cámaras. Para conseguir esto se calcula la matriz esencial mediante regresiones lineales de los puntos correspondientes entre las imágenes (al menos 5). Otro método es la proyección tridimensional de los puntos correspondientes entre las imágenes como se muestra en la Ilustración 4, de forma de encontrar la orientación de forma geométrica.



**Ilustración 4: Proyección tridimensional para encontrar orientación de la cámara** (ilustración tomada de [17]).

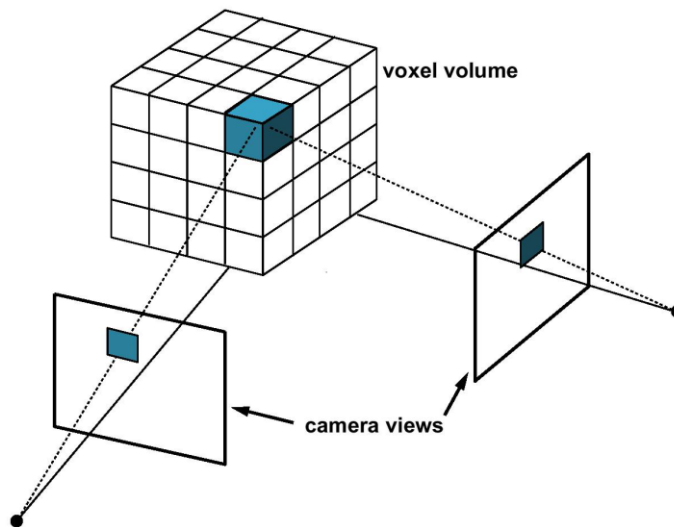
- c. Estimación representación 3D: una vez que se tiene la estimación de la orientación de las cámaras se comienzan a agregar los puntos de cada una en una escena 3D de forma acumulativa. Se realizan triangulaciones (*Ilustración 5*) entre los puntos y se utilizan los parámetros de las cámaras como distancia focal y ancho del sensor para conseguir esto.



**Ilustración 5: triangulación de los puntos correspondientes entre las imágenes tomadas por las diferentes cámaras**(tomada de [17]).

- 2) Voxels [18]: En este método el espacio que contiene el objeto o escena a ser reconstruido es dividido de forma equidistante por pequeños cubos denominados voxels como se ve en la Ilustración 6. Luego se determina voxel a voxel si este pertenece a un objeto o si es transparente. Mientras más fina es la discretización de los voxels se obtiene un resultado más exacto.

Para determinar si un voxel pertenece o no a un objeto se utiliza las múltiples vistas de la cámara y el cálculo de profundidad de estas. El cálculo de profundidad de las cámaras se consigue a través de la triangulación geométrica de los puntos correspondientes de las diferentes cámaras.



*Ilustración 6: Clasificación de Voxels mediante cálculo de profundidades, triangulando las vistas de las cámaras (imagen tomada de[18]).*

- 3) También existen métodos de modelamiento para estructuras más específicas como modelamiento de rostros humanos[18] y modelamiento de figuras humanas [19].

### **1.1.2.2 Softwares de modelaje 3D a partir de imágenes bidimensionales**

Existen diversos softwares para el modelaje 3D a partir de imágenes bidimensionales, a continuación se enumeran algunos y se dará una breve reseña sobre estos:

#### **1.1.2.2.1 Python Photogrammetry Toolbox**

Software abierto programado en Python utilizado ampliamente para la documentación de objetos arqueológicos [20]. La reconstrucción 3D realizada por este software consiste en realizar correspondencia entre sub-imágenes de dos imágenes, estimar la posición relativa de las cámaras según puntos anclas encontrados en el paso previo y estimar una representación 3D densa según las múltiples vistas de las imágenes[17]. Este tipo de algoritmo puede funcionar incluso con imágenes de diferentes cámaras tomadas en diferentes momentos [21].

#### **1.1.2.2.2 ARC3D**

Este software trabaja en servidores remotos, el usuario debe subir las imágenes de las que se desea obtener un modelo y el servidor responde con el modelo vía email. La reconstrucción 3D que realiza este software se basan en auto calibrar, detección y correspondencias de puntos característicos, reconstrucción densa de puntos multi-stereo y generación de nubes de puntos[22]. Por otra parte este software funciona mejor en artefactos y con un zoom, lente y luz consistente para todas las imágenes [21].

#### **1.1.2.2.3 Autodesk 123D Catch**

Este software utiliza fotogrametría para crear modelos 3D desde múltiples imágenes tomadas por el usuario. El proceso de modelamiento se realiza mediante la unión automática de las imágenes con estructuras visuales parecidas y luego pidiéndole al usuario que conecte los puntos

que no pudieron ser determinados por el software. Este software funciona mejor con lentes amplios (20, 24 o 28 mm) y con la misma cámara y zoom para todo el proyecto [21].

### **1.1.2.3 Parámetros a considerar**

Para todo modelamiento en 3D es importante tomar en consideración los parámetros de la cámara que se utilizará. Los diversos métodos de obtención de modelos 3D a partir de imágenes bidimensionales, son afectados por parámetros con los que se tomaron las imágenes, por ejemplo, la distancia focal, la distorsión producida por el enfoque de la cámara y el tamaño del sensor de la cámara [17, 22].

### **1.1.2.4 Comparación de modelos 3D**

En algunos casos es necesario identificar modelos 3D, para estos casos existen diversos métodos de comparación, como son:

- Calcular las diferencias entre los modelos utilizando como medida la *impureza de la entropía* [23].
- Comparar vectores de características con características basadas en esferas concéntricas que describen el modelo 3D [24].
- Comparar el mapa de profundidad de un objeto contra modelos 3D de una base de datos [25].

## **1.1.3 Estado del Arte**

Existen diversos campos de estudio relacionados con la clasificación del iris como: Bases de imágenes y adquisición de imagen del iris, segmentación del iris, codificación y emparejamiento de texturas, Multi-biometrías relacionadas con el iris, privacidad y seguridad, y desempeño bajo condiciones adversas [11].

En este caso es de interés saber el estado del arte de los siguientes temas; bases de imágenes y adquisición de imágenes, codificación y emparejamiento de texturas, modelamiento 3D y modelamiento 3D de estructuras biométricas enfatizando el iris.

### **1.1.3.1 Bases de imágenes y Adquisición de imagen del iris**

Existen diversos factores que deben ser tomados en consideración para la adquisición de imágenes del iris, algunos de estos son: la iluminación, la distancia de toma de la imagen, la resolución de la cámara y el ángulo del iris.

En la actualidad, por lo general se utiliza la iluminación cercana a la infrarroja para la toma de imágenes de iris, ya que esta ayuda a que incluso en ojos muy oscuros la textura del iris sea visible [8].

Por otra parte, uno de los problemas que se está abordando hoy en día en cuanto a la adquisición de imágenes es la toma de imágenes en escenarios menos controlados. Es decir a cierta distancia (sobre los 30 cm) [26, 27], con personas en movimiento y con luz natural en vez de infrarroja [27].

Las bases de imágenes que se pueden encontrar en la red suelen ser de imágenes con luz infrarroja de iris mirados de frente [28–30].

También existen bases de imágenes con escenarios más realistas pero más difícil de realizar reconocimiento como con luz visible, o imágenes ruidosas [31].

### **1.1.3.2 Codificación y emparejamiento de textura**

Existen diversos métodos de codificación de Iris como la comparación de histogramas, el análisis de texturas o la desarrollada por Wildes [32], pero el algoritmo más ampliamente utilizado y en el que se basan la mayoría de los sistemas de reconocimiento de iris hasta el día de hoy, es el de Daugman [11].

El algoritmo de codificación de Daugman consiste en los siguientes pasos [8]:

- 1) Pre-procesamiento: Se realizan algoritmos de estiramiento de histograma y mejora del contraste, de forma de conseguir una imagen donde la textura del iris se vea de forma más clara.
- 2) Transformación a coordenadas polares: para los siguientes pasos se requiere que la imagen del iris sea rectangular en vez de circular por lo que se realiza una transformación a coordenadas polares de la imagen.
- 3) Caracterización mediante 2D Gabor Wavelets: Una vez que se tiene una imagen del iris rectangular con texturas claras se procede a aplicar el filtro de Gabor y extraer características de la textura del iris.

Luego de la codificación viene la etapa de emparejamiento donde se calculan las distancias entre los vectores de características y donde se decide si existe una pareja. La decisión es tomada dependiendo si la distancia es mayor a un cierto umbral que debe ser definido.

### **1.1.3.3 Modelamiento 3D**

El modelamiento 3D en base a imágenes bidimensionales es un área en desarrollo y perfeccionamiento, este tipo de tecnología es atractiva dado que se pueden conseguir modelos tridimensionales sin más herramientas que una cámara y utilizar estos modelos en aplicaciones como monitores 3D o impresoras 3D [33].

Hoy en día se ha perfeccionado esta tecnología para la toma de modelos 3D de personas [17, 19, 34] y la documentación de objetos arqueológicos [20]. La utilización de esta tecnología para toma de objetos con texturas más complejas como el iris no ha sido documentada.

### **1.1.3.4 Modelamiento 3D de estructuras biométricas**

En la última década el uso de información 3D para el reconocimiento biométrico de personas ha aumentado de forma significativa. La utilización de características tridimensionales ha sido especialmente exitoso en biométricas como caras y manos [34, 35].

En cuanto al iris, en la publicación “3D Iris Structure Impact on Iris Recognition”[14] se habla precisamente de como la tridimensionalidad del iris debe ser tomada en consideración para el reconocimiento del iris y demuestran que se obtendrían mejores resultados utilizando un modelo

3D del iris. Esta publicación utiliza modelos creados y no imágenes reales y propone como siguiente paso probar los modelos tridimensionales con imágenes reales, lo cual es el objetivo de este trabajo de investigación.

## **1.2 Motivación**

El trabajo aquí presentado tiene como motivación la investigación de un método de representación tridimensional del iris nunca antes probado, evaluar su factibilidad y de esta forma dar pie a nuevas investigaciones y aplicaciones utilizando este método. Por otra parte, se desea obtener un conjunto de imágenes del iris con fotos desde diferentes ángulos, que sirva para futuras investigaciones en este ámbito. Finalmente se pretende encontrar los parámetros óptimos para la toma de imágenes del iris en diferentes ángulos.

## **1.3 Hipótesis**

La hipótesis de esta memoria es: Es técnicamente factible construir un modelo 3D del iris a partir de imágenes bidimensionales.

## **1.4 Objetivos**

### **1.4.1 Objetivo general**

Se propone construir un sistema de toma de imágenes bidimensionales del iris desde diferentes ángulos, y a partir de ellas construir una representación de regiones del iris considerando su estructura tridimensional. Esto proporcionaría las herramientas necesarias para futuras investigaciones en el ámbito de biometría utilizando el iris con información tridimensional. Así, el objetivo general es analizar la factibilidad de obtener estas representaciones tridimensionales de regiones del iris.

### **1.4.2 Objetivos específicos:**

- Definir condiciones para la captura de imágenes de iris que permitan visualizar estructuras 3D.
- Construir un sistema para la captura de imágenes que cumpla con las condiciones definidas en el punto anterior.
- Crear un conjunto de imágenes del iris orientada al modelamiento 3D.
- Definir procesamientos de imágenes que contribuyan a la correcta construcción del modelo tridimensional.
- Crear modelo tridimensional del iris.

## **2 MARCO TEÓRICO**

A continuación se revisarán algunas de las herramientas útiles para este estudio. Se revisarán de forma breve tres tipos de procesamientos de imágenes: la ecualización de histograma, el filtro gaussiano 2D y finalmente el realce mediante diferencia de gaussianas.

## 2.1 Procesamientos de imagen

### 2.1.1 Ecuación de histograma de imagen en escala de grises

En primer lugar se debe revisar en que consiste el histograma de una imagen en escala de grises. El histograma de una imagen 2D es una función que indica la cantidad de pixeles que tiene cada intensidad posible en la imagen. Es decir para una imagen en escala de grises donde cada pixel puede tener una intensidad entre 0 y 255, el histograma de grises es una función discreta  $h(r_k) = n_k$  donde  $k = [0,1,2, \dots, 255]$ ,  $r_k$  es la intensidad k-esima y  $n_k$  es el número de pixeles de la imagen que posee la intensidad  $r_k$  [36]. En la Ilustración 7 se muestra el grafico del histograma de una imagen 2D  $f[x, y]$  de 64 pixeles que solo contiene pixeles blancos y negros.

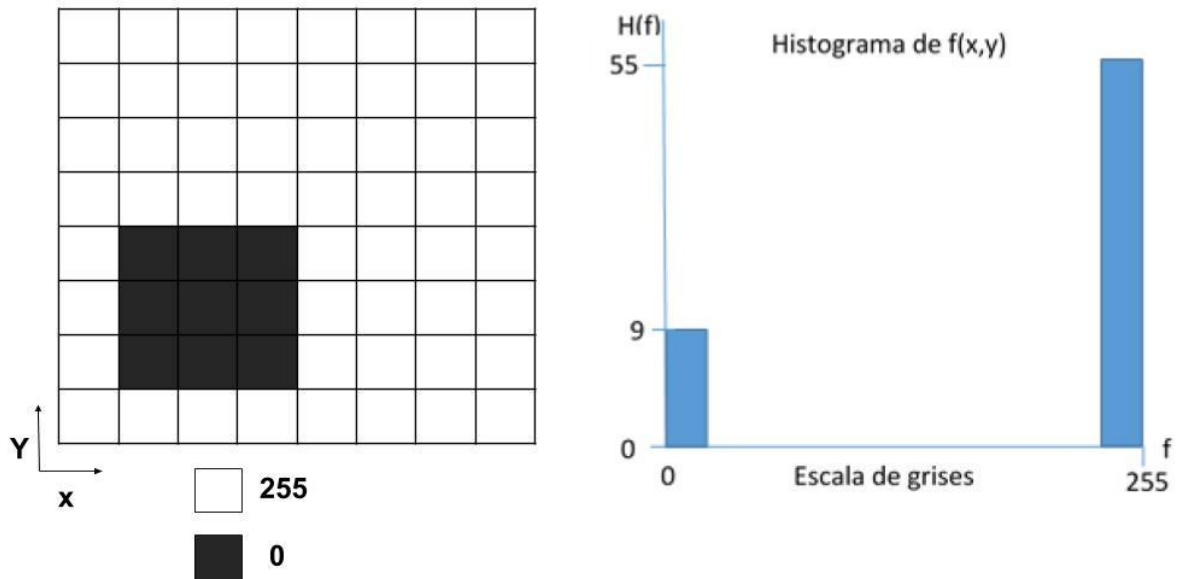


Ilustración 7: Imagen  $f(x,y)$  y su respectivo histograma  $H(f)$

La ecualización del histograma tiene por objetivo maximizar la visibilidad de la información de la imagen, para conseguirlo se debe obtener una imagen con un histograma de distribución uniforme, es decir que exista un mismo número de pixeles para cada nivel de gris del histograma [37].

### 2.1.2 Filtro Gaussiano 2D

EL filtro gaussiano es utilizado para suavizar imágenes y eliminar ruido y detalles. La función gaussiana centrada en el origen en dos dimensiones corresponde a:

$$g(x,y) = ce^{-\frac{(x^2+y^2)}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

Donde  $\sigma$  es la desviación estándar y  $c$  es un factor de escala. La función gaussiana decrece suavemente hasta cero desde el origen, por lo tanto los valores más cercanos al origen son más importantes que los lejanos; más aún el parámetro  $\sigma$  determina que tan ancha o focalizada será la

función. Luego se sabe que el 95% del peso total de la función se encuentra contenida a una distancia  $2\sigma$  del centro [38].

El filtro gaussiano puede ser de diferentes tamaños, a medida que es más grande más se suaviza la imagen y se eliminan más detalles. Para construir el filtro se aplica la formula (1) donde el valor  $\sigma$  se escoge de manera de obtener un porcentaje del 95% del peso de la función dentro de la matriz del filtro y  $c$  de forma que los valores del filtro sean enteros. En la Ilustración 8 se pueden ver ejemplos un filtro gaussiano de  $3 \times 3$  y un filtro gaussiano de  $7 \times 7$ . Finalmente para utilizar el filtro gaussiano se debe aplicar convolución entre el filtro y la imagen en que se desea aplicar.

$$G_{3 \times 3} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} ; \quad G_{7 \times 7} = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 7 & 9 & 7 & 3 & 1 \\ 3 & 12 & 26 & 33 & 26 & 12 & 3 \\ 7 & 26 & 55 & 70 & 55 & 26 & 7 \\ 9 & 33 & 70 & 90 & 70 & 33 & 9 \\ 7 & 26 & 55 & 70 & 55 & 26 & 7 \\ 3 & 12 & 26 & 33 & 26 & 12 & 3 \\ 1 & 3 & 7 & 9 & 7 & 3 & 1 \end{bmatrix}$$

*Ilustración 8: Filtros Gaussianos de  $3 \times 3$  y  $7 \times 7$  (imagen obtenida de [38]).*

### 3 DISEÑO, IMPLEMENTACIÓN Y RESULTADOS DEL SISTEMA DE MODELAMIENTO TRIDIMENSIONAL DEL IRIS

El desarrollo de éste trabajo se puede dividir en dos etapas fundamentales: la adquisición de imágenes bidimensionales del iris con diferentes ángulos y la construcción de un modelo tridimensional a partir de estas imágenes. A continuación se presenta cómo fueron llevadas a cabo estas dos etapas.

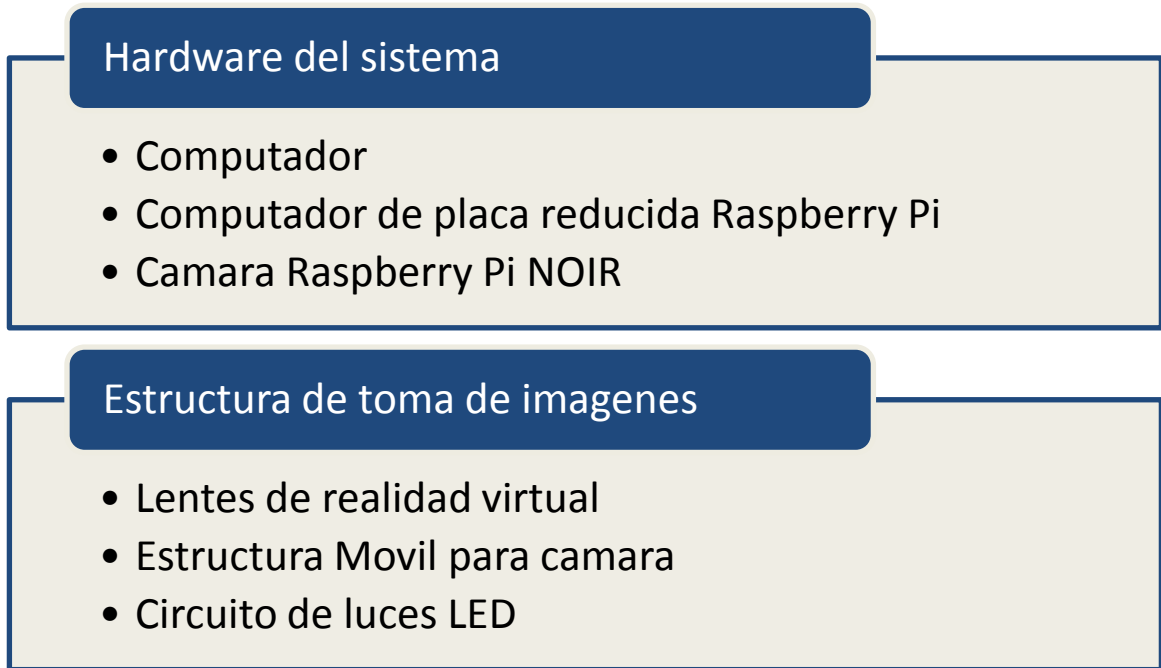
#### 3.1 Sistema de adquisición de imágenes bidimensionales del iris

Esta etapa tiene por objetivo obtener las imágenes que luego serán utilizadas para la construcción del modelo 3D. Estas imágenes deben cumplir con algunos requisitos tales como ser tomadas a una distancia y con una resolución adecuadas para que se vean los detalles de la textura del iris, además deben tener diferentes ángulos de encuadre del iris, deben ser tomadas con la iluminación adecuada para mostrar los montes y valles del iris sin que el reflejo ocluya el iris, y por último, deben ser un número de imágenes tales que permita crear un modelo tridimensional del iris.

Para cumplir este objetivo se desarrolló un sistema capaz de tomar 17 imágenes del iris a una distancia de 5 cm, variando el ángulo de encuadre en aproximadamente  $2,5^\circ$ , con una resolución de 8 megapíxeles y utilizando una iluminación híbrida de leds infrarrojas y blancas. El



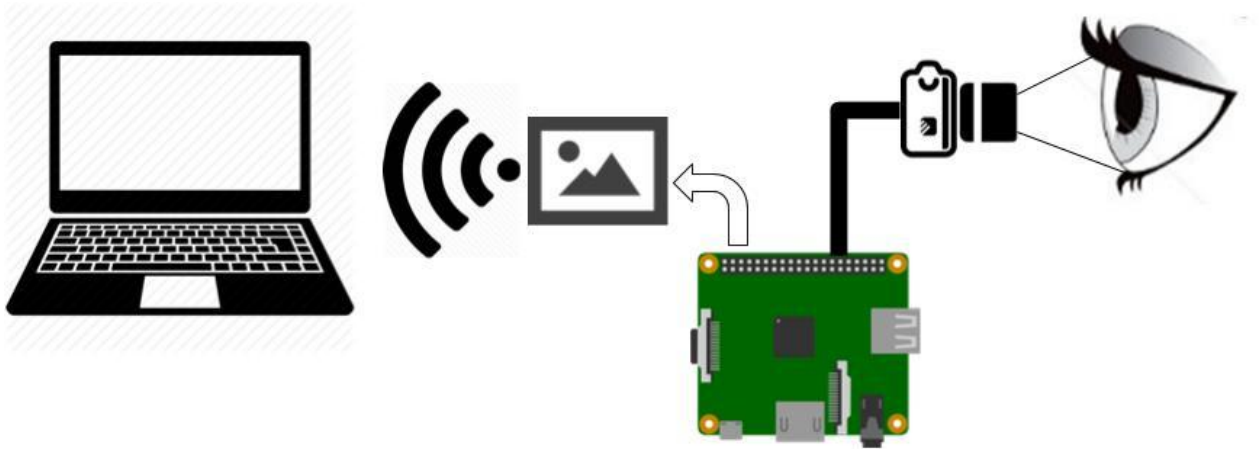
sistema desarrollado está constituido por el hardware y la estructura de toma de imágenes, en la Ilustración 9 se muestra las componentes de ambos. A continuación se mostrará el diseño, la implementación y los resultados de éste sistema, partiendo por el hardware utilizado, siguiendo por la estructura implementada para la toma de imágenes, a continuación la configuración necesaria para utilizar el sistema y finalmente la adquisición de las imágenes.



*Ilustración 9: Componentes del sistema de adquisición de imágenes bidimensionales del iris*

### **3.1.1 Hardware del sistema**

El hardware del sistema (Ilustración 10) está constituido por los dispositivos necesarios para la toma de imágenes, control del sistema y procesamiento de las imágenes. Para la toma de imágenes se utilizó la cámara *Raspberry PI NoIR* que a su vez debe ser conectada a una *Raspberry Pi* para controlarla. Las imágenes obtenidas son almacenadas temporalmente en la *Raspberry* para luego ser transferidas a un computador donde son procesadas.



*Ilustración 10: Esquema del hardware del sistema de toma de imágenes.*

### 3.1.1.1 Computador

El computador es la interfaz utilizada para comunicarse con la Raspberry Pi. Le da las órdenes de cuando tomar las imágenes y recibe las tomadas por la cámara conectada a ésta.

### 3.1.1.2 Computador de placa reducida “Raspberry Pi 3 Model B”

La *Raspberry Pi* (Ilustración 11) es un computador de tamaño reducido con múltiples funciones. Su tamaño y su diseño le permiten ser instalada en diversas estructuras, haciéndola adecuada para la construcción de prototipos tecnológicos. Por otra parte su precio, accesibilidad y la cantidad de documentación existente la hacen una opción factible para el trabajo de investigación.



*Ilustración 11: Computador de placa reducida Raspberry Pi 3 Model B, utilizado para controlar cámara Raspberry Pi.*

El sistema operativo utilizado por la *Raspberry Pi* es *raspbian*, una distribución del sistema operativo GNU/Linux basada en *Debian* [39]. De esta forma la *Raspberry Pi* puede ser programada para realizar las mismas tareas que un computador de escritorio de baja capacidad. En este caso se utilizó como el controlador de la cámara fotográfica y mediador entre ésta y el computador portátil, indicando los parámetros con los que se deben tomar las imágenes y capturándolas cuando es indicado desde el computador. Las especificaciones técnicas de la *Raspberry Pi* se encuentran en la Tabla 1.

**Tabla 1: Especificaciones de computador de placa reducida Raspberry Pi 3 Model B.**

Características	
<b>Tamaño</b>	85 x 56 x 17 mm
<b>RAM</b>	1GB
<b>CPU</b>	1.2GHz 64-bit quad-core ARMv8
<b>Conexión</b>	802.11n Wireless LAN
<b>Puerto de video</b>	Full HDMI port

### 3.1.1.3 Cámara “*Raspberry Pi NoIR – Camera Board*”

La Cámara *Raspberry Pi NoIR* es la encargada de tomar las imágenes del iris. Su tamaño, diseño, resolución y falta de filtro infrarrojo la hacen adecuada para la toma imágenes a corta distancia y con diversos ángulos del iris. Además, al igual que con la *Raspberry Pi* su precio, accesibilidad y la cantidad de documentación existente la hacen apta para el trabajo de investigación. Esta cámara recibe las ordenes que le envía la *Raspberry Pi*, donde se indican los parámetros como ISO<sup>3</sup> a utilizar, tiempo de captura, tipo de balance de blancos y el momento en que se debe tomar la imagen. Se utilizaron dos versiones de la cámara *Raspberry Pi NoIR*, en primera instancia se tomaron la imágenes con la versión 1.3 (Ilustración 12) y luego se usó la versión 2.1 (Ilustración 13) que tiene las mismas dimensiones pero una mayor resolución. En adelante se hará referencia a éstas como la cámara 1 y la cámara 2 respectivamente. Las especificaciones técnicas de ambas encuentran en la Tabla 2.

<sup>3</sup> Parámetro que indica la cantidad de luz que necesita la cámara para realizar la fotografía

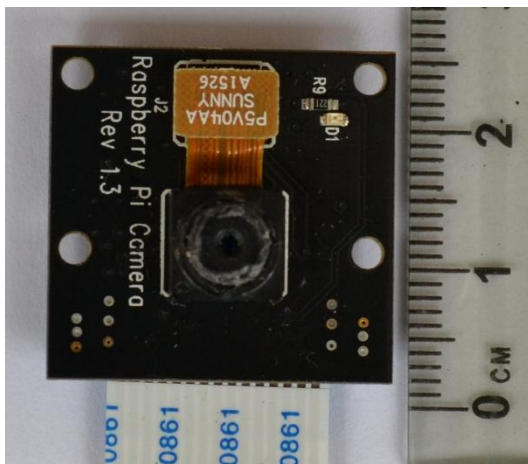


Ilustración 12: Cámara Raspberry Pi NoIR v1.3

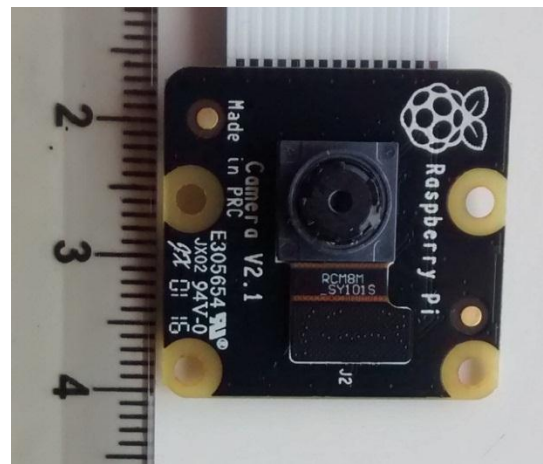


Ilustración 13: Cámara Raspberry Pi NoIR v2.1

Tabla 2: Especificaciones técnicas de las Cámaras Raspberry Pi NoIR v1.3 y v2.1.

Características	V1.3	V2.1
<b>Tamaño</b>	25 × 24 × 9 mm	25 × 24 × 9 mm
<b>Resolución</b>	5 Megapíxeles	8 Megapíxeles
<b>Modelo Sensor</b>	OmniVision OV5647	Sony IMX219
<b>Ancho del Sensor (CCD width)</b>	3,76 mm	3,04 mm
<b>Presencia de filtro</b>	Sin filtro infrarrojo.	Sin filtro infrarrojo.

### 3.1.1.3.1 Modificación del enfoque Cámara Raspberry Pi

La cámara *Raspberry Pi NoIR* cuenta con un enfoque estático definido para distancia infinita, este claramente no es el enfoque adecuado para tomar imágenes a poca distancia del iris. Sin embargo, existe un método no oficial para cambiar el enfoque de ésta cámara. El lente de ésta se encuentra atornillado al resto de la estructura, de manera que al desatornillar el lente se modifica el ángulo de enfoque permitiendo enfocar objetos más cercanos. Los pasos para realizar esta modificación se encuentran en el Anexo A.

### 3.1.2 Estructura de toma de imágenes

La estructura de toma de imágenes fue diseñada de manera que las imágenes tomadas con ésta cumplan con los objetivos mencionados al inicio de la sección 3.1. En primer lugar la cámara se posiciona a una distancia de 5 cm del ojo, de tal manera que la distancia a éste sea la menor posible mientras el lente aun permite enfocar correctamente. En segundo lugar el diseño permite variar el ángulo de encuadre de la cámara mientras sigue apuntando a la pupila del ojo. En tercer lugar se puedan tomar 17 imágenes con 2,5° de diferencia de manera de tener más imágenes de las que podría requerir el software para construir el modelo 3D. Finalmente se mantiene una

iluminación adecuada para la toma de imágenes. La estructura puede ser dividida en 3 elementos, lentes de realidad virtual, estructura móvil para cámara y circuito de luces led.

### 3.1.2.1 Lente de realidad virtual

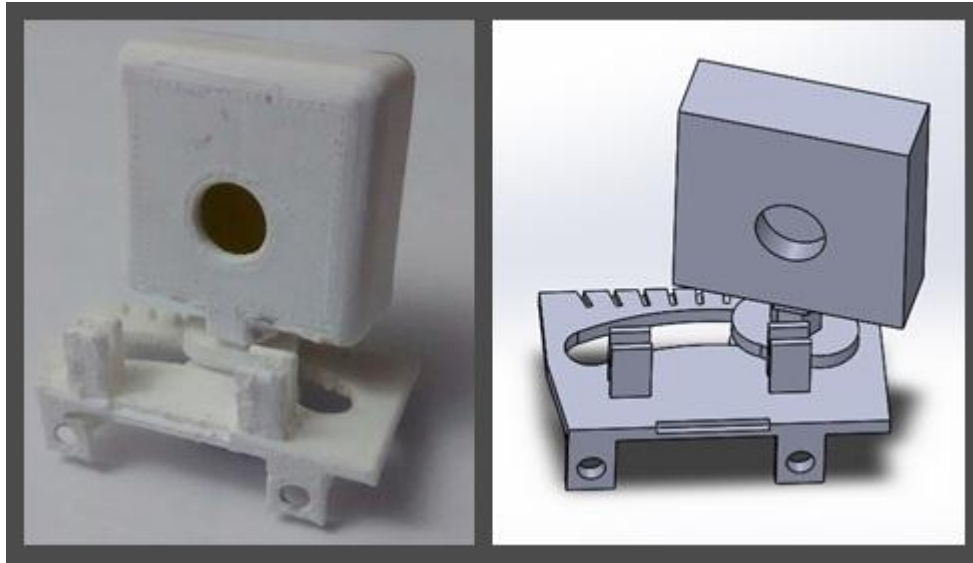
Los lentes de realidad virtual son un dispositivo de visualización similar a un casco que permite reproducir imágenes a corta distancia de cada ojo de forma de poder mostrar imágenes estereoscópicas creando la sensación de profundidad al usuario[40]. El equipo de realidad virtual escogido (Ver Ilustración 14) está diseñado para ser utilizado con un Smartphone, son de marca genérica y de bajo costo, ya que no se requiere de sus funciones de sistema de realidad virtual. Los lentes fueron utilizados como estructura sostenedora del sistema, de forma de contener el hardware y mantener la cámara en la misma posición relativa al ojo.



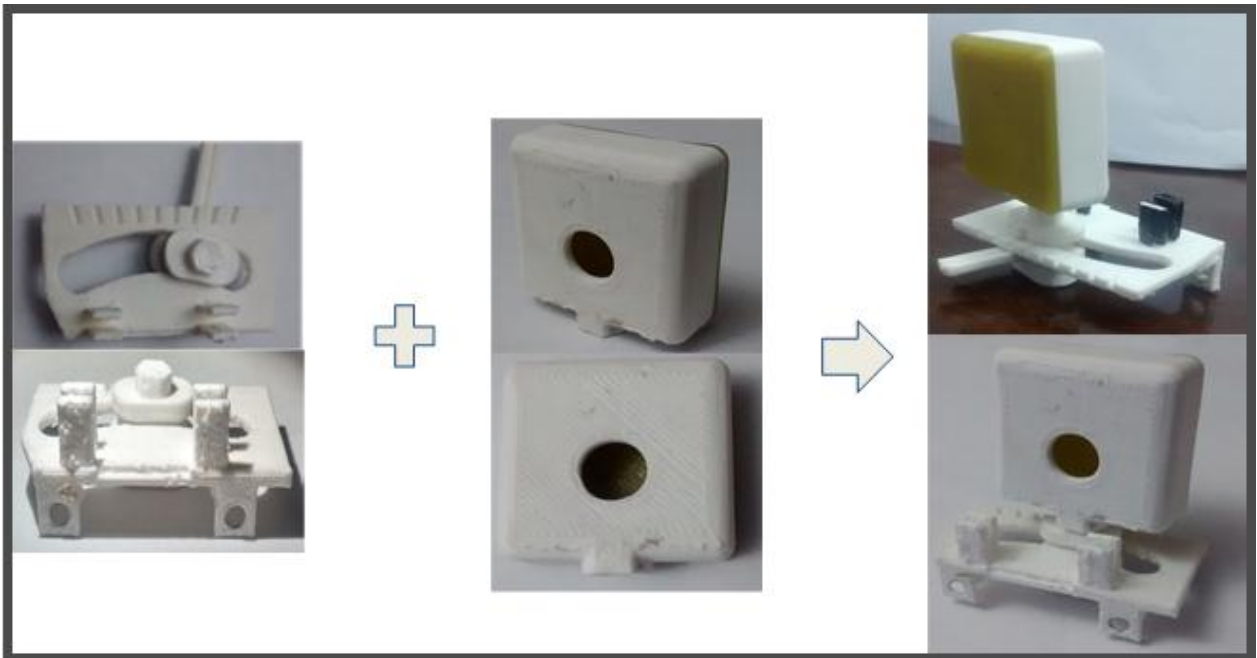
*Ilustración 14: Lentes de realidad virtual.*

### 3.1.2.2 Estructura móvil para cámara

La estructura móvil para la cámara (Ilustración 15) tiene como principal objetivo permitir que la cámara se desplace en un arco, de manera que su mira siempre este apuntando al centro del arco, a 5 [cm]. Por otra parte, esta estructura tiene los objetivos secundarios de anclar la cámara a los lentes de realidad virtual y de albergar el arreglo de luces led. Para conseguir estos objetivos la estructura fue diseñada con una base de deslizamiento y una carcasa hecha a la medida para la cámara Raspberry Pi (Ilustración 16). Todas las piezas que componen la estructura móvil de la cámara fueron realizadas con las impresoras 3D del *FabLab UChile*.



*Ilustración 15: Impresión 3D y modelo de estructura móvil*

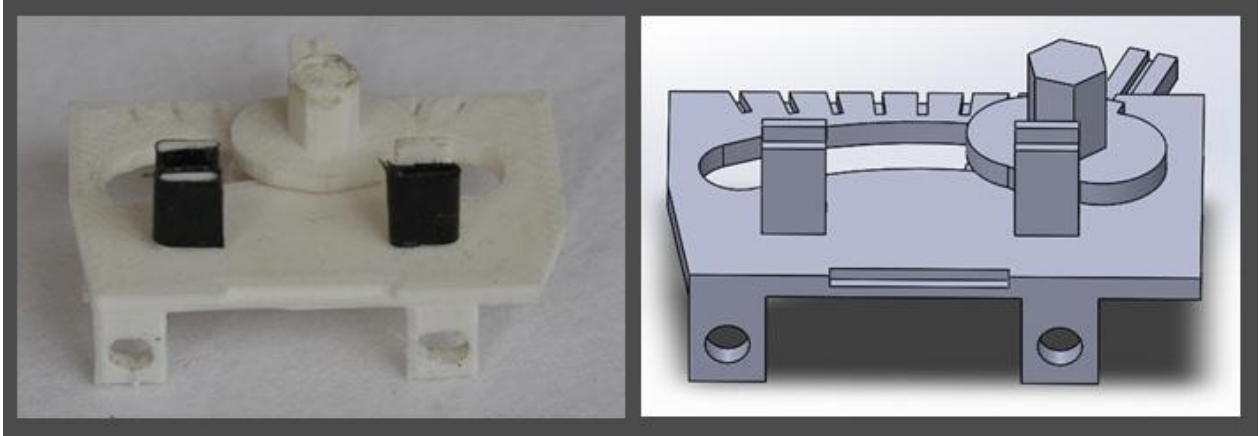


*Ilustración 16: Componentes y ensamblaje de estructura móvil.*

### 3.1.2.2.1 Base de Deslizamiento

La base de deslizamiento cumple con los objetivos de anclar la estructura a los lentes de realidad virtual, permitir el movimiento circular del eje de la cámara y sostener el circuito de luces led. Toda esta estructura fue diseñada en *SolidWork* y luego impresa con las impresoras 3D del *FabLab U. de Chile*. En la Ilustración 17 se ve el riel de la base que permite un deslizamiento de 20° en sentido horaria y 20° en sentido anti horario, en el fondo del diseño se ven 9 ranuras que indican una separación de 5°. También se pueden ver dos pestañas inferiores con orificios desde

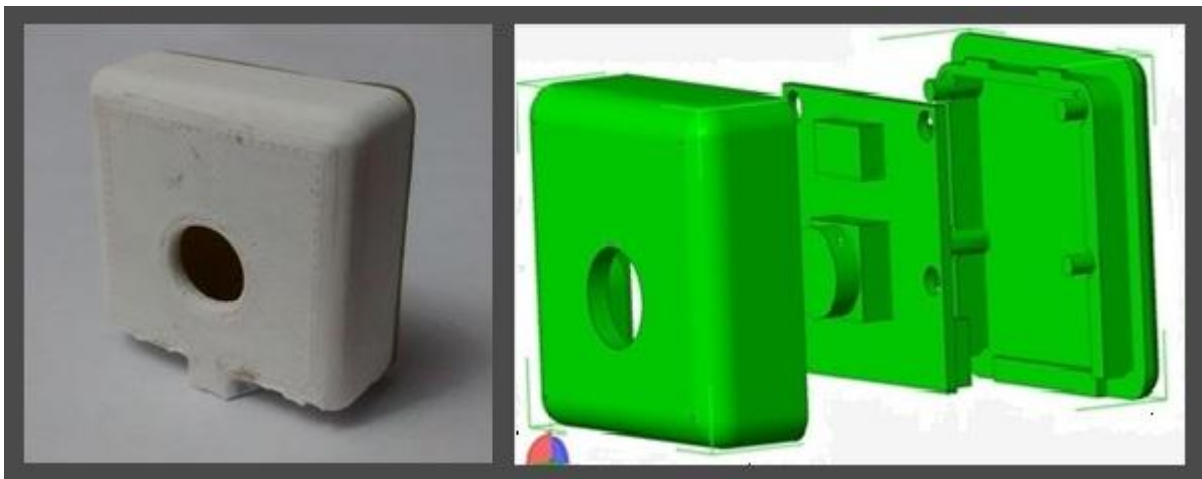
donde se atornilla la base a los lentes de realidad virtual, 4 pestañas superiores que actúan como pinzas para sostener la placa del circuito de luces led y el eje móvil en donde se acopla la carcasa de la cámara.



*Ilustración 17: Impresión 3D y modelo de base de deslizamiento.*

#### **3.1.2.2.2 Carcasa cámara**

La carcasa de la cámara (Ilustración 18) tiene como función proteger y sostener la cámara de forma de poder anclarla al eje de la base de deslizamiento. Esta carcasa está diseñada de forma que la cámara queda acoplada en su interior sin necesidad de tornillos, la parte trasera y la posterior se encajan. El diseño CAD de este case fue descargado de thingiverse [41].



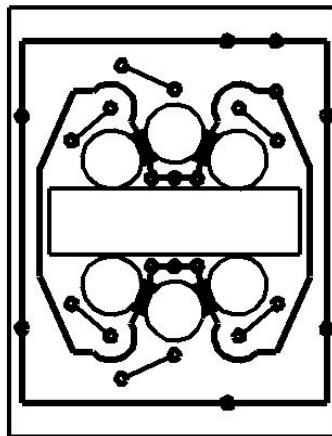
*Ilustración 18: Impresión 3D y modelo de carcasa de cámara (imagen de la derecha obtenida de [41]).*

### 3.1.2.3 Circuito de luces LED

El circuito de luces LED tiene por objetivo iluminar el iris del ojo de forma que se vean los detalles y la textura del iris sin que los reflejos de las luces ocluyan el iris. Para conseguir esto se diseñó un arreglo de luces leds central en un circuito impreso, donde se probaron diferentes combinaciones de luces blancas e infrarrojas. Por otra parte para algunos casos se incorporaron luces led blancas laterales a la estructura con el objetivo de contraer la pupila.

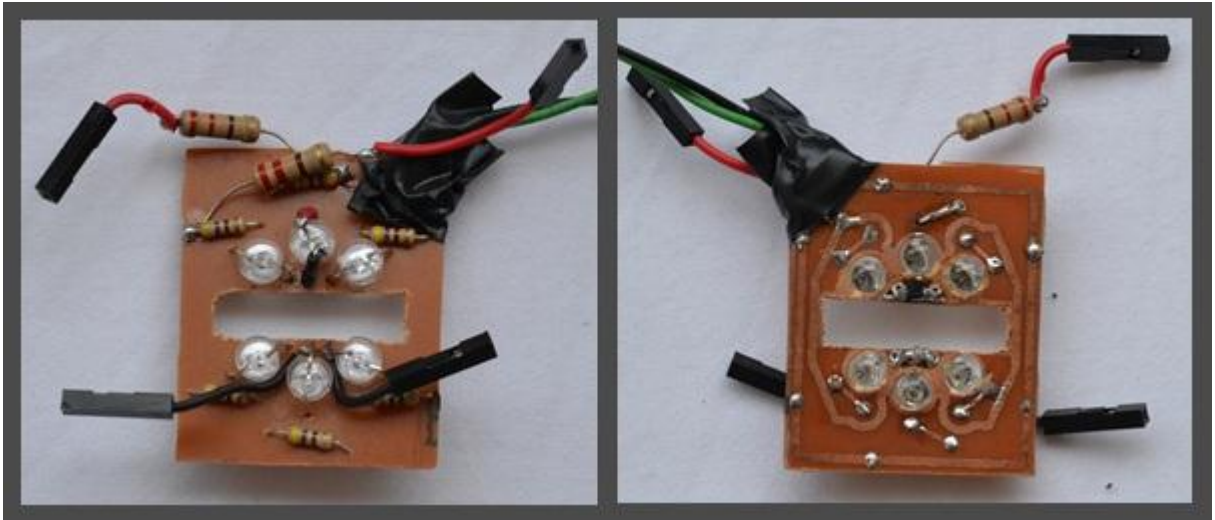
#### 3.1.2.3.1 Arreglo de luces central

El arreglo de luces central fue utilizado para iluminar el iris directamente y mostrar los detalles y la textura de éste. Se escogieron luces infrarrojas en concordancia con lo visto en 1.1.3.1, sin embargo, se desea que la pupila este contraída al momento de tomar la fotografía por lo que se realizaron pruebas con combinaciones de leds blancos e infrarrojos. El arreglo de luces led se diseñó de manera que el reflejo de las luces se centrara en la pupila del ojo de manera de no ocluir el iris. El diseño se realizó en un esquema de *SolidWork* (Ilustración 19). Se ubicaron 6 leds, 3 en una semicircunferencia por sobre el eje de visión de la cámara y 3 en una semicircunferencia bajo el eje. En la Ilustración 20 se puede ver la placa impresa donde se dejó un rectángulo vacío en el centro, de forma que la cámara pueda visualizar el iris a través de éste.



*Ilustración 19: Esquema de circuito eléctrico de iluminación.*

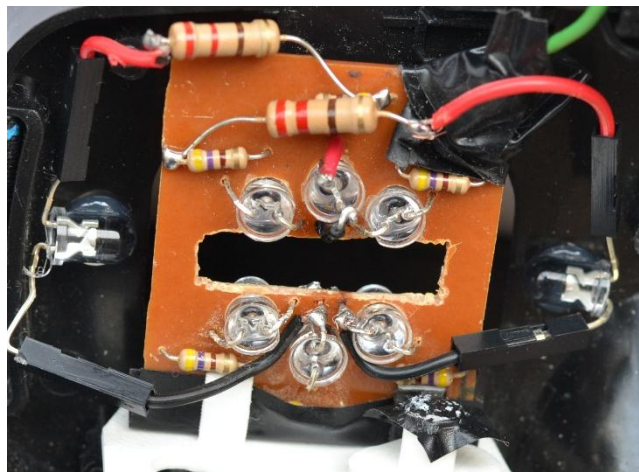




*Ilustración 20: Placa de circuito de iluminación.*

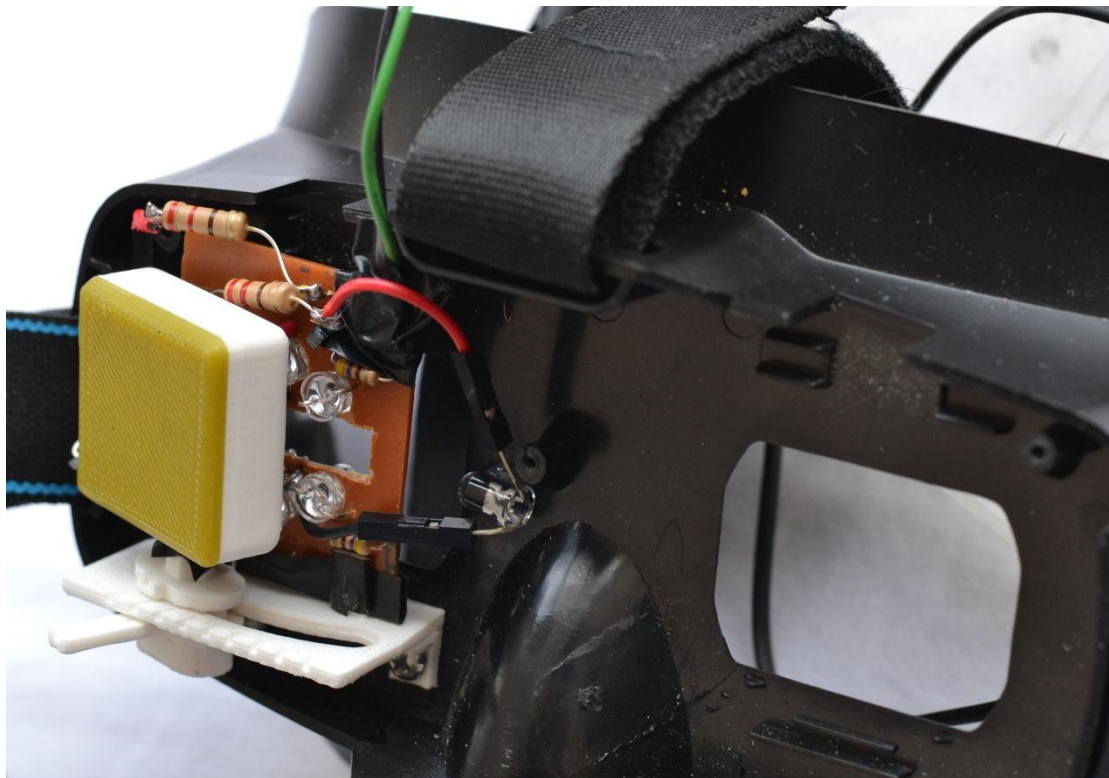
### **3.1.2.3.2 Luces laterales**

En 3.1.2.3.1 se mencionó la necesidad de luces blancas para conseguir que la pupila se mantuviera contraída, por esta razón se agregaron luces blancas laterales para utilizar junto con las luces infrarrojas en el arreglo central. Se utilizaron 2 luces led blancas para iluminar de forma indirecta el ojo, de forma de obtener un mayor área del iris. Estas luces están instaladas en los bordes del orificio para el ojo en los lentes de realidad virtual, de esta manera la luz no genera reflejos al no llegar directamente al ojo. Como se muestra en la Ilustración 21, las luces se encuentran pegadas a los lentes de realidad virtual y son conectadas a la placa del circuito de iluminación mediante cables.

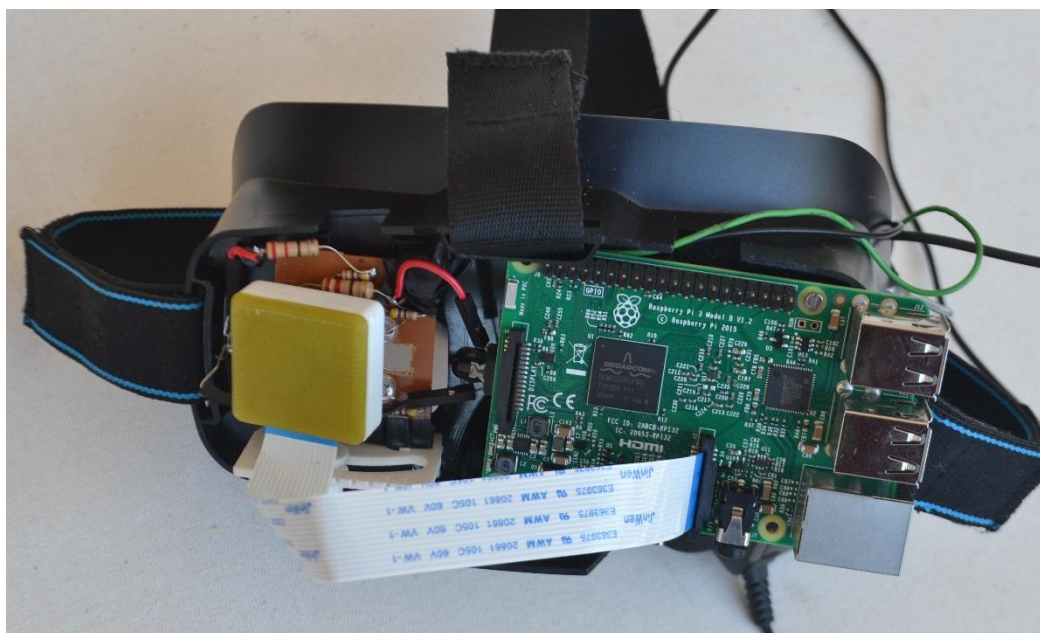


*Ilustración 21: Sistema de iluminación.*

A continuación en la Ilustración 22 se muestra la estructura de toma de imágenes con todos sus componentes. Luego en la Ilustración 23 se incluye el hardware, mostrando el sistema de toma de imágenes completo.



*Ilustración 22: Estructura de toma de imágenes.*



*Ilustración 23: Sistema de adquisición de imágenes.*

### **3.1.3 Configuración del sistema**

A continuación, se detallarán las configuraciones que se realizaron para dejar el sistema funcional y listo para tomar las imágenes bidimensionales. En primer lugar se hablará sobre la configuración de la *Raspberry*, luego se verá las configuraciones para realizar la conexión SSH entre la *Raspberry* y el computador, finalmente se hablara sobre el script que se utilizó para tomar imágenes desde la *Raspberry*.

#### **3.1.3.1 Configuración Raspberry Pi**

La configuración inicial de la *Raspberry Pi* fue realizada de acuerdo con las instrucciones de la página oficial de *Raspberry* y se pueden encontrar en el Anexo B. Estas configuraciones son necesarias para conseguir en primer lugar que la *Raspberry* funcione y en segundo lugar para tener el software necesario para utilizar la cámara y ejecutar los códigos de toma de imágenes.

#### **3.1.3.2 Conexión SSH entre *Raspberry* y computador**

Se realizaron modificaciones para poder conectarse a la *Raspberry* desde el computador mediante una red *Ad-hoc* que creara la *Raspberry*. Los pasos que se realizaron se pueden encontrar en el Anexo C. El objetivo de esta conexión SSH entre la *Raspberry* el computador es poder darle las ordenes necesarias a la *Raspberry* para que ejecute el script de toma de imágenes, indicarle cuando tomar las imágenes y recibir las imágenes tomadas.

#### **3.1.3.3 Script de toma de imágenes**

Luego se guardó el script de toma de imágenes, mostrado en el Anexo D, en la *Raspberry*. Este *script* toma una secuencia de 17 imágenes del iris, tomando una nueva cada vez que se presiona una tecla, de esta forma es el usuario quien decide cuándo se debe tomar la fotografía. Por otra parte indica algunos parámetros para la toma de imágenes, como que solo se guardara la región de

interés del centro de la imagen original descartando un 30% de la imagen y que la imagen se tomará luego de 500 milisegundos. Una vez tomadas las 17 imágenes el código envía las imágenes al computador.

### **3.1.4 Adquisición de imágenes bidimensionales**

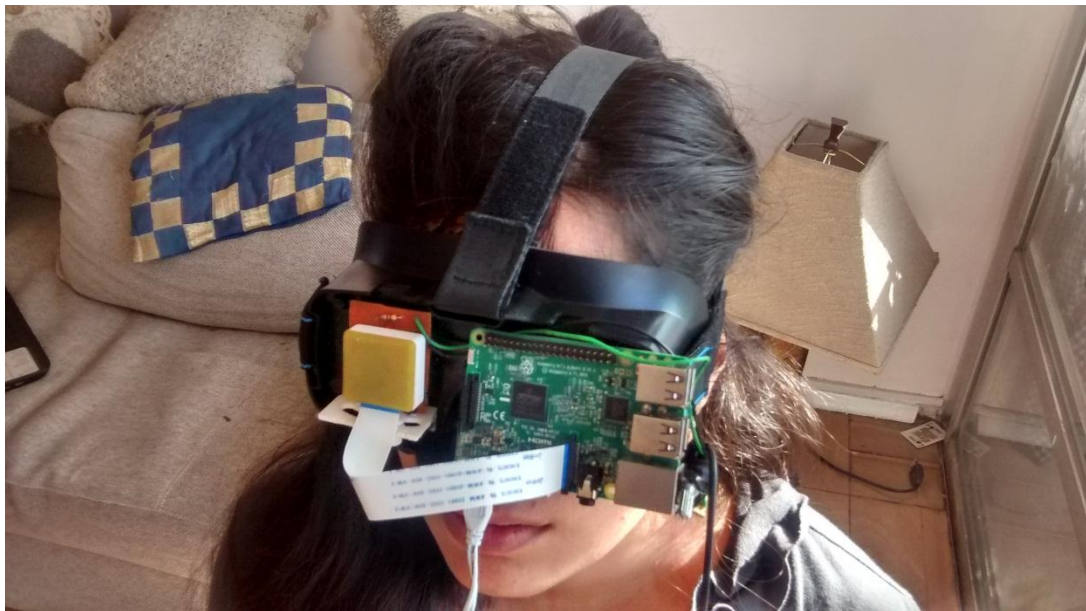
A partir del sistema antes descrito se adquieren las imágenes bidimensionales utilizando para ello la siguiente metodología.

#### **3.1.4.1 Metodología toma de imágenes**

A continuación, se presentará la metodología utilizada para la toma de imágenes, mostrando la secuencia de iniciación del sistema y la ejecución del script de toma de imágenes.

##### **3.1.4.1.1 Iniciación del sistema**

En primer lugar se inicia el sistema, esto consiste en ensamblar toda la estructura de toma de imágenes, conectar la iluminación y conectar los implementos de la *Raspberry* como teclado, mouse, pantalla, cámara y fuente de poder. El segundo paso consiste en equipar el sistema a la persona a la que se desea fotografiar (Ilustración 24), asegurándose de que la cámara encuadre de buena forma el iris. Finalmente se regula el enfoque de la cámara para que el ojo quede correctamente enfocado. Para ello se aplica el método para modificar el enfoque de la cámara (ver 3.1.1.3.1) y tomando imágenes con la cámara se calibra el enfoque hasta conseguir que el iris se vea nítido.



*Ilustración 24: Sistema de adquisición de imágenes equipado en persona.*

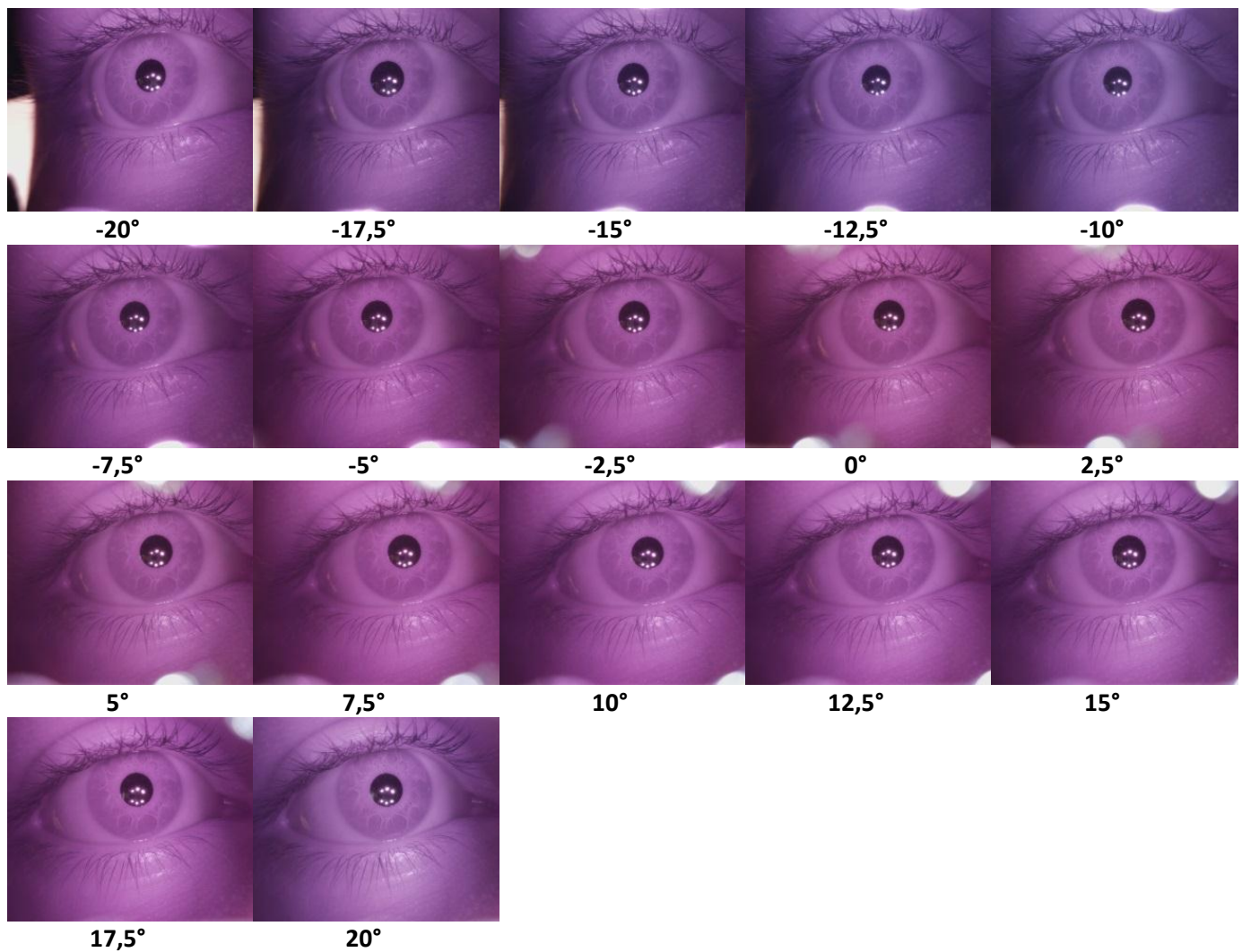
#### **3.1.4.1.2 Ejecución script de toma de imágenes**

Para la toma de imágenes se ejecuta el script mostrado en el Anexo D, éste se inicia indicando el nombre del conjunto de imágenes y presionando *Intro* se toma la primera imagen. Al iniciar el script la cámara debe encontrarse en el extremo izquierdo de la base de deslizamiento, en la primera ranura de las que se habla en 3.1.2.2.1. Luego de tomar la primera imagen la cámara se mueve manualmente a la mitad de la distancia entre las ranuras y se presiona *Intro* para tomar la siguiente imagen. Así la cámara se va deslizando en aproximadamente  $2,5^\circ$  por cada fotografía hasta llegar al final de la base de deslizamiento habiendo fotografiado 17 veces al iris.

#### **3.1.4.2 Resultados de toma de imágenes**

Como se mencionó antes (Ver 3.1.1.3 y 3.1.2.3) se utilizaron dos versiones de cámaras Raspberry y diferentes combinaciones de leds de iluminación para la adquisición de imágenes. Por simplicidad y para un mejor entendimiento del lector solo se mostrarán los últimos resultados obtenidos, ya que estos incorporan el conocimiento adquirido de los resultados anteriores y presentan un mejor modelo. Estos resultados utilizan la cámara 2 con iluminación central infrarroja y lateral blanca. En el Anexo E se pueden encontrar los resultados previos de la cámara 1 con iluminación central blanca e iluminación central blanca con infrarroja.

En la Ilustración 25 se muestran las imágenes resultantes del escenario que utiliza la cámara 2 con iluminación central infrarroja y lateral blanca. Como aquí se muestra, se consiguió obtener imágenes del ojo con diferentes ángulos de enfoque y con una iluminación adecuada. Se aprecia también que el reflejo de los leds se mantiene en la pupila del ojo y que ésta se encuentra adecuadamente contraída. También la resolución obtenida en el iris permite distinguir patrones en éste. Sin embargo, se puede distinguir que la pupila no siempre se mantiene de un tamaño constante en las diferentes imágenes, por ejemplo es claro que la imagen tomada a  $-10^\circ$  tiene una pupila más pequeña que la imagen tomada con  $15^\circ$ . Estas diferencias pueden producir complicaciones al momento de construir los modelos. Otro factor en las imágenes es que en algunas se alcanzan a ver los leds infrarrojos, esto puede afectar en el balance de blancos ya que es el punto más blanco de la imagen.



*Ilustración 25: Ejemplo de imágenes tomadas con cámara 2 luz infrarroja y blanca lateral.*

### **3.2 Construcción de Modelo Tridimensional**

Para la construcción del modelo 3D se realizaron diversos tipos de procesamientos a las imágenes bidimensionales. Luego mediante fotogrametría se realizaron modelos 3D a los conjuntos de imágenes tomadas, con los diferentes procesamientos y variando parámetros del software de modelamiento. A continuación se describirá el procesamiento de imágenes realizados, el software de modelamiento 3D utilizado, detallando los parámetros pertinentes, y los resultados obtenidos.

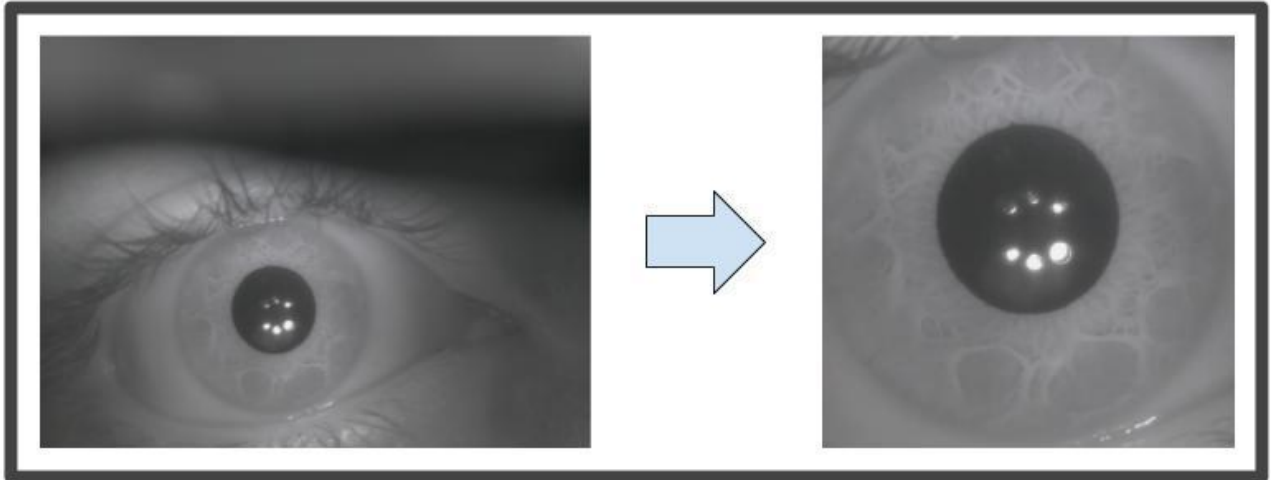
#### **3.2.1 Procesamiento de imágenes de Iris**

Con el objetivo de obtener modelos 3D más completos del iris se realizaron diversos procesamientos a las imágenes bidimensionales. Estos procesamientos apuntan a mejorar la calidad de la imagen 2D del iris, disminuir el ruido y a realzar la textura del iris. Los procesamientos realizados a las imágenes del iris fueron los siguientes: encuadrar el iris, borrar la pupila, ecualizar las imágenes y suavizar las imágenes. A continuación, se explicará brevemente en qué consisten

cada uno de estos procesamientos de imágenes y luego se mostrarán los resultados de las diferentes combinaciones utilizadas.

### 3.2.1.1 Encuadrar el iris

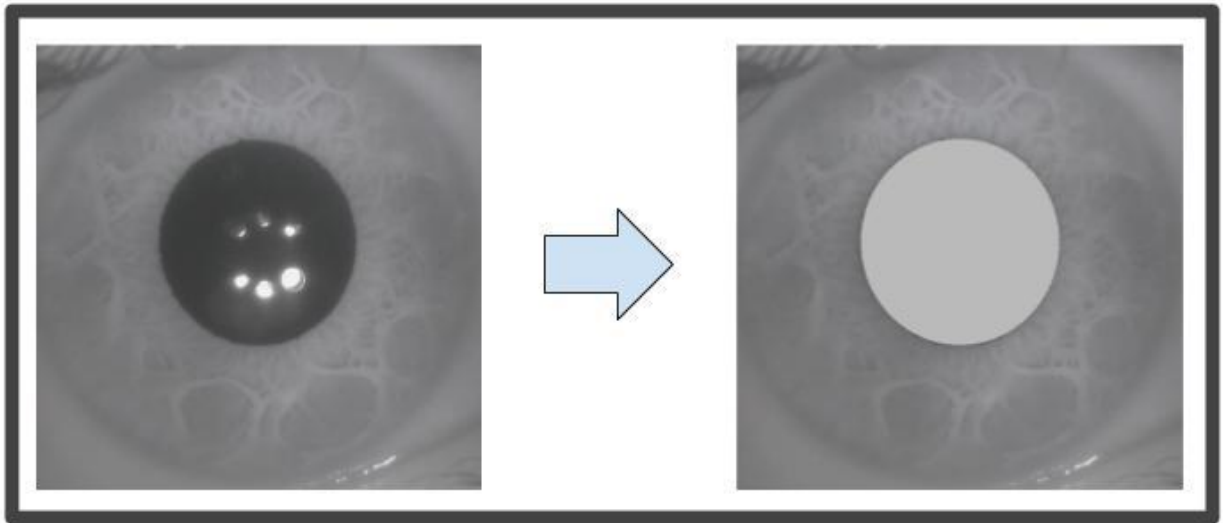
La operación de encuadrar tiene por objetivo focalizar el modelo 3D en el área de interés, es decir el iris. Se recortaron cuadrados de 900x900 píxeles con centro en la pupila del ojo y que abarcan la totalidad del iris como se ve en la Ilustración 26.



*Ilustración 26: Ejemplo de encuadre del iris en imagen 2D.*

### 3.2.1.2 Borrar pupila

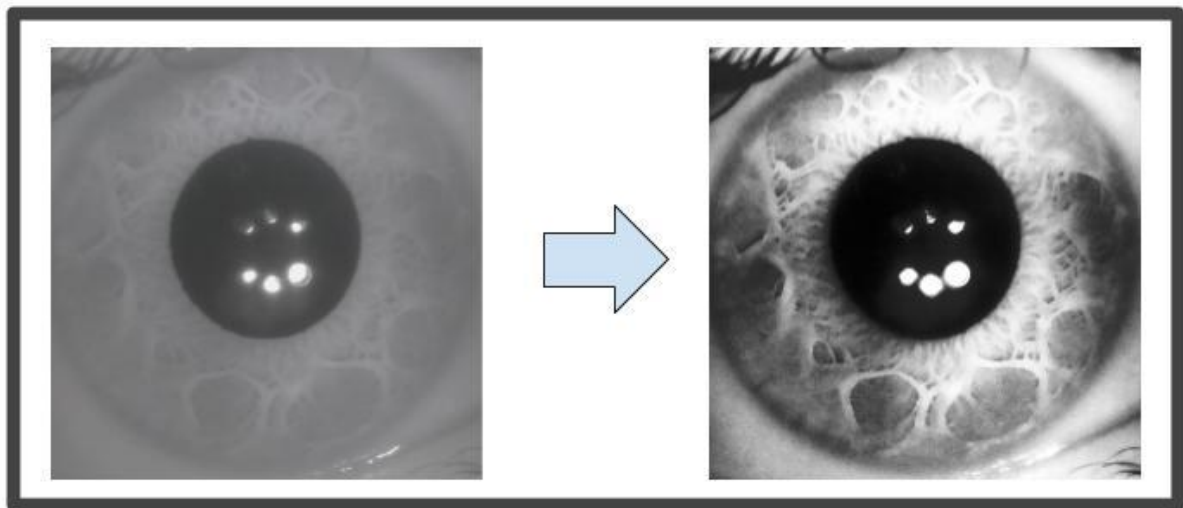
Como se explicó en la sección 3.1.2.3 la iluminación fue diseñada de manera que el reflejo de los leds quedara posicionado en la pupila. El reflejo varía de forma irregular al tomar las imágenes desde diferentes ángulos, estas variaciones dificultan la identificación del mismo iris entre dos imágenes. Por otra parte, el reflejo blanco generado por la luz es el sector más brillante de la imagen, lo que desplaza el histograma de colores a la zona de blancos. Debido a que la pupila no contiene información biométrica de interés y que contiene el reflejo de la luz, se decidió eliminarla utilizando una máscara circular sobre ella como se ve en la Ilustración 27.



*Ilustración 27: Ejemplo eliminación de la pupila que contiene la reflexión de fuentes luminosas.*

### **3.2.1.3 Ecuilizar histograma imagen**

Para visualizar de mejor forma los detalles del iris, se decidió realizar la ecualización de histograma en la imagen 2D en escala de grises. Como se revisó en 2.1.1 la ecualización del histograma maximiza la visibilidad de la información de la imagen, mejorando el contraste de ésta sin perder información estructural como se ve en la Ilustración 28.

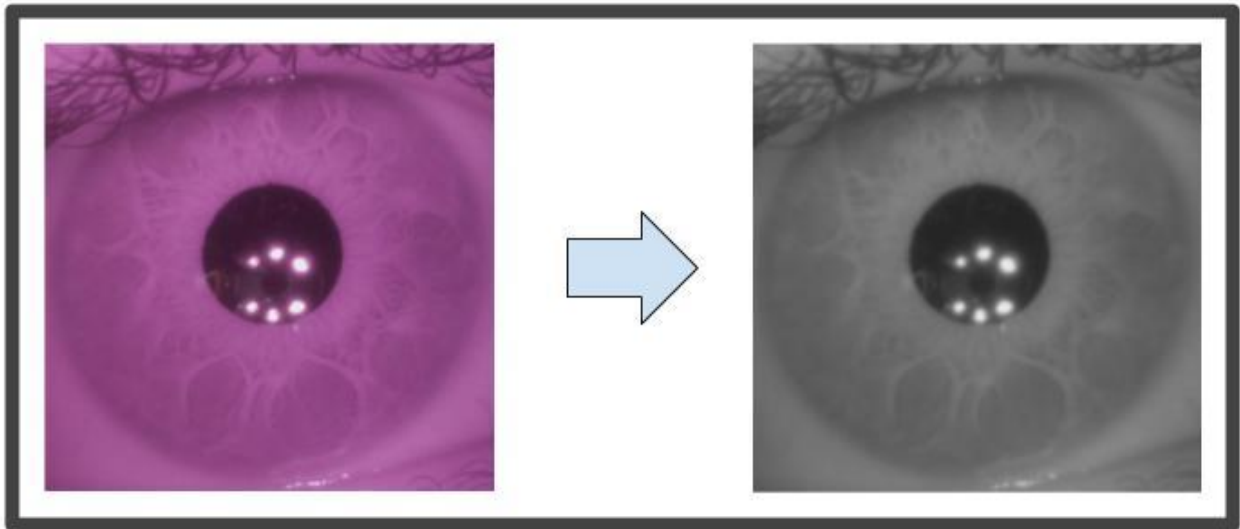


*Ilustración 28: Ejemplo ecualizar imagen de Iris 2D.*

### **3.2.1.4 Suavizado gaussiano de la imagen**

Se observó que existe ruido significativo en las imágenes 2D del iris. Una forma de mitigar el efecto del ruido es realizar un suavizado gaussiano como se muestra en la Ilustración 29. Este suavizado compromete en parte la definición de la imagen, por lo que se realizaron pruebas con diferentes tamaños de filtros gaussianos evaluando los resultados.





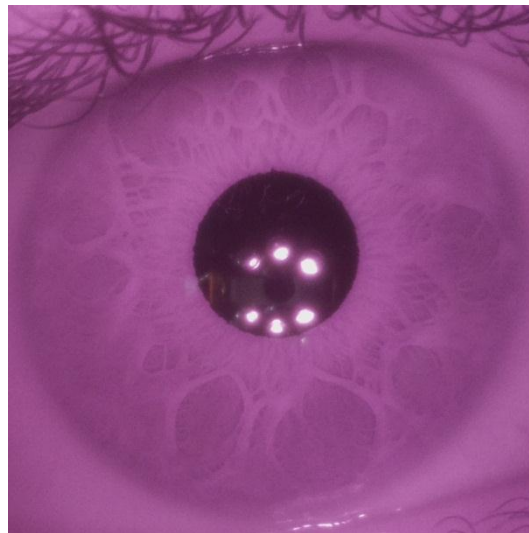
*Ilustración 29: Ejemplo suavizar imagen con filtro gaussiano de 10x10.*

### **3.2.1.5 Resultados Procesamientos**

A continuación, se mostrarán los resultados obtenidos al realizar la secuencia de procesamientos a las imágenes 2D obtenidas con la cámara 2. En el Anexo F se pueden ver los procesamientos realizados a las imágenes obtenidos con la cámara 1.

#### **3.2.1.5.1 Encuadre**

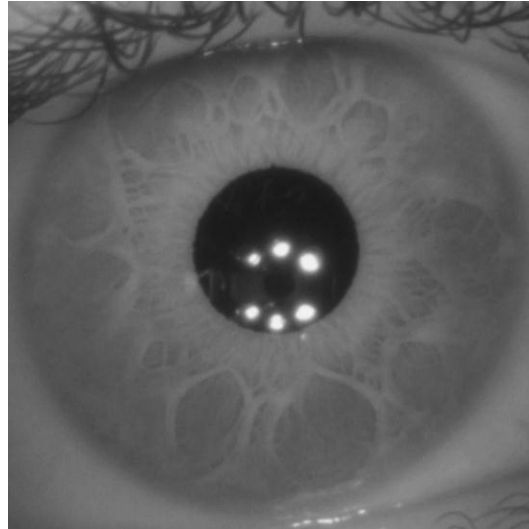
Las imágenes obtenidas del ojo muestran mucha información de poca utilidad para la construcción del modelo del iris, por esta razón se decide encuadrar el iris de forma de disminuir información no relacionada con el iris como se muestra en la Ilustración 30.



*Ilustración 30: Encuadre cámara 2 para centrar la imagen en el iris.*

### 3.2.1.5.2 Encuadre y suavizado gaussiano

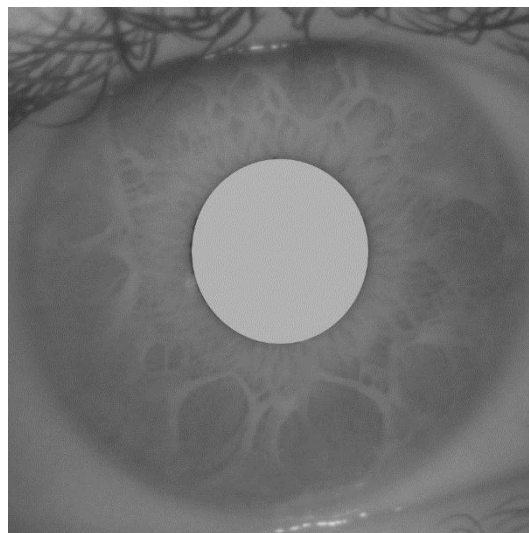
Las imágenes contienen ruido en toda su extensión, en la Ilustración 30 se puede apreciar este ruido en los bordes del iris. Para mitigar este ruido se utilizó un filtro gaussiano de tamaño 5x5 como se puede observar en la Ilustración 31.



*Ilustración 31: Encuadre y suavizado gaussiano de una imagen tomada con la cámara 2.*

### 3.2.1.5.3 Encuadre, suavizado gaussiano y eliminación de pupila

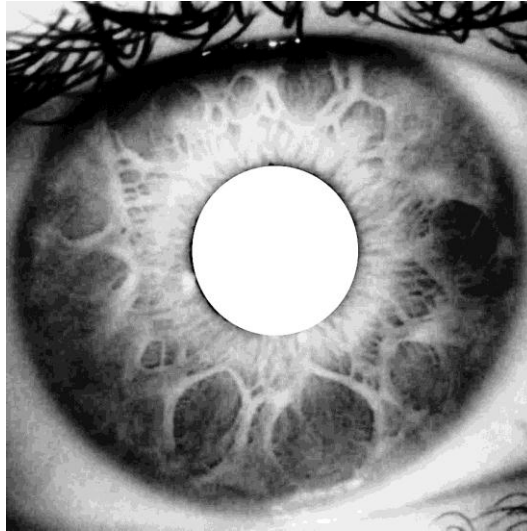
Se elimina la pupila con el objetivo de eliminar el ruido de los reflejos de las luces, de esta forma se elimina el blanco que produce el desplazamiento del histograma a la zona de blancos. En la Ilustración 32 se puede ver el resultado obtenido.



*Ilustración 32: Encuadre, suavizado gaussiano y eliminación de la pupila para una imagen capturada con la cámara 2.*

#### **3.2.1.5.4 Encuadre, suavizado gaussiano, eliminar pupila y ecualizar**

Una vez eliminada la pupila se puede realizar una ecualización de mejor calidad al no tener el reflejo de las luces blancas desplazando el histograma de grises a la zona de los blancos. De esta manera al ecualizar se obtiene una imagen con mayor contraste como se ve en la Ilustración 33.



*Ilustración 33: Encuadre, suavizado gaussiano, eliminación de la pupila y ecualizado de la imagen capturada con la cámara 2.*

### **3.2.2 Software de Modelamiento**

Se escogió el software Python Photogrammetry toolbox, de aquí en adelante PPT, para realizar el modelamiento 3D por ser un software abierto y por su flexibilidad al momento de recibir imágenes. Al utilizar este software se deben tener en cuenta ciertos parámetros de entrada que afectan al modelo 3D resultante y a los parámetros de salida que reflejan características del modelo, a continuación, se nombran estos parámetros, se comenta su importancia y como pueden variar.

#### **3.2.2.1 Parámetros de entrada**

Los parámetros de entrada son indispensables para conseguir construir el modelo 3D. Estos parámetros son calibrados de manera de optimizar la calidad del modelo 3D. En este ítem se mostrarán los distintos parámetros de entrada junto con su funcionalidad.

##### **3.2.2.1.1 Escala de la imagen**

El primer parámetro de entrada de importancia es la escala con la que utilizará el algoritmo sobre las imágenes. A menor escala el algoritmo toma menos tiempo en construir el modelo 3D pero al mismo tiempo las imágenes tienen menos detalles lo que puede ser perjudicial para el modelo 3D.

### **3.2.2.1.2 Ancho del sensor de la cámara (CCD width)**

El ancho del sensor de la cámara, o como lo llama el algoritmo, *CCD width*, es uno de los parámetros que utiliza el algoritmo para calcular la profundidad de los puntos al momento de construir el modelo 3D. Este parámetro debería ser constante para todas las imágenes tomadas con la misma cámara, pero se realizaron pequeñas variaciones de éste con respecto al ancho del sensor real, de manera de optimizar el resultado en función de esta variable.

### **3.2.2.1.3 Número de imágenes**

Otro parámetro de importancia es el número de imágenes que se le entregan al software, a pesar de que se toman 17 imágenes del iris no siempre es óptimo utilizarlas todas. Si las imágenes no son congruentes entre ellas pueden producir conflicto e incluso no permitir que se construya el modelo, por lo que el óptimo es tener una cantidad de imágenes que permita crear el modelo con el menor ruido posible.

### **3.2.2.2 Parámetros de salida**

Los parámetros de salida que se describirán a continuación son importantes para tener una noción de que tipo de resultado se obtuvo, permitiendo un análisis previo de estos antes realizar la apreciación visual del modelo.

#### **3.2.2.2.1 Número de nubes de puntos preliminares**

El software *PPT* realiza enlaces entre las imágenes creando nubes de puntos preliminares que luego son unidas para crear el modelo 3D final, se comprobó que el número de nubes preliminares creadas es un indicador útil para saber si el modelo 3D fue creado de buena manera, donde sí se obtuvieron 2 o menos nubes es altamente probable que el resultado final sea solo ruido.

#### **3.2.2.2.2 Número de puntos en el modelo**

Otro parámetro de importancia es el número de puntos que contiene el modelo final. Los modelos están constituidos por puntos en el espacio 3D, luego mientras más puntos tiene un modelo mayor es la información contenida en éste. Si este parámetro es cero se puede saber sin necesidad de mirar el modelo que el algoritmo falló. Sin embargo, es importante ser cuidadoso al momento de usar este parámetro ya que la cantidad de puntos también considera el ruido del modelo, por lo que puede ocurrir que un modelo con un número de puntos prometedor sea muy ruidoso.

#### **3.2.2.3 Variación del parámetro de entrada: Número de imágenes**

En un escenario ideal para analizar cuáles son las imágenes que producen el modelo 3D con más puntos y menor ruido, se construiría el modelo para cada combinación posible entre las 17 imágenes del conjunto y se analizaría la calidad de cada uno. Debido a que esto no es posible por la cantidad de tiempo que implicaría el procesamiento de los modelos y el análisis de estos, se recurrió a un algoritmo que busca optimizar el modelo tridimensional mediante la eliminación de las imágenes que entorpecen la creación del modelo, utilizando como medida del éxito el parámetro de salida “número de puntos del modelo” (Ver 0).

El código utilizado para esta tarea se encuentra en el Anexo G, este código funciona de manera recursiva iniciando con un conjunto de imágenes originales de  $n$  imágenes. El objetivo de

este método es analizar si una imagen es perjudicial para la construcción del modelo, por lo tanto, se elimina una imagen del conjunto de imágenes original y se construye el modelo 3D con el nuevo conjunto de  $n - 1$  imágenes. Esto se repite para cada una de las imágenes obteniéndose así  $n$  modelos construidos con  $n - 1$  imágenes. El siguiente paso es analizar cuál de estos  $n$  modelos obtuvo el mayor número de puntos, y en consecuencia, es un mejor modelo, escogiendo así el nuevo conjunto de imágenes base. El proceso se realiza recursivamente hasta que ya no quedan imágenes o hasta que todos los modelos creados tengan 0 puntos.

### 3.2.3 Resultados del modelamiento 3D

A continuación, se presentarán los resultados obtenidos al utilizar *PPT* para la construcción de modelos 3D, utilizando los diferentes conjuntos de imágenes obtenidas luego de los procesamientos y variando los parámetros de entrada. Los resultados serán presentados en el formato de tablas, que indican los parámetros de salida y una breve descripción de los modelos, y también se mostraran imágenes de los modelos más representativos. Los resultados obtenidos al utilizar las imágenes de la cámara 1 se pueden encontrar en el Anexo H.

El parámetro de escala de la imagen se mantuvo en 1 para todos los experimentos, ya que se privilegió la calidad de las imágenes de entrada por sobre la velocidad de procesamiento. En primer lugar se mostrarán los resultados para los diferentes procesamientos de imagen con el *CCD width* real de la cámara, indicado en las especificaciones técnicas en 3.1.1.3, y con las 17 imágenes del conjunto. Luego de ver cómo afectan las variaciones del *CCD width* original en cada procesamiento de imagen manteniendo las 17 imágenes. Finalmente se verá los resultados obtenidos al realizar el proceso de eliminación de imágenes explicado en 0 en el procesamiento de imágenes con el ancho de sensor que entregó el mejor resultado.

#### 3.2.3.1 Modelamiento de imágenes con *CCD width* original

En la Tabla 3 se aprecian los resultados obtenidos con la imagen original sin procesamiento y las imágenes con los cuatro procesamientos descritos. Se ve que el número de puntos obtenido por el modelo de las imágenes sin procesamiento, es más del quíntuple que el del modelo que obtuvo más puntos de entre los con imágenes procesadas. Esto se debe en gran medida a que las imágenes procesadas están encuadradas, por lo que todas ellas son de tamaño 900x900 píxeles mientras que la imagen sin procesar es de 2460x1848 píxeles. Por lo tanto, el número de puntos de estos modelos no es directamente comparable en términos de como se ve afectada la calidad del modelo.

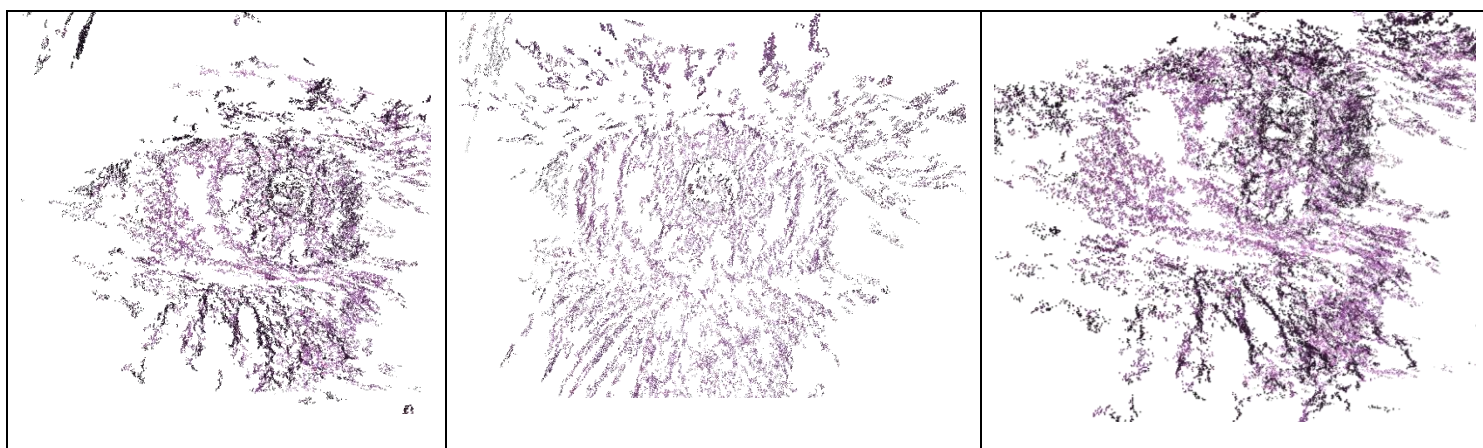
Sin embargo, el número de nubes preliminares si es comparable y se puede ver que los modelos con el mayor número de nubes son el modelo con imágenes sin procesamiento y él con las imágenes con el procesamiento *encuadre*, *suavizado*, *borrar pupila* y *ecualizado*, donde ambos consiguieron cuatro nubes. Cabe mencionar que si consideramos los parámetros de salida de los modelos de las imágenes con procesamiento, el conjunto con *encuadre*, *suavizado*, *borrar pupila* y *ecualizado* es el que obtuvo mayor número de puntos y nubes. Por otra parte, se tiene que todos los modelos obtenidos por las imágenes procesadas, son ruido con forma de cono. Este tipo de

ruido fue común en los resultados y no aporta información sobre el iris, esto se puede ver en Ilustración 35.

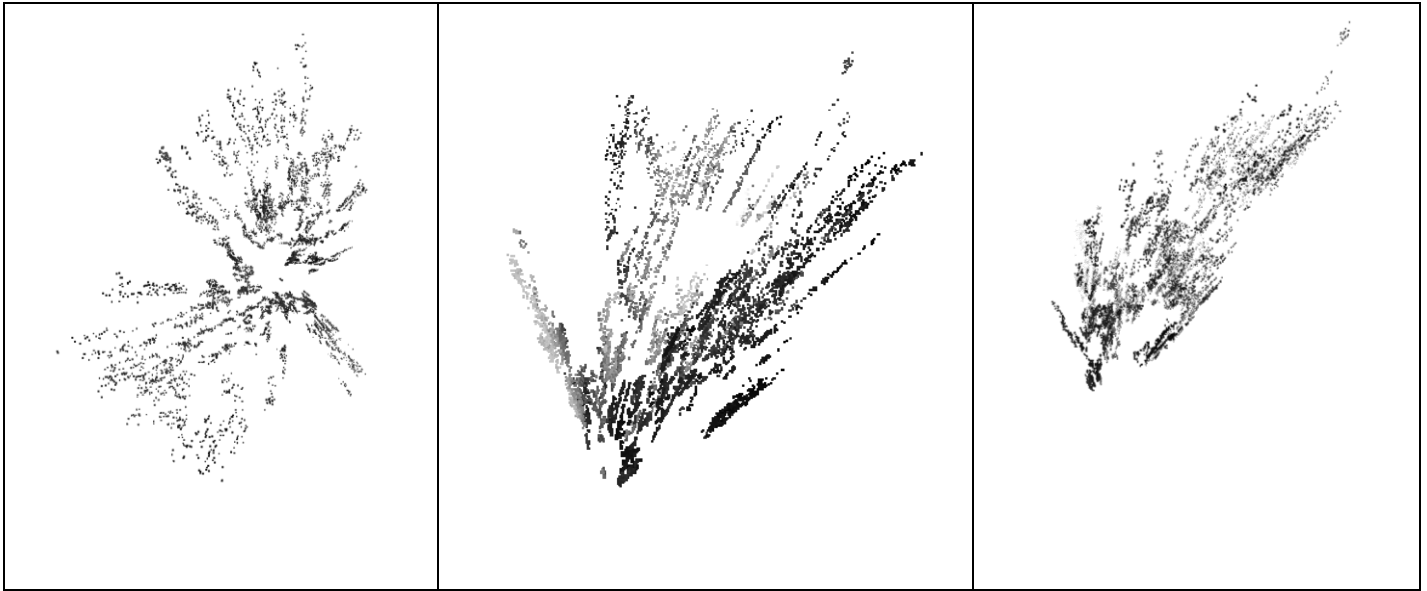
Mientras que el modelo del conjunto de imágenes sin procesamientos obtuvo un modelo del ojo con ruido. En la Ilustración 34 se puede apreciar como el modelo obtenido tiene la forma del ojo completo, incluyendo iris, pupila, esclerótica y pestañas. Por otra parte, en la tercera imagen se puede ver el modelo desde otro ángulo donde se aprecia que el modelo es ruidoso, especialmente en el área de las pestañas.

*Tabla 3: Resultados del número de puntos y número de nubes con CCD width original sin y con procesamiento.*

Iluminación	Procesamiento	CCD Width	N° Nubes Preliminares	N° Puntos	Descripción Modelo
<b>IR + blanca lateral</b>	Ninguno	3,04	4	62.870	Ojo ruidoso, más ruido en los bordes
	Encuadre	3,04	2	5.291	Ruido cono
	Encuadre y suavizado	3,04	2	8.465	Ruido cono
	Encuadre, suavizado y borrar pupila	3,04	3	6.266	Ruido cono
	Encuadre, suavizado, borrar pupila y ecualizado	3,04	4	11.222	Ruido cono



*Ilustración 34: Modelo 3D ruidoso del ojo sin procesamiento desde 3 ángulos diferentes.*



*Ilustración 35: Modelo ruido como desde 3 ángulos diferentes.*

Como se vio en los resultados, las imágenes con procesamiento no obtuvieron modelos del iris si no que solamente ruido, por otra parte el modelo obtenido por las imágenes sin procesamiento consigue construir un modelo pero este es ruidoso y con información del resto del ojo que no es útil. Por estas razones se varían los parámetros de entrada en busca de modelos para las imágenes con encuadre.

### **3.2.3.2 Modelamiento de imágenes con diferentes *CCD width***

En esta sección se mostrarán los resultados obtenidos al utilizar los *CCD width* del conjunto {2.4, 2.6, 2.8, 2.9, 3, 3.1, 3.2, 3.4, 3.6, 3.8, 4} en los diferentes conjuntos de imágenes obtenidos.

En la Tabla 4 se tiene que solo el modelo creado con *CCD Width* 2,8 se diferencia del resto en términos del número de nubes preliminares teniendo 5 en vez de 4. Por otra parte se puede apreciar una tendencia ascendente en el número de puntos a medida que disminuye el *CCD width*, siendo los modelos con menor y mayor *CCD width* los con mayor y menor número de puntos respectivamente. También se obtiene que el modelo con mayor número de puntos, supera al modelo obtenido con el mismo conjunto de imágenes en la sección anterior, por aproximadamente 10.000 puntos. Sin embargo, las descripciones muestran que los modelos no difieren de forma significativa para diferentes *CCD width*, donde todos los conjuntos de imágenes obtienen el modelo del ojo completo con ruido, como el visto en la Ilustración 34.

*Tabla 4: Resultados Imágenes sin procesamiento con diferentes CCD Width.*

Iluminación	Procesamiento	CCD Width	N° Nubes Preliminar	N° Puntos	Descripción Modelo
<b>IR + blanca lateral</b>	<b>Ninguno</b>	2,4	4	72.694	Ojo ruidoso, más ruidoso en los bordes
		2,6	4	63045	Ojo ruidoso, más ruidoso en los bordes
		2,8	5	68.516	Ojo ruidoso, más ruidoso en los bordes
		2,9	4	66.140	Ojo ruidoso, más ruidoso en los bordes
		3	4	65.544	Ojo ruidoso, más ruidoso en los bordes
		3,1	4	67.447	Ojo ruidoso, más ruidoso en los bordes
		3,2	4	65.273	Ojo ruidoso, más ruidoso en los bordes
		3,4	4	63.978	Ojo ruidoso, más ruidoso en los bordes
		3,6	4	64.851	Ojo ruidoso, más ruidoso en los bordes
		3,8	4	59.476	Ojo ruidoso, más ruidoso en los bordes
		4	4	59.394	Ojo ruidoso, más ruidoso en los bordes

En la Tabla 5 se muestra que para el conjunto de imágenes con el procesamiento de encuadrar, la variación del parámetro CCD width no tuvo un efecto significativo ni en el número de nubes preliminares ni en la descripción del modelo, obteniendo como resultado ruido como como el de la Ilustración 35. Por otra parte, el mayor número de puntos obtenidos en un modelo es de 6.939 utilizando CCD width 2,6, esto es 1648 puntos mayor que los obtenidos por el modelo con el mismo conjunto de imágenes visto en la Tabla 3.



*Tabla 5: Resultados Imágenes con encuadre diferentes CCD Width.*

Iluminación	Procesamiento	CCD Width	Nº Nubes Preliminar	Nº Puntos	Descripción Modelo
<b>IR + blanca lateral</b>	<b>Encuadre</b>	2,4	2	6.474	Ruido cono
		2,6	2	6.939	Ruido cono
		2,8	2	5.914	Ruido cono
		2,9	2	5.764	Ruido cono
		3	2	5.520	Ruido cono
		3,1	2	5.776	Ruido cono
		3,2	2	5.592	Ruido cono
		3,4	2	5.992	Ruido cono
		3,6	2	5.466	Ruido cono
		3,8	2	5.005	Ruido cono
		4	2	6.423	Ruido cono

Siguiendo la misma tendencia que el conjunto de imágenes con encuadre, los modelos del conjunto con encuadre y suavizado no muestran cambios ni en el número de nubes preliminares ni en la descripción del modelo para los diferentes CCD width. Por otra parte, el modelo que utilizó el CCD width 3,8 llegó a tener 10.508 puntos, lo que son 2.043 puntos de diferencia con respecto a su homólogo con el CCD width original de la cámara.

*Tabla 6: Resultados Imágenes con encuadre y suavizado diferentes para distintos valores de CCD Width.*

Iluminación	Procesamiento	CCD Width	Nº Nubes Preliminar	Nº Puntos	Descripción Modelo
<b>IR + blanca lateral</b>	<b>Encuadre y suavizado</b>	2,4	2	8.174	Ruido cono
		2,6	2	7.956	Ruido cono
		2,8	2	8.522	Ruido cono
		2,9	2	7.140	Ruido cono
		3	2	7.872	Ruido cono
		3,1	2	8.733	Ruido cono
		3,2	2	9.994	Ruido cono
		3,4	2	8.533	Ruido cono
		3,6	2	8.931	Ruido cono
		3,8	2	10.508	Ruido cono
		4	2	7.860	Ruido cono

En la Tabla 7 se muestran los resultados obtenidos para el conjunto de imágenes con encuadre, suavizado y borrar pupila. Se aprecia que el conjunto de imágenes que utilizó el CCD width 2,4 no consigue construir un modelo, obteniendo 0 puntos. Sin embargo, el modelo obtuvo un número de nubes preliminar de 4, esto significa que a pesar de conseguir un número de nubes suficiente para construir algún modelo, estas nubes no fueron congruentes por lo que el algoritmo falló. El resto de los elementos de la Tabla 7 muestran ruido cono en la descripción del modelo al igual que el modelo con width original de la cámara, pero en este caso se obtuvo un modelo con

10.755 puntos lo que es 4.520 puntos más que lo obtenido previamente. También existen casos con 4 nubes de puntos preliminares, por lo que se puede apreciar una mejora en términos de los parámetros de salida.

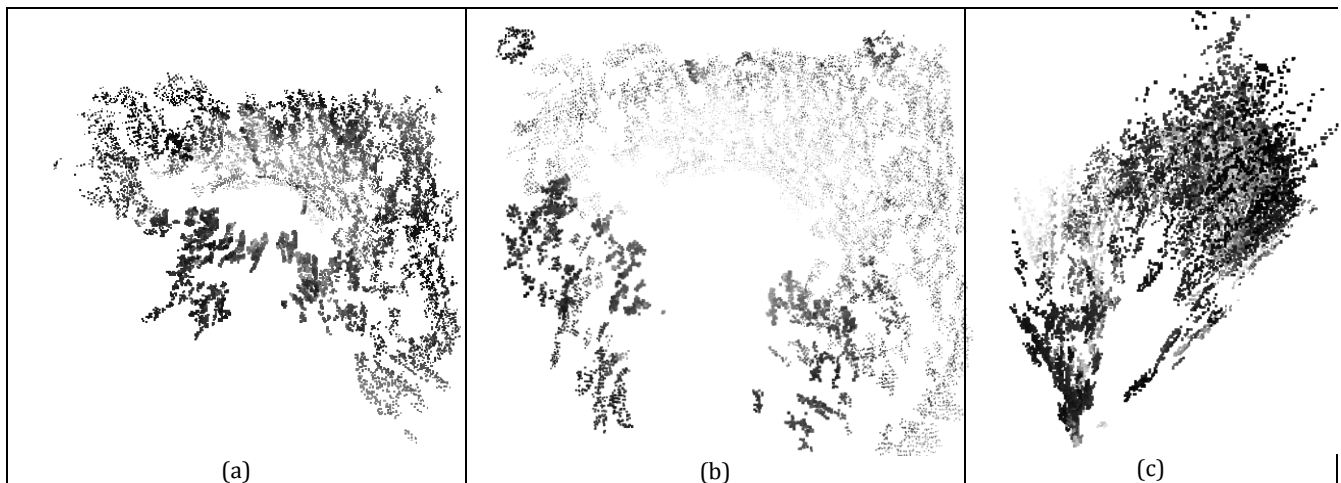
*Tabla 7: Resultados Imágenes con encuadre, suavizado y borrar pupila para diferentes CCD Width.*

Iluminación	Procesamiento	CCD Width	N° Nubes Preliminar	N° Puntos	Descripción Modelo
<b>IR + blanca lateral</b>	<b>encuadre, suavizado y borrar pupila</b>	2,4	4	0	Sin modelo
		2,6	4	10.775	Ruido cono
		2,8	3	3.432	Ruido cono
		2,9	3	4.864	Ruido cono
		3	3	4.418	Ruido cono
		3,1	3	4.167	Ruido cono
		3,2	3	10.786	Ruido cono
		3,4	4	9.516	Ruido cono
		3,6	3	7.442	Ruido cono
		3,8	3	8.050	Ruido cono
		4	3	8.327	Ruido cono

Finalmente, en la Tabla 8, que muestra los resultados para el conjunto de imágenes con Encuadre, suavizado, borrar pupila y ecualizado. Se ven las primeras mejoras en las descripciones del modelo al variar el CCD width. Los modelos construidos con los CCD width 3, 3,8 y 4 tienen modelos donde se pueden visualizar una sección del iris entre el ruido cono. En la Ilustración 36 se muestran imágenes de uno de estos modelos, es difícil apreciar la sección del iris en estas imágenes, pero en la primera y segunda imagen se puede ver una semicircunferencia en el centro, esta semicircunferencia es el borde de la pupila que fue cortada de las imágenes. En la tercera imagen se ve como la sección del iris se encuentra ocluida por ruido cono desde otros ángulos. Por otra parte, se ve que los tres modelos que obtuvieron este modelo también son los que tienen más puntos. El modelo con mayor cantidad de puntos es el construido con el CCD width 3, obteniendo 19.779 puntos, lo que es 8.557 más puntos que los obtenidos por el modelo con CCD width original de la cámara.

**Tabla 8: Resultados de Imágenes con encuadre, suavizado, borrar pupila y ecualizado para diferentes valores de CCD Width.**

Iluminación	Procesamiento	CCD Width	N° Nubes Preliminar	N° Puntos	Descripción Modelo
<b>IR + blanca lateral</b>	<b>Encuadre, suavizado, borrar pupila y ecualizado</b>	2,4	4	10.475	Ruido cono
		2,6	4	7.650	Ruido cono
		2,8	4	13.225	Ruido cono
		2,9	4	7.124	Ruido cono
		3	4	19.779	Sección del iris visible, con Ruido cono
		3,1	4	2.629	Ruido cono
		3,2	4	12.428	Ruido cono
		3,4	4	15.910	Ruido cono
		3,6	4	12.598	Ruido cono
		3,8	4	18.794	Sección del iris visible, con Ruido cono
		4	4	19.071	sección del iris visible, con ruido cono



**Ilustración 36: Modelo de sección del iris con ruido cono. En (a) se muestra el modelo frontalmente. En (b) se muestra el modelo frontalmente con acercamiento a la zona del iris. En (c) se muestra el modelo lateralmente donde solo se aprecia el ruido cono.**

Estos resultados muestran que la variación del CCD width puede tener efectos positivos sobre los modelos, ya que en todos los casos probados existe al menos un caso donde se obtienen mejores parámetros de salida que con el CCD width original. Sin embargo, el conjunto que obtuvo la mayor

mejora fue el modelo con el procesamiento *encuadre, suavizado, borrar pupila y ecualizado*, donde se obtuvo un modelo donde se conseguía distinguir el iris entre el ruido.

Cabe destacar, que se realizaron pruebas con cada uno de los componentes de procesamiento, es decir, encuadre, ecualización, suavizado y borrar pupila. Y que la combinación *encuadre, suavizado, borrar pupila y ecualizado* obtiene resultados superiores a cualquiera de sus componentes de procesamiento por separado.

### **3.2.3.3 Modelamiento variando la cantidad de imágenes**

Se investigó el utilizar distinto número de imágenes 2D para general el modelo 3D del iris. No siempre es conveniente utilizar las 17 imágenes tomadas para obtener el modelo óptimo en términos de ruido y densidad de puntos. Por lo tanto, en esta sección se presentan algunos de los resultados obtenidos al eliminar imágenes del escenario con el procesamiento de imágenes que obtuvo la mayor cantidad de puntos en las secciones anteriores, utilizando el método visto en 0. Se eliminaron imágenes del conjunto de imágenes con encuadre, suavizado, borrar pupila y ecualizado y se utilizará el CCD width 3. Para indicar las imágenes eliminadas éstas fueron enumeradas de 0 a 16 partiendo por las imágenes con ángulo de enfoque de  $-20^\circ$  hasta las con ángulo de enfoque de  $20^\circ$ .

En la Tabla 9 se muestran resultados de algunos de los casos en que se obtuvieron modelos interesantes, es decir se dejaron afuera los casos en que el modelo no se consiguió construir o solo se obtenía ruido cono. Los resultados en la tabla están ordenados por cantidad de imágenes eliminadas, partiendo con modelos contruidos al eliminar dos imágenes y termina con modelos al que se le eliminaron 13 imágenes dejando solo 4. Por otra parte, se consiguieron modelos con 6 tipos de descripciones: sección del iris con ruido cono,  $\frac{1}{2}$  del iris con ruido cono,  $\frac{1}{2}$  del iris ruidoso,  $\frac{3}{4}$  del iris ruidoso,  $\frac{3}{4}$  del iris e iris.

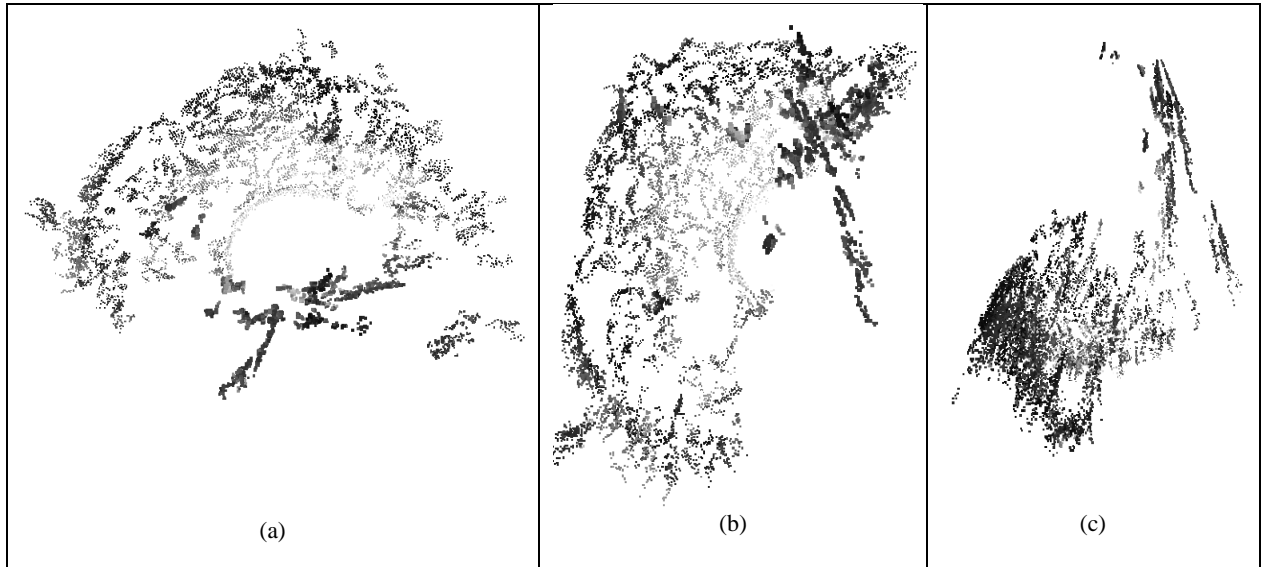
**Tabla 9: Resultados en número de puntos y nubes al eliminar imágenes con encuadre, suavizado, borrar pupilas y ecualizado con CCD width 3.**

Iluminación	Procesamiento	CCD Width	Imágenes Eliminadas	N° Nubes Preliminar	N° Puntos	Modelo
<b>IR + Blanca lateral</b>	<b>Encuadre, suavizado, Borrar pupila y Ecualizado</b>	3	13, 1	3	10664	Sección del iris visible, con ruido cono
		3	13, 11	3	12706	½ del iris visible, con ruido cono
		3	13, 11, 9	5	14038	Sección del iris visible, con ruido cono
		3	13, 11, 14	4	18891	½ del iris ruidoso
		3	13, 11, 14, 9	5	20230	¾ del iris ruidoso
		3	13, 11, 14, 9, 4	4	16837	¾ del iris ruidoso
		3	13, 11, 14, 9, 4, 15, 7	4	12610	½ del iris ruidoso
		3	13, 11, 14, 9, 4, 15, 7, 8, 3	4	21067	Modelo ¾ del iris
		3	13, 11, 14, 9, 4, 15, 7, 8, 16	4	15618	¾ del iris ruidoso
		3	13, 11, 14, 9, 4, 15, 7, 8, 3, 16	4	18297	Modelo ¾ del iris
		3	13, 11, 14, 9, 4, 15, 7, 8, 3, 12	5	21187	Modelo del iris
		3	13, 11, 14, 9, 4, 15, 7, 8, 3, 12, 5	5	23694	Modelo del iris
		3	13, 11, 14, 9, 4, 15, 7, 8, 3, 12, 6	5	13453	Modelo ¾ del iris
		3	13, 11, 14, 9, 4, 15, 7, 8, 3, 12, 6, 16	4	14730	Modelo ¾ del iris

En la Tabla 9 se muestran resultados de dos modelos con la descripción *sección del iris visible con ruido cono*, estos modelos son como el visto en la Ilustración 36. Fueron obtenidos al eliminar la imagen {13, 1} y al eliminar las imágenes {13, 11, 9}. Se puede ver que el segundo

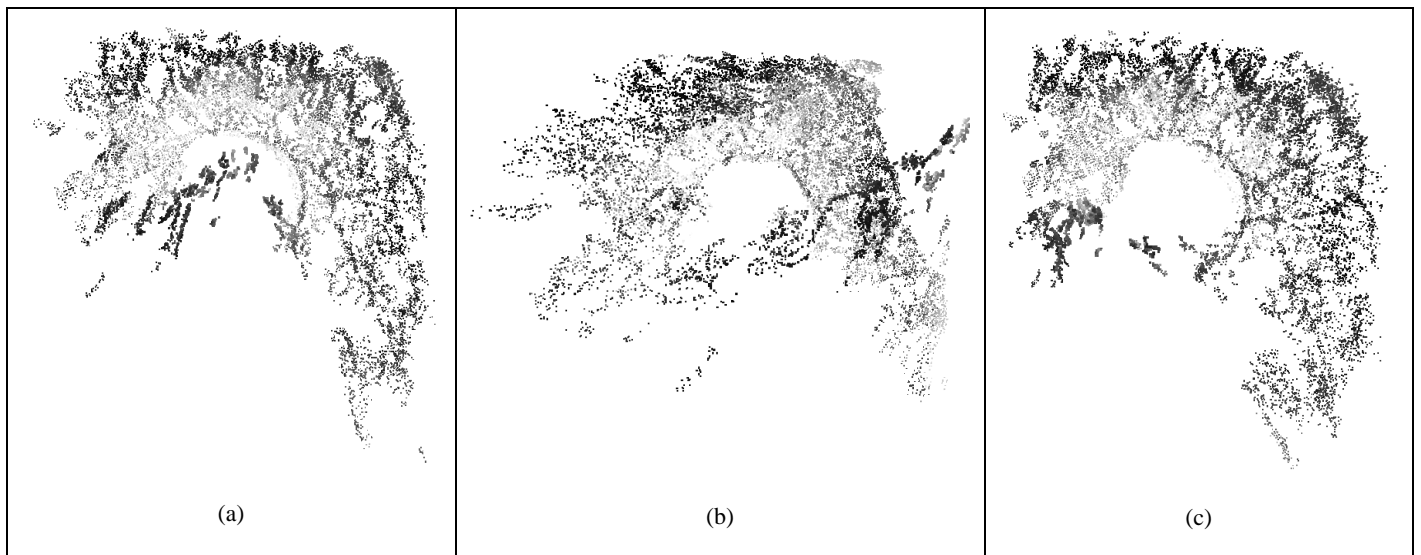
caso tiene 2 nubes preliminares y 3.374 puntos más que cuando se eliminaron solo dos imágenes. Este es un caso en que a pesar de que los parámetros de salida son más prometedores, el resultado no es mejor al visualizarlo.

Por otra parte se obtuvo un modelo con  $\frac{1}{2}$  del iris visible con ruido cono como el de la Ilustración 37. En las dos primeras imágenes se puede ver la mitad de una circunferencia en el centro. Esta circunferencia corresponde al borde de la pupila cortada. En la última imagen se tiene una imagen del modelo visto desde un ángulo lateral donde se aprecia que éste se encuentra sumergido en ruido cono. Sus parámetros de salida son tres nubes preliminares y 12.706 puntos.



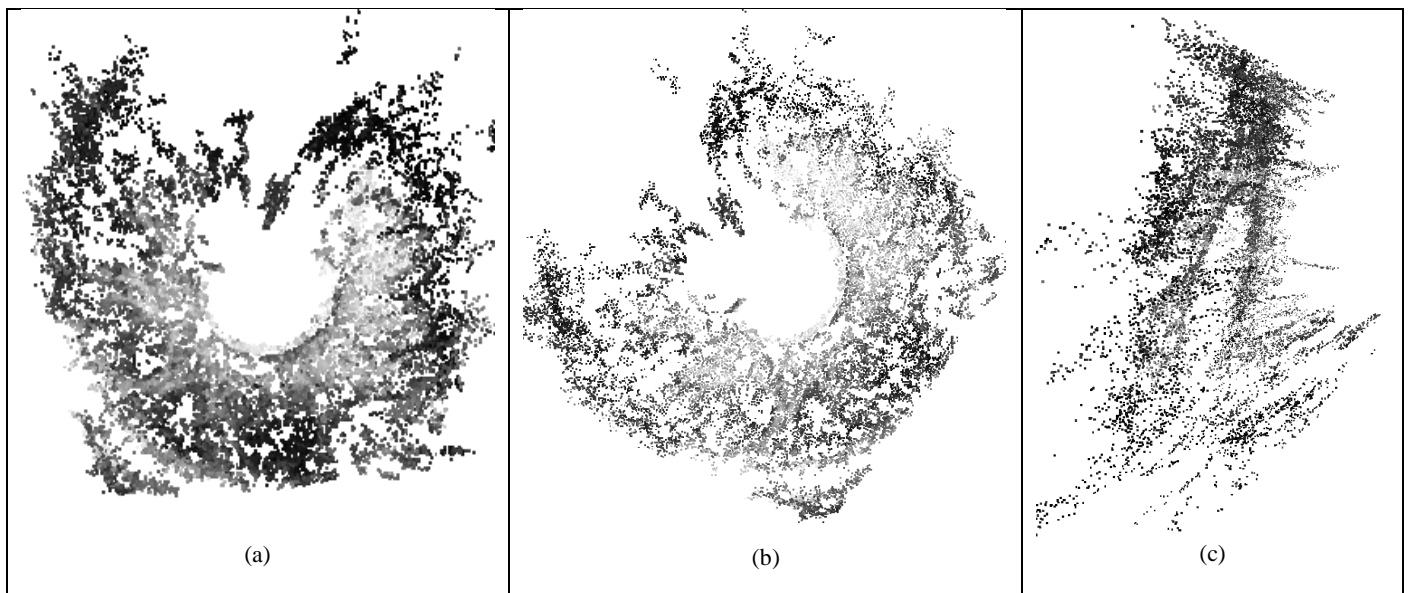
**Ilustración 37: Modelo 1/2 iris con ruido cono. En (a) y (b) se muestra la cara frontal del modelo, donde se ve la mitad del iris, desde diferentes ángulos. En (c) se muestra el modelo desde la cara lateral donde solo se ve ruido cono.**

Siguiendo con el modelo con  $\frac{1}{2}$  del iris ruidoso, se tiene que éste obtuvo 2 modelos y que existe ruido pero no del tipo ruido cono. Se puede ver en la Ilustración 38 como el iris comienza a verse con más claridad y como el ruido disminuye en comparación con la Ilustración 37. De estos dos modelos, el que obtuvo menor cantidad de puntos fue en el que se eliminaron las imágenes {13, 11, 14, 9, 4, 5, 7, 15} con 11.574 puntos. Por otra parte, el que logra la mayor cantidad de puntos fue en el que se eliminaron las imágenes {13, 11, 14} obteniendo 18.891. Cabe destacar que para el modelo resultante de un menor número de imágenes se obtuvo una menor cantidad de puntos para el mismo tipo de modelo, lo que implica que en este caso un menor número de puntos significa menor ruido.



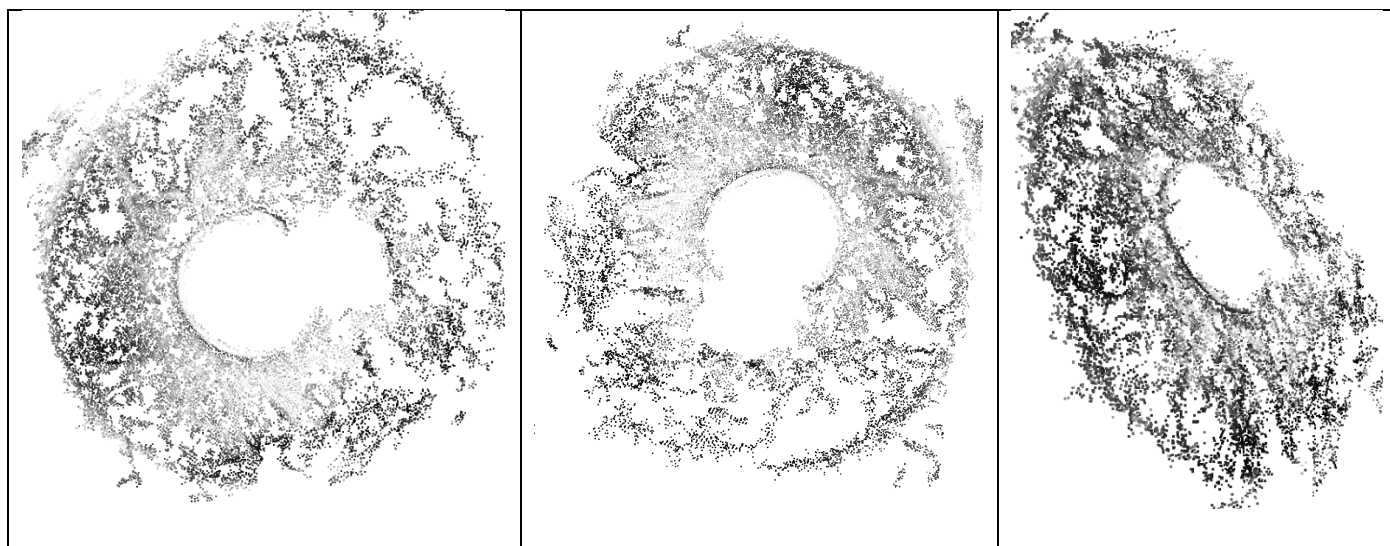
**Ilustración 38: Modelo 1/2 iris ruidoso. En (a) se muestra el modelo desde la parte baja del iris. En (b) se muestra desde un ángulo lateral izquierdo. En (c) se muestra desde un ángulo derecho.**

Mientras tanto el modelo con la descripción  $\frac{3}{4}$  del iris ruidoso se obtuvo por 3 conjuntos de imágenes, en los que se eliminó 4, 5 y 9 imágenes. En este tipo de modelos se comienza a apreciar la forma del iris como se ve en la Ilustración 39, ciertamente sigue existiendo bastante ruido como se ve en la tercera imagen, pero en la primera y segunda imagen se comienzan a mostrar ciertos patrones en el iris. Por otra parte el conjunto que eliminó 4 imágenes fue el que obtuvo mayor cantidad de puntos, 20.230 puntos, mientras que el modelo que eliminó 9 imágenes fue el resultó con menor cantidad de puntos, 15.618 puntos. Esto, al igual que en el tipo de modelo anterior, indica que el utilizar menos imágenes se obtiene el mismo tipo de modelos pero con menos ruido.



**Ilustración 39: Modelo 3/4 iris ruidoso. En (a) y (b) se muestra el modelo del iris desde el frente. En (c) se muestra el modelo desde el lado donde se aprecia el ruido.**

Existen cuatro modelos que obtuvieron la descripción *Modelo 3/4 del iris*. Acerca de las imágenes resultantes del modelo, en la Ilustración 40 se visualiza como el iris ya tiene una forma completamente definida a pesar de que falta un sector. En la primera y segunda imagen se puede ver como existen patrones en las zonas donde el iris está bien definido. En la tercera se puede ver que sigue existiendo cierto grado de ruido, pero a diferencia de los modelos anteriores en este se puede ver el volumen del iris en vez de solo ruido. En cuanto al número de imágenes, estos modelos fueron obtenidos al eliminar 9, 10, 11 y 12 imágenes. Cabe destacar que uno de estos modelos se obtiene con tan solo 5 imágenes que es la menor cantidad de imágenes con las que se consiguió construir un modelo, que no fuera solo ruido. Por otra parte, el modelo con menor cantidad de puntos resultó al eliminar las 11 imágenes {13, 11, 14, 9, 4, 15, 7, 8, 3, 12, 6} y obtuvo 13.453 puntos. Mientras que él que arroja la mayor cantidad de puntos fue el que eliminó las 9 imágenes {13, 11, 14, 9, 4, 15, 7, 8, 3} obteniendo 21067 puntos.



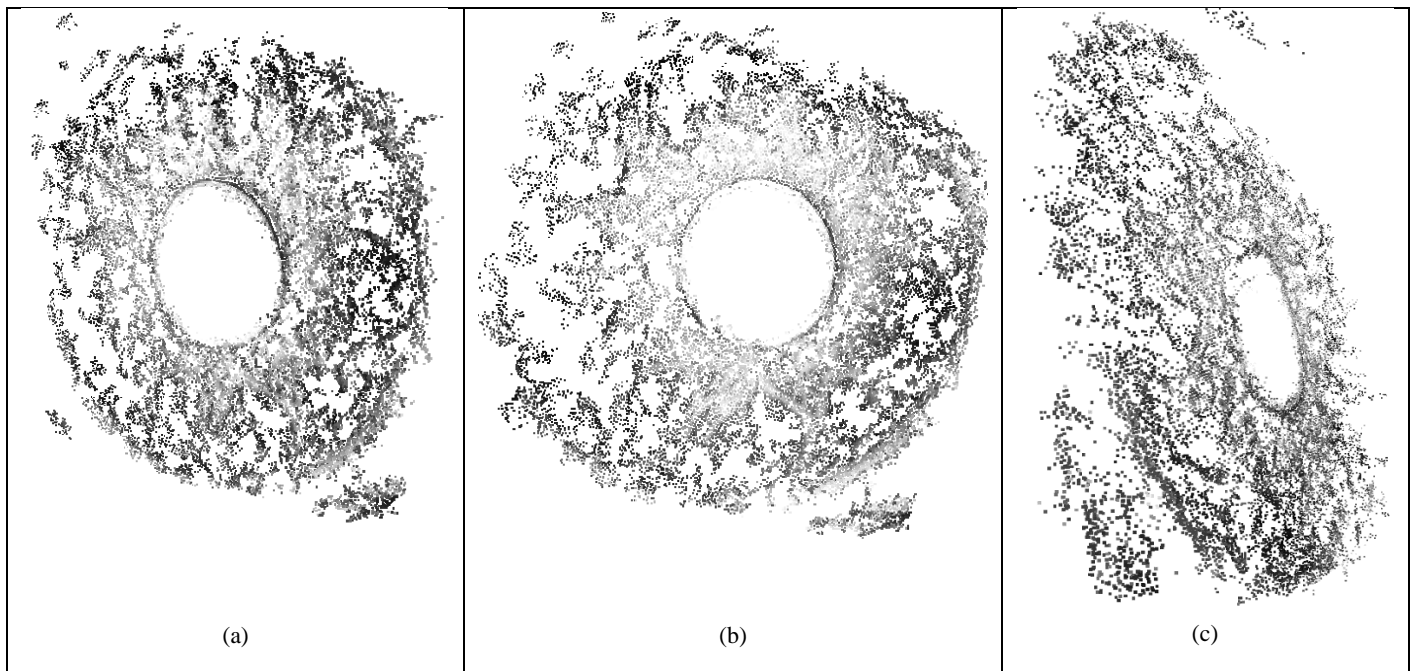
*Ilustración 40: Modelo 3/4 iris desde diferentes ángulos con 1/4 del iris ruidoso.*

Finalmente se logra un modelo donde se puede ver la silueta completa del iris como se muestra en la Ilustración 41. En la primera y segunda imagen se ve el iris de frente donde se puede observar que existe una mayor densidad de puntos en las cercanías de la pupila y se comienza a perder densidad en los bordes del iris. Esto se debe en gran medida a que existe una pérdida de definición y aumento del ruido en los bordes del iris en las imágenes usadas, como lo muestra la Ilustración 33. Por otra parte, se alcanzan a apreciar texturas y algunos de los patrones del iris que se ven las imágenes 2D, en el sector central del modelo 3D. Por último en la tercera imagen se ve que el modelo ya contiene una forma de semiesfera como debe ser para un iris.

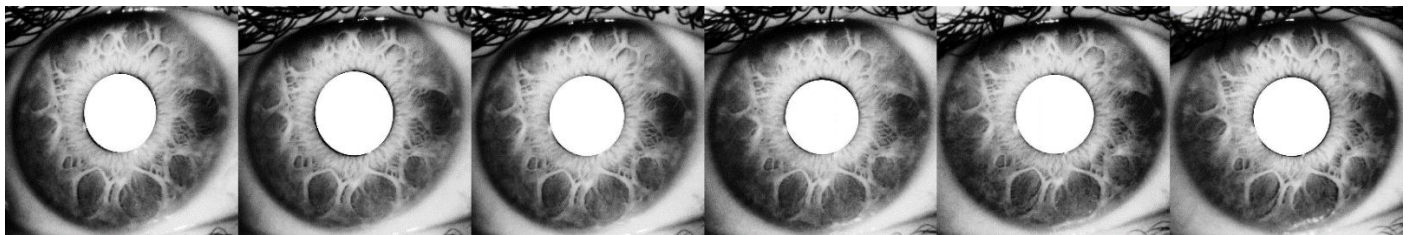
Con respecto a los conjuntos de imágenes que lograron este tipo de modelos, se encontró que fueron los dos obtenidos al eliminar 10 y 11 imágenes, respectivamente. Más aun el conjunto con menor cantidad de imágenes que resultó en este modelo fue el que eliminó las imágenes {13, 11, 14, 9, 4, 15, 7, 8, 3, 12, 5}. Por lo tanto, el conjunto {0, 1, 2, 6, 10, 16}, que se puede ver en la Ilustración 42, es el menor conjunto de imágenes que obtuvo el modelo del iris completo con la mejor



resolución. Es interesante destacar que las imágenes del conjunto se encuentran distribuidas en el rango de ángulos de tal manera que al menos se tiene la imagen con el menor ángulo posible, la imagen con el mayor ángulo posible y algunas imágenes centrales. Por otra parte se puede apreciar que este conjunto de imágenes muestra en detalle los patrones del iris y contiene pocas oclusiones en el iris. Finalmente el modelo en el que se eliminaron 11 imágenes obtuvo 23.694 puntos, mientras en el que se eliminaron 10 obtuvo 21.187 puntos. De estos resultados se desprende que el modelo con mayor cantidad de puntos y mayor parecido visual al iris, fue el obtenido al utilizar el procesamiento de imágenes *encuadre, suavizado, borrar pupila y ecualizado*, un CCD width igual a 3 y las imágenes {0, 1, 2, 6, 10, 16}.



**Ilustración 41: Modelo iris.** En (a) y (b) se muestra el modelo frontalmente donde se aprecian las texturas. En (c) se muestra el modelo lateralmente donde se aprecia la forma del iris.



**Ilustración 42: Menor conjunto de imágenes 2D que permiten generar un modelo del iris en 3D.**

De estos resultados podemos analizar que el parámetro número de puntos puede implicar diferentes características en el modelo. En primer lugar se ve que los modelos que muestran más partes del iris tienen una mayor cantidad de puntos, en el caso del iris completo los modelos no bajan de los 20.000 puntos. Sin embargo, modelos con más ruido contienen también más puntos,

encontrando modelos del tipo *1/2 del iris ruidoso* que llegan a tener hasta 18.891 puntos. También es interesante analizar que si en un mismo tipo de modelo se utilizan menos imágenes, la cantidad de puntos disminuye junto con la cantidad de ruido. Es por esto que este parámetro es útil para ver el potencial de un modelo, ya que se sabe que un buen modelo debe tener una alta cantidad de puntos pero siempre un modelo que tiene muchos puntos será necesariamente un buen modelo. Por otra parte, siguen existiendo excepciones como el caso en que se obtuvo un modelo con la descripción *Modelo 3/4 del iris* con tan solo 13.453 puntos.

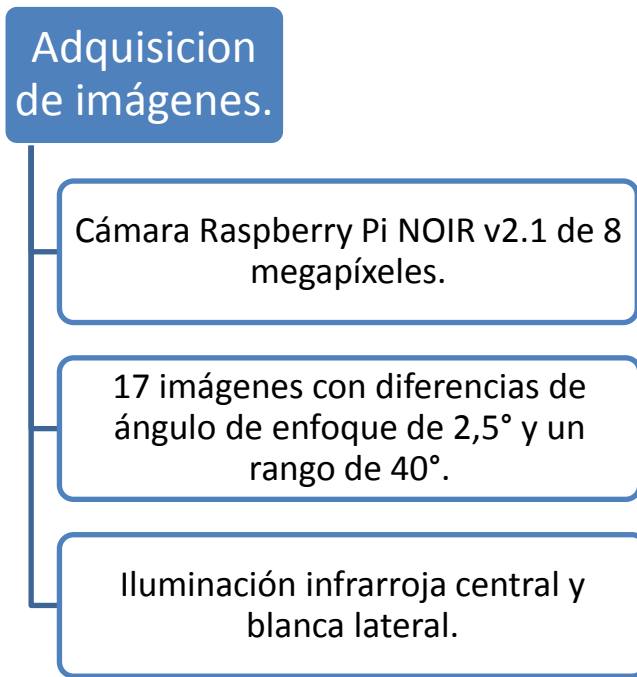
En el caso del número de nubes preliminares se tiene una menor precisión para definir las características del modelo, aunque se puede apreciar que por lo general los modelos que muestran un área mayor del iris y con menos ruido, obtienen también una mayor cantidad de nubes preliminares. Pero se tienen excepciones como el caso en el que se eliminaron las imágenes {13, 11, 9} y se obtuvieron 5 nubes preliminares, al igual que en los casos en el que el modelo muestra el iris completo, pero en cambio solo se obtuvo una *sección del iris visible con ruido cono*.

### **3.3 Método resultante**

De los resultados obtenidos al combinar diferentes escenarios, es decir modelos de cámaras, tipos de iluminación, procesamientos de imágenes y parámetros de modelamiento 3D. Surge el método para el modelamiento 3D del iris, que fue capaz de entregar un modelo del iris en el que se reconoce claramente su forma, y que contiene sectores donde se distinguen patrones y texturas de éste. A continuación se describen los escenarios escogidos para las tres etapas del método resultante: adquisición de imágenes, procesamiento de imágenes y modelamiento 3D.

#### **3.3.1 Adquisición de imágenes del método resultante**

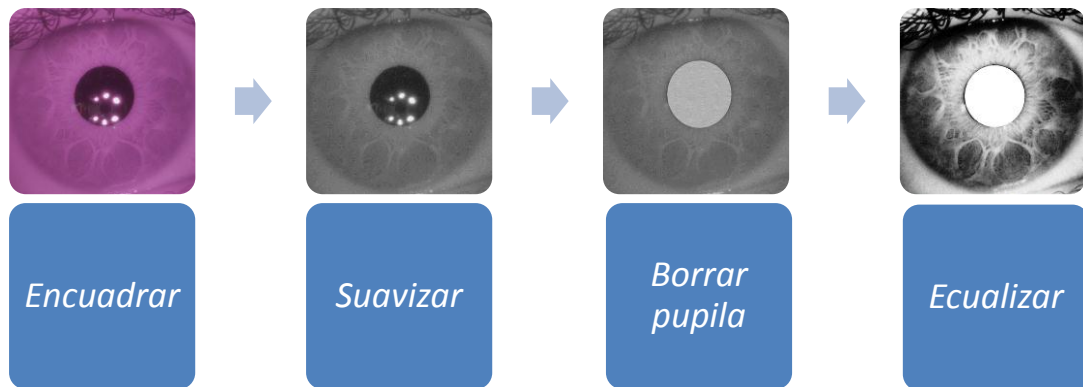
Para la adquisición de imágenes se utiliza el sistema de adquisición de imágenes presentado en 3.1, escogiendo los escenarios que se presentan en la Ilustración 43.



*Ilustración 43: Características del sistema de adquisición de imágenes utilizadas en el método resultante.*

### 3.3.2 Procesamiento de imágenes del método resultante

Una vez obtenidas las imágenes del iris, el siguiente paso es el procesamiento de imágenes. En los resultados obtenidos, se muestra que la combinación de procesamientos de imágenes que obtiene los modelos 3D de mejor calidad es la mostrada en la Ilustración 44, siendo esta la combinación que se utiliza en el método resultante.

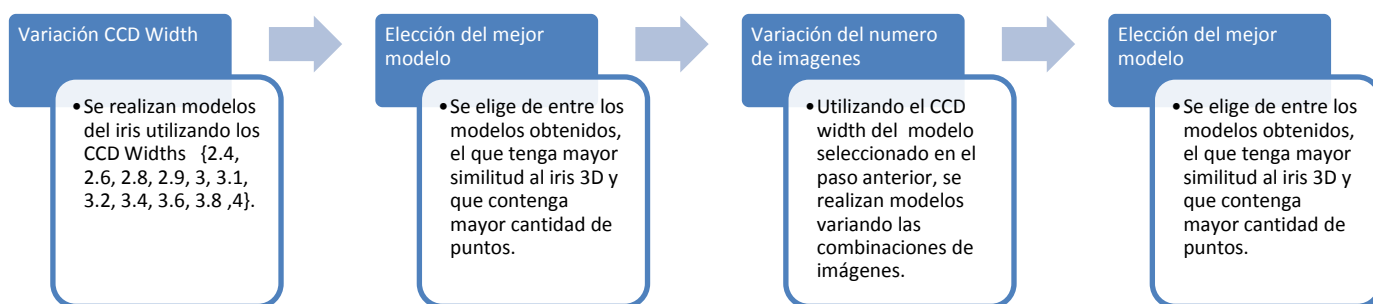


*Ilustración 44: Combinación de procesamientos de imágenes utilizada en el método resultante.*

### 3.3.3 Modelamiento 3D del método resultante

Finalmente se debe realizar el modelamiento 3D del iris en base a las imágenes procesadas. En el algoritmo de modelamiento 3D existen diferentes parámetros que pueden ser variados para

la obtención de un buen modelo. En 3.2.3 se realizaron múltiples modelos, variando el CCD Width y el número de imágenes como se explica en la Ilustración 45. De esta forma se logró modelar el iris exitosamente, por lo que es parte del método resultante.



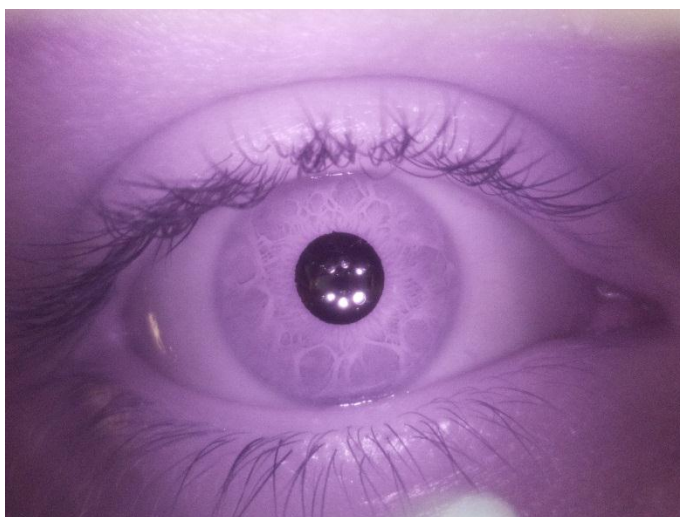
*Ilustración 45: Metodología de variación de parámetros para el modelamiento 3D.*

## 4 VALIDACIÓN DEL MÉTODO

Para analizar qué tan generalizable es el método obtenido, es decir analizar cómo se comporta al probar con conjuntos de imágenes diferentes a los utilizados para la obtención del método, se realizó la siguiente validación. Se tomaron 10 nuevos conjuntos de imágenes, del iris ya utilizado en las etapas previas del trabajo, y se tomó dos conjunto de imágenes de un iris nuevo. En adelante se hará referencia a éstos como Iris 1 e Iris 2 respectivamente. A continuación se muestran los resultados de aplicar el método visto en 3.3, en los conjuntos de validación.

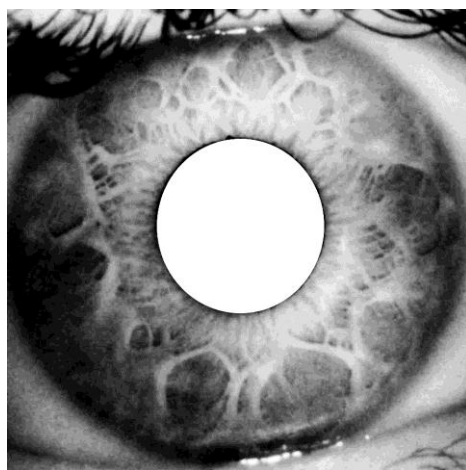
### 4.1 Validación con imágenes de Iris 1

Se tomaron 10 nuevos conjuntos de imágenes del Iris 1 con el sistema de adquisición de imágenes descrito en 3.3.1. Obteniendo imágenes como la que se ve en la Ilustración 46. Esto, con el objetivo de analizar cómo se comporta el método resultante, al ser aplicado varias veces al mismo iris. Los 10 conjuntos de imágenes tomados se pueden encontrar en el Anexo I.1.



*Ilustración 46: Ejemplo imagen del Iris 1 para validación, sin procesamientos.*

El siguiente paso es realizar los procesamientos de imágenes *encuadre*, *suavizado*, *borrar pupila* y *ecualizado*, de los que se obtienen imágenes como la que se ve en la Ilustración 47.



*Ilustración 47: Ejemplo imagen del Iris 1 para validación, con encuadre, suavizado, borrar pupila y ecualizado.*

Luego, para cada uno de los 10 conjuntos se construyeron modelos 3D con los CCD width {2.4, 2.6, 2.8, 2.9, 3, 3.1, 3.2, 3.4, 3.6, 3.8, 4}, de estos modelos se escogió el con mejor descripción visual o mayor cantidad de puntos, para cada conjunto de imágenes.

**Tabla 10: Modelos que entregaron la mejor descripción del modelo o mayor cantidad de puntos, al variar el CCD width para cada conjunto de validación del Iris 1.**

Conjunto	Procesamientos	CCD Width	N° Nubes Preliminares	Puntos	Descripción Modelo
Iris_1_1	Encuadre, suavizado, Borrar pupila y Ecuilizado	2,6	5	6581	ruido cono
Iris_1_2		4	4	8252	ruido cono
Iris_1_3		4	2	8924	ruido cono
Iris_1_4		3,1	4	24029	modelo iris
Iris_1_5		3,2	2	8688	ruido cono
Iris_1_6		2,9	4	7942	ruido cono
Iris_1_7		2,8	3	7031	ruido cono
Iris_1_8		2,4	2	10085	ruido cono
Iris_1_9		3,2	5	32850	modelo iris
Iris_1_10		4	2	7860	ruido cono

En la Tabla 10 se muestra la descripción de los modelos escogidos al variar el CCD width en cada conjunto. Se puede ver que existen grandes diferencias de calidad de modelo, entre los modelos obtenidos para cada conjunto. Por un lado los modelos obtenidos por los conjuntos Iris\_1\_4 e Iris\_1\_9 tienen más de 20.000 puntos, y consiguen construir modelos del tipo *modelo iris* como el de la Ilustración 41. Cabe destacar que estos conjuntos consiguen la construcción de un buen modelo del iris sin necesidad de realizar la variación del número de imágenes. Mientras que el resto de los modelos tienen una cantidad de puntos entre los 5.000 y 11.000 puntos, y solo consiguen modelos del tipo *ruido cono* como el de la Ilustración 35. Los resultados obtenidos al variar el CCD width en cada conjunto de validación del Iris 1, se pueden encontrar en el Anexo I.2.

Finalmente, para cada conjunto de imágenes, se utiliza el CCD width que entrego el modelo con mayor cantidad de puntos. Y se modela variando el número de imágenes como se explica en 3.2.2.3.

Tabla 11: Modelos con mejor descripción de modelos de cada conjunto de validación del Iris 1.

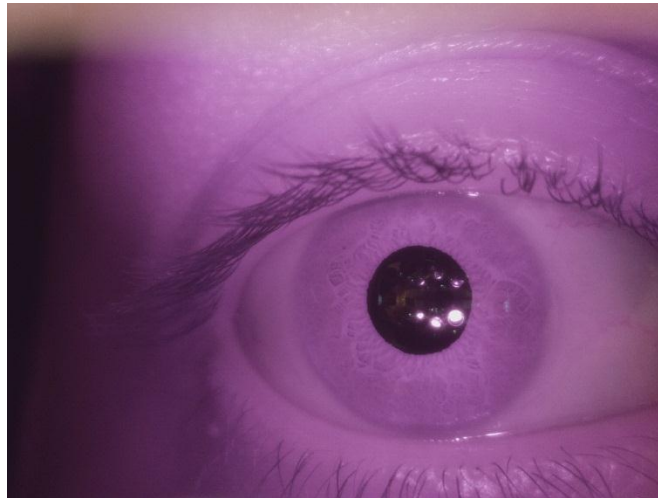
Conjunto	Procesamiento	Imágenes eliminadas	CCD Width	N° Nubes Preliminares	Puntos	Descripción Modelo
Iris_1_1	Encuadre, suavizado, Borrar pupila y Ecuilizado	12	2,6	3	27986	Modelo iris
Iris_1_2		11, 10, 12, 5, 9, 8, 6, 13, 1	4	4	22613	Modelo iris
Iris_1_3		13	4	2	11411	Ruido cono
Iris_1_4		13, 3, 2, 15, 7, 14	3,1	4	23880	Modelo iris
Iris_1_5		4, 3, 13	3,2	2	15666	½ iris ruido cono
Iris_1_6		11, 13, 1, 9, 12	2,9	4	13222	¾ iris muy ruidoso
Iris_1_7		0, 7, 10, 5, 2	2,8	2	13383	½ iris muy ruidoso
Iris_1_8		16, 8, 9	2,4	5	20977	Modelo iris ruidoso
Iris_1_9			3,2	5	32850	Modelo iris
Iris_1_10		4, 15	4	3	24646	Modelo iris ruidoso

En la Tabla 11 se muestra las características de los modelos con mejor descripción visual para cada modelo de validación. Salta a la vista que el conjunto Iris\_1\_9 no tiene imágenes eliminadas, esto se debe a que su modelo con mayor similitud al iris es el obtenido sin eliminar imágenes. Por otra parte se aprecia en la tabla que, 4 de los conjuntos de validación obtienen la descripción *Modelo iris*, es decir la con mayor similitud al iris. Seguidamente 2 de los conjuntos obtienen la descripción *Modelo iris ruidoso*, la cual indica que aún se aprecia el iris en su totalidad pero existe ruido en el modelo. A continuación hay 3 conjuntos que obtienen modelos con secciones del iris ruidoso. Finalmente hubo dos conjuntos que obtuvieron modelos con la descripción *ruido cono*, es decir, no obtuvieron nada que se asimilara al iris. Las tablas con las descripciones de los modelos, que fueron construidos al variar el número de imágenes en cada conjunto de validación del Iris 1, se pueden encontrar en el Anexo I.3.

De estos resultados se desprende que el método resultante no siempre consigue la construcción de un modelo 3D del iris. Además, se tiene que, a pesar de ser el mismo iris al que se le toman las imágenes, la efectividad del método varía entre cada uno. Por otra parte, se aprecia que en la mayoría de los casos, el 80% de los conjuntos evaluados, se obtiene algún tipo de modelo del iris.

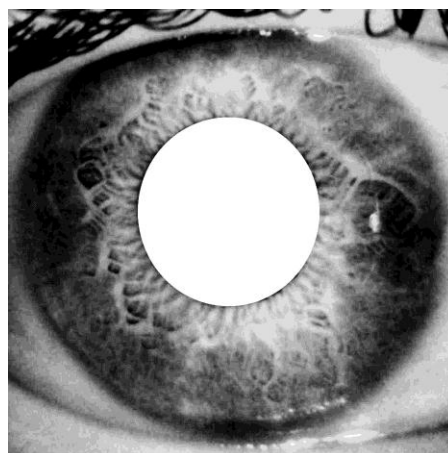
## 4.2 Validación con imágenes de Iris 2

Se tomaron 2 conjuntos de imágenes del Iris 2 con el sistema de adquisición de imágenes descrito en 3.3.1, obteniendo imágenes como la que se ve en la Ilustración 48. Las imágenes de los dos conjuntos se pueden encontrar en el Anexo I.4.



*Ilustración 48: Ejemplo imagen del Iris 2 para validación, sin procesamientos.*

Luego se realizó el mismo proceso descrito para la validación con las imágenes del Iris 1. Obteniendo: Imágenes como las de la Ilustración 49 al realizar el procesamiento *encuadre*, *suavizado*, *borrar pupila* y *ecualizado*; La Tabla 12 al seleccionar los mejores modelos luego de la variación del CCD width; Y la Tabla 13 al seleccionar los mejores modelos luego de variar las combinaciones de imágenes. Los resultados obtenidos al variar el CCD width en cada conjunto de validación del Iris 2, se pueden encontrar en el Anexo I.5. Y las tablas con las descripciones de los modelos, que fueron construidos al variar el número de imágenes en cada conjunto de validación del Iris 2, se pueden encontrar en el Anexo I.6.



*Ilustración 49: Ejemplo imagen del Iris 2 para validación, con encuadre, suavizado, borrar pupila y ecualizado.*



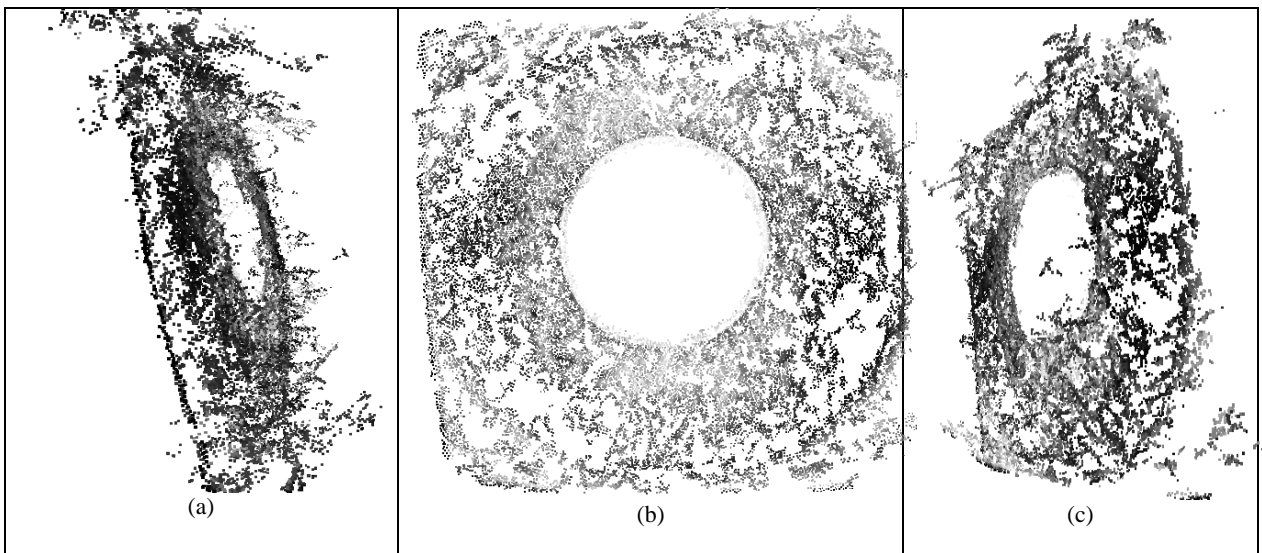
**Tabla 12: Modelos que entregaron la mejor descripción del modelo o mayor cantidad de puntos, al variar el CCD width para cada conjunto de validación del Iris 2.**

Conjunto	Procesamientos	CCD Width	N° Nubes Preliminares	Puntos	Descripción Modelo
Iris_2_1	Encuadre, suavizado, Borrar pupila y Ecuilizado	105	3	6904	ruido cono
Iris_2_2		110	4	6528	ruido cono

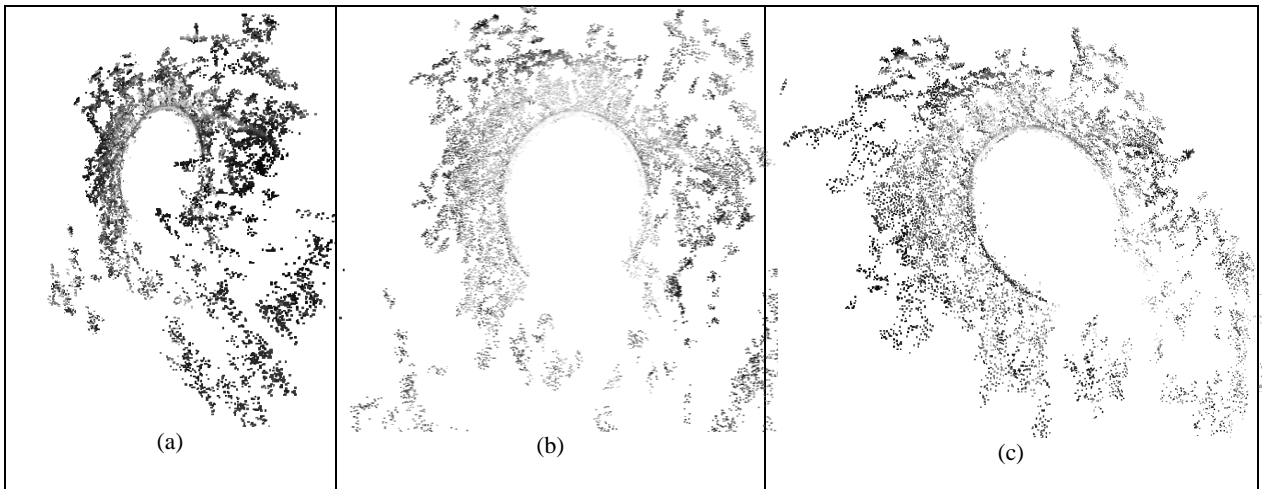
**Tabla 13: Modelos con mejor descripción de modelos de cada conjunto de validación del Iris 2.**

Conjunto	Procesamientos	Imágenes eliminadas	CCD Width	N° Nubes Preliminares	Puntos	Descripción Modelo
Iris_2_1	Encuadre, suavizado, Borrar pupila y Ecuilizado	16, 12, 7, 2, 9, 8	105	4	29627	Modelo iris ruidoso
Iris_2_2		0, 5, 15, 14, 12, 11, 9, 10, 4, 6	110	4	12973	$\frac{3}{4}$ iris ruidoso

En la Tabla 12 se muestra que los dos conjuntos de validación del Iris 2 obtuvieron solo modelos con ruido luego de la etapa de variación de CCD width. En la Tabla 13 se tiene que el conjunto Iris\_2\_1 consigue un modelo con una cantidad de números por sobre los 25.000 puntos y una descripción *Modelo iris ruidoso*. En la Ilustración 50 se pueden ver 3 imágenes del modelo obtenido. En estas se ve que existe ruido, pero aun así se aprecian texturas y patrones del iris en el centro del modelo. Por otra parte el conjunto Iris\_2\_2 obtiene un modelo con descripción  $\frac{3}{4}$  *iris ruidoso*, en la Ilustración 51 se puede ver que este modelo muestra una sección del iris bien definida, mientras que el resto está ruidoso.



**Ilustración 50: Modelo ruidoso Iris 2.** En (a) se muestra el modelo desde la izquierda mostrando el ruido existente. En (b) se muestra el modelo frontalmente donde se aprecian algunos patrones del iris. En (c) se muestra el iris desde la derecha, mostrando la forma de iris.



**Ilustración 51: Modelo 3/4 ruidoso Iris 2.** En (a) se ve el modelo lateralmente, se muestra el ruido existente en este. En (b) se muestra el modelo frontalmente y se aprecia que en el centro de este se muestran la textura del iris. En (c) se muestra el modelo ligeramente inclinado.

De estos resultados se desprende que el método resultante funcionó de forma parcial en los dos conjuntos de validación obtenidos del Iris 2. Aun así obtiene modelos con secciones del iris bien definidas.

## 5 ANÁLISIS DE RESULTADOS

El primer resultado es el desarrollo de un sistema de adquisición de imágenes para iris de alta resolución y que permite captura de imágenes en ángulos distintos. El desarrollo del sistema involucró muchas pruebas de ensayo para determinar la mejor forma de capturar las imágenes. De

esta forma se cambió la cámara 1 de cinco megapíxeles por la cámara 2 de ocho megapíxeles con la que se lograron imágenes de mayor definición. También se le agregó al sistema de iluminación luces laterales blancas, de forma de poder contraer la pupila del ojo y utilizar luz infrarroja pura en la placa central.

Por otra parte, el método de toma de imágenes desde diferentes ángulos, que funciona mediante el deslizamiento de la cámara por un riel, fue construido con impresoras 3D. Este método consiguió su cometido, pero existen ciertos inconvenientes al tomar las imágenes de esta manera. En primer lugar es un método donde se mueve manualmente la cámara, haciéndolo inexacto en términos del ángulo en que se toma la imagen, y existiendo el riesgo de que se mueva la estructura completa, cambiando el encuadre de la cámara. En segundo lugar al moverse la cámara, las condiciones visuales cambian, haciendo que la pupila cambie de tamaño al enfocar y adaptarse a las nuevas condiciones.

Para mayor precisión, el ideal sería tener más cámaras que tomaran las imágenes desde diferentes ángulos al mismo tiempo, de esta forma es seguro que las condiciones para el ojo sean las mismas. Para definir el número de cámaras requeridas es necesario saber el número de imágenes con las que se puede construir un buen modelo del iris, información que se analizó en la sección 3.2.3.3 donde se obtuvo un buen modelo con un mínimo de 6 imágenes. Por supuesto este número es referencial y puede disminuir al considerar que las imágenes debiesen ser más congruentes al ser tomadas todas al mismo tiempo

El segundo resultado, son las imágenes capturadas, éstas cumplen con las expectativas de mostrar los patrones del iris y ubicar los reflejos de las luces en la pupila. También se aprecia que la iluminación permite una buena definición en el iris y que la pupila se mantenga contraída. A su vez el enfoque en el iris es el correcto y se consiguen los diferentes ángulos del ojo.

Algunos factores que se podría mejorar son, en primer lugar encuadrar la cámara de forma que las luces LED no sean visibles en las imágenes, en segundo lugar utilizar cámaras con sensores que permitan obtener imágenes con menos ruido. En la sección 3.2.1.5.2 se describe cómo se utiliza el suavizado gaussiano para mitigar el ruido de las imágenes, utilizando una cámara con un mayor rango ISO, este ruido se podría disminuir sin necesidad de comprometer la definición.

El tercer resultado son las imágenes procesadas. Cada procesamiento de imagen realizado tiene un objetivo específico, para llegar a una imagen con mayor cantidad de información del iris y menor ruido. La secuencia desarrollada consiste en primero encuadrar el iris para eliminar la información del resto del ojo y realizar el resto de los procesamientos en el área de importancia. Luego, realizar un suavizado gaussiano a la imagen encuadrada con el objetivo de disminuir el ruido. El siguiente procesamiento es suprimir la pupila para eliminar los reflejos de las fuentes luminosas y apunta a obtener un mayor contraste al momento de ecualizar. Finalmente, se ecualiza para maximizar la visibilidad de la información contenida en la textura del iris. En conjunto estos procesamientos construyen imágenes de las que se consigue obtener un modelo 3D del iris.

El cuarto resultado que se obtiene son los modelos 3D. El primer modelo construido es el del ojo sin ningún procesamiento, el cual muestra el ojo pero con bastante ruido. Éste modelo, al ser de todo el ojo, no contiene una gran densidad de puntos en el iris, y no se consiguen apreciar patrones en él. Se ve en los resultados que la variación del parámetro CCD width es de gran relevancia para la obtención de modelos bien formados. En la Tabla 3 se muestra que al realizar los procesamientos con CCD width original se obtienen modelos que son solo ruido. Por otra parte, no existe un solo CCD width donde se obtengan buenos resultados para todos los procesamientos, si no que este parámetro es optimizado para cada caso particular. Se ve en las Tabla 5, Tabla 6 y Tabla 7 que los primeros procesamientos de imágenes construyeron modelos con solo ruido cualquiera fuera el CCD width utilizado. Pero al llegar al procesamiento *Encuadre, suavizado, borrar pupila y ecualizado* se consiguen modelos con indicios del iris.

Dado el conjunto de imágenes con el CCD width que entregó el mejor resultado, se varió el número de imágenes utilizadas para la construcción del modelo. Se aprecia en los resultados que existen mejoras considerables al eliminar alrededor de 9 imágenes. De esta forma, se obtienen modelos del iris completo donde se pueden apreciar patrones bien específicos. El mejor modelo resultante es el que se muestra en la Ilustración 41, en esta se ve el iris bien formado y con algunos patrones.

A partir de los resultados anteriores, se obtiene un método para la construcción de modelos 3D. Este método, utiliza los escenarios en los que se obtuvieron los mejores resultados para cada etapa, es decir, en la adquisición de imágenes, en el procesamiento de imágenes y en el modelamiento 3D.

Finalmente, en los resultados obtenidos de la validación del método, se muestra que en la mayoría de los conjuntos probados (en 8 de los 10 conjuntos tomados del Iris 1 y en todos los conjuntos del Iris 2), se consigue construir al menos un modelo de una sección del iris. Por otra parte, se tiene que se obtuvieron modelos del iris completo, con ruido, en 2 de los 10 conjuntos del Iris 1 y en 1 de los conjuntos del Iris 2. Además, se construyeron modelos del iris completo sin ruido, en 4 de los 10 conjuntos del Iris 1 y en ningún conjunto del Iris 2. Es importante destacar que dada la cantidad de conjuntos probados, esta validación es solo parcial, y por lo tanto, se debe validar con un número mayor de conjuntos de imágenes del iris, para obtener resultados más concluyentes sobre la capacidad de generalización del método.

Es importante mencionar que estos modelos pueden ser mejorados realizando los cambios mencionados en el sistema de adquisición de imágenes y en las imágenes, realizando un post procesamiento del modelo 3D utilizando un filtro gaussiano para eliminar el ruido o encontrando un software de modelamiento 3D que sea más adecuado para objetos con las características del iris.

## 6 CONCLUSIONES

La finalidad del trabajo desarrollado es demostrar la factibilidad de construir un modelo 3D del iris mediante fotogrametría, en este caso, a partir de imágenes tomadas desde diferentes ángulos. Para conseguir esto, en primer lugar se obtuvo un sistema de captura de imágenes bidimensionales, se realizaron modificaciones a las imágenes para eliminar los componentes innecesarios y finalmente se construyó el modelo tridimensional.

En primer lugar, se definieron las condiciones necesarias para la toma de imágenes que permiten construir el modelo 3D: deben estar enfocadas de forma tal que el iris se vea bien definido, en este caso, el enfoque se ajustó manualmente a 5 cm. del lente, que es la distancia a la que posiciona el iris.

Con respecto a la toma de imágenes, se definieron las características que éstas deben tener para poder construir el modelo 3D. Debe haber una iluminación tal que se puedan apreciar los detalles del iris y que el reflejo no lo ocluya, para conseguir esto se iluminó el iris con un arreglo circular de 6 luces infrarrojas tal que el reflejo se centra en la pupila y con 2 luces blancas laterales que iluminan el ojo de forma indirecta, para contraer la pupila sin generar reflejos. Luego, se requiere una cantidad de imágenes que permita realizar el modelo 3D, en este sentido se definieron 17 imágenes con una variación de  $2,5^\circ$  en el ángulo de encuadre.

Para realizar la toma de imágenes bidimensionales, se desarrolló un prototipo replicable, que está constituido por el hardware de toma de imágenes y la estructura de toma de imágenes. El hardware utilizado es un computador de escritorio, la cámara Raspberry Pi NoIR y computador de placa reducida Raspberry Pi. La estructura de toma de imágenes está compuesto por lentes de realidad virtual, que son la sujeción del sistema, la estructura móvil, que permite el movimiento de la cámara en diferentes ángulos de encuadre, y el circuito de luces led, que iluminan el iris y contraen la pupila.

Con este prototipo se tomaron las imágenes, las cuales cumplieron con los requisitos deseados, sin embargo, existen mejoras que se pueden implementar para obtener imágenes menos ruidosas y congruentes entre ellas. Las mejoras propuestas son: utilizar una cámara con un mayor rango de ISO para conseguir imágenes con un menor ruido, mover el circuito de leds o encuadrar la fotografía de forma que los leds no se vieran en las imágenes, y por último se podría implementar un arreglo de varias cámaras encuadradas con diferentes ángulos del iris, de manera de tomar las imágenes del iris simultáneamente, y por tanto con las mismas condiciones para el iris.

En relación con el procesamiento de imágenes, se obtuvieron resultados con diferentes grados de éxito en la construcción de los modelos 3D. Los procesamientos de imágenes realizados, se fueron aplicando de forma acumulativa hasta construir una imagen con el método *Encuadre, suavizado, borrar pupila y ecualizado*, el cual obtuvo los mejores resultados. Este procesamiento cumple con el objetivo de construir una imagen sin los reflejos de la iluminación, con solo la información del iris y con una resolución y contraste que permiten construir el modelo 3D.

Finalmente se construyeron modelos 3D del iris con el programa Python Photogrammetry Toolbox. Para conseguir modelos bien formados del iris se probaron diferentes parámetros de entrada: CCD width y número de imágenes. El CCD width es un parámetro que se le entrega al algoritmo para indicar el ancho del sensor de la cámara. A pesar de que este parámetro es fijo por definición, se probó que al variarlo los resultados podían mejorar. Por otro lado, se varió el número de imágenes usado para modelar, probando diferentes combinaciones de imágenes para encontrar los mejores modelos.

En conclusión, respecto a la construcción de modelos 3D a partir de imágenes bidimensionales, se consiguieron modelos bien formados del iris, en los que se aprecian texturas y patrones de éste. Estos modelos fueron conseguidos al utilizar el siguiente método: Realizar el procesamientos *Encuadre, suavizado, borrar pupila y ecualizado*, modelar variando el parámetro CCD width, modelar utilizando el CCD width que entrego el mejor modelo y variando las combinaciones de imágenes. Una forma efectiva de mejorar este modelo seria realizar un procesamiento tridimensional del modelo en el que se le aplique un filtro gaussiano para disminuir el ruido.

Por otra parte se concluye que el método construido para el modelamiento 3D del iris, obtiene diferentes calidades de modelos, al ser aplicado en diferentes ocasiones. Por lo tanto este método debe ser pulido, para conseguir una mayor capacidad de generalización.

Adicionalmente, a partir de la experiencia adquirida se proyectan las siguientes líneas de trabajo. Primero, mejorar el prototipo desarrollado para la toma de imágenes para la construcción de modelos 3D del iris. El siguiente paso es obtener una base de imágenes con ojos de diferentes personas. Otro trabajo futuro es realizar comparaciones de los modelos 3D, de forma de probar la factibilidad de identificar dos modelos del mismo ojo entre otros modelos. Finalmente, dependiendo de los resultados obtenidos en las proyecciones anteriores, se propone crear un sistema de reconocimiento de personas basado en la información tridimensional del iris.

Iris; Procesamiento de imágenes; Modelamiento 3D; Biometría; fotogrametría; Impresión 3D; Fotografía

## 7 BIBLIOGRAFÍA

- [1] JAIN, Anil K. et al. 2004. An Introduction to Biometric Recognition. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology. 14(1): 4–20.
- [2] ROUSE, Margaret y LENNARD-PETER, Sutherland. biometría definición [en línea]. <<http://searchdatacenter.techtarget.com/es/definicion/Biometria>> [consulta: 8 diciembre 2015].
- [3] NSTC y NSTC. 2006. Biometrics Overview. Biometrics. (March): 1–10.
- [4] PRABHAKAR, S. et al. 2003. Biometric recognition: security and privacy concerns. IEEE Security & Privacy Magazine [en línea]. 1(2): 33–42. ISSN 1540-7993. 10.1109/MSECP.2003.1193209
- [5] KONG, Wai Kin Kong Wai Kin y ZHANG, D. 2002. Palmprint texture analysis based on low-resolution images for personal authentication. Pattern Recognition, 2002. ICPR 2002. Proceedings of the 16th International Conference on [en línea]. 3: 807–810. ISSN 1051-4651. 10.1109/ICPR.2002.1048142
- [6] NET INDUSTRIES AND ITS LICENSORS. Eye Color – Iris Structure [en línea]. <<http://medicine.jrank.org/pages/2230/Eye-Color-Iris-Structure.html>> [consulta: 10 diciembre 2015].
- [7] EYEPEDIA. Iris [en línea]. <<http://www.eyepedia.co.uk/eyes-vision/eye-anatomy/internal-eye/iris/>>> [consulta: 10 diciembre 2015].
- [8] DAUGMAN, John. 2004. How iris recognition works. Circuits and Systems for Video Technology, IEEE Transactions on [en línea]. 14(1): 21–30. <[http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs\\_all.jsp?arnumber=1262028](http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=1262028)>
- [9] DAUGMAN, J y DOWNING, C. 2001. Epigenetic randomness, complexity and singularity of human iris patterns. Proceedings. Biological sciences / The Royal Society [en línea]. 268(1477): 1737–40. ISSN 0962-8452. 10.1098/rspb.2001.1696
- [10] DAUGMAN, John. 2006. Probing the uniqueness and randomness of iriscodes: Results from 200 billion iris pair comparisons. Proceedings of the IEEE [en línea]. 94(11): 1927–1934. ISSN 00189219. 10.1109/JPROC.2006.884092
- [11] BURGE, Mark J. y BOWYER, Kevin W. 2013. Handbook of Iris Recognition [en línea]. Springer. 33-36 p. ISBN 9788578110796. 10.1017/CBO9781107415324.004
- [12] DAUGMAN, John y MALHAS, Imad. 2004. Iris recognition border-crossing system in the UAE. Interantional Airport Review [en línea]. 44(2). ISSN 1366-6339. <<http://www.cl.cam.ac.uk/~jgd1000/UAEdeployment.pdf>>
- [13] LI, Yung H. y SAVVIDES, Marios. 2009. A pixel-wise, learning-based approach for occlusion estimation of iris images in polar domain. ICASSP, IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing - Proceedings [en línea]. : 1357–1360. ISSN 15206149. 10.1109/ICASSP.2009.4959844
- [14] CERME, Gamze Nur y ELEKTRIK, Mahmut Karakaya. 2015. 3D Iris Structure Impact on

Iris Recognition. En: Signal Processing and Communications Applications Conference. p. 907 – 910. ISBN 9781479948741.

- [15] KARAKAYA, Mahmut et al. 2013. Limbus Impact on Off-angle Iris Degradation. : 6.
- [16] WALFORD, Alan. What is Photogrammetry? [en línea]. <<http://www.photogrammetry.com/>> [consulta: 5 diciembre 2015].
- [17] MOULON, Pierre y BEZZI, Alessandro. 2011. Python Photogrammetry Toolbox: A free solution for Three-Dimensional Documentation. ArcheoFoss [en línea]. : 1–12. <<http://hal-enpc.archives-ouvertes.fr/hal-00834940>>
- [18] EISERT, Peter. 2006. Reconstruction of Volumetric 3D Models. 3D Videocommunication: Algorithms, Concepts and Real-Time Systems in Human Centred Communication [en línea]. : 133–150. 10.1002/0470022736.ch8
- [19] WANG, Mao-Jiun J. 2010. Constructing 3D human model from 2D images. 2010 IEEE 17Th International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management [en línea]. : 1902–1906. 10.1109/ICIEEM.2010.5645897
- [20] ATOR. How to make 3d scan with pictures and the PPT GUI [en línea]. <<http://arc-team-open-research.blogspot.cl/2012/12/how-to-make-3d-scan-with-pictures-and.html>> [consulta: 12 diciembre 2015].
- [21] ARCLAND. Photogrammetric 3D restitution of surfaces using free tools [en línea]. <<http://www.arcland.eu/capture-new/aerial-photography-sub/1508-photogrammetric-3d-restitution-of-surfaces-with-free-tools>> [consulta: 12 diciembre 2015].
- [22] ARC 3D WEBSERVICE. A Family of Web Tools for Remote 3D Reconstruction [en línea]. <<http://homes.esat.kuleuven.be/~visit3d/webservice/v2/>> [consulta: 12 diciembre 2015].
- [23] BUSTOS, B et al. 2004. Using entropy impurity for improved 3D object similarity search. Multimedia and Expo, 2004. ICME '04. 2004 IEEE International Conference on [en línea]. 2: 1303–1306 Vol.2. 10.1109/ICME.2004.1394465
- [24] VRANIC, D.V. 2003. An improvement of rotation invariant 3D-shape based on functions on concentric spheres. Proceedings 2003 International Conference on Image Processing (Cat. No.03CH37429) [en línea]. 3: 757–760. ISSN 1522-4880. 10.1109/ICIP.2003.1247355
- [25] WOHLKINGER, Walter y VINCZE, Markus. 2011. Shape-based depth image to 3D model matching and classification with inter-view similarity. IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems [en línea]. : 4865–4870. ISSN 2153-0858. 10.1109/IROS.2011.6048416
- [26] LI, Yuan et al. 2013. A Design of Iris Recognition System at a Distance. IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. 2013(December): 2297–2302.
- [27] PROENÇA, Hugo. 2009. On the feasibility of the visible wavelength, at-a-distance and on-the-move iris recognition (Invited Paper). 2009 IEEE Workshop on Computational Intelligence in Biometrics: Theory, Algorithms, and Applications, CIB 2009 - Proceedings [en línea]. : 9–15. 10.1109/CIB.2009.4925680



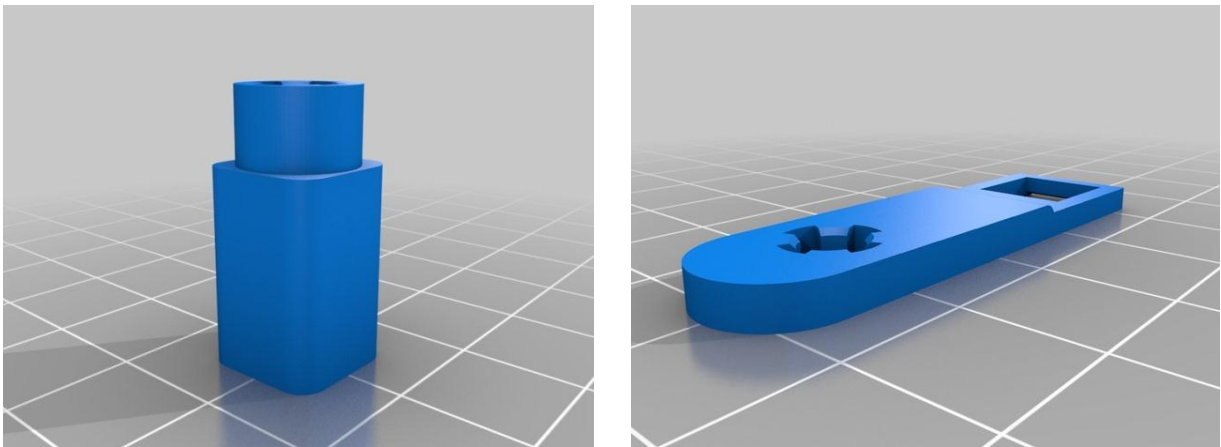
- [28] BOWYER, K. Biometrics Data Sets [en línea]. <[http://www.cse.nd.edu/~cvrl/CVRL/Data\\_Sets.html](http://www.cse.nd.edu/~cvrl/CVRL/Data_Sets.html)> [consulta: 13 diciembre 2015].
- [29] DELHI IIT. IT Delhi Iris Database (Version 1.0) [en línea]. <[http://www4.comp.polyu.edu.hk/~csajaykr/IITD/Database\\_Iris.htm](http://www4.comp.polyu.edu.hk/~csajaykr/IITD/Database_Iris.htm)> [consulta: 13 diciembre 2015].
- [30] BIOMETRIC IDEAL TEST. Database CASI Iris [en línea]. <<http://biometrics.idealtest.org/dbDetailForUser.do?id=4>> [consulta: 13 diciembre 2015].
- [31] SANTOS, Ricardo y ALEXANDRE, a. 2010. The UBIRIS . v2 : A Database of Visible Wavelength Iris Images Captured. *Analysis*. 32(8): 1529–1535.
- [32] WILDES, R.P. 1997. Iris recognition: an emerging biometric technology. *Proceedings of the IEEE* [en línea]. 85(9): 1348–1363. ISSN 00189219. 10.1109/5.628669
- [33] MADRAPEVIÜ, Lana y ŠOGORIÜ, Stjepan. 2010. 3D Modeling From 2D Images. : 1351–1356.
- [34] TOKOLA, Ryan et al. 2015. 3D face analysis for demographic biometrics. *Proceedings of 2015 International Conference on Biometrics, ICB 2015* [en línea]. : 201–207. 10.1109/ICB.2015.7139052
- [35] SVOBODA, Jan et al. 2015. Contactless biometric hand geometry recognition using a low-cost 3D camera. *Proceedings of 2015 International Conference on Biometrics, ICB 2015* [en línea]. : 452–457. 10.1109/ICB.2015.7139109
- [36] GONZALEZ, Rafael C y WOODS, Richard. sin fecha. *Digital Image Processing*. 3° ed. 976 p.
- [37] EASTON, Roger L. 2010. *Fundamentals of Digital Image Processing*. 216 p.
- [38] SHAPIRO, Linda y STOCKMAN, George. 2001. *Computer Vision*. October [en línea]. 2004(October): 608. ISSN 15562646. 10.1525/jer.2008.3.1.toc
- [39] RASPBIAN. Welcome to Raspbian [en línea]. <<https://www.raspbian.org/>> [consulta: 21 septiembre 2016].
- [40] VIRTUAL REALITY SOCIETY. How Do Virtual Reality Glasses Work? [en línea]. <<http://www.vrs.org.uk/virtual-reality-gear/glasses/how-do-they-work.html>> [consulta: 20 septiembre 2016].
- [41] MAKERBOT THINGIVERSE. Raspberry pi camera case/enclosure [en línea]. <<http://www.thingiverse.com/thing:92208>> [consulta: 25 septiembre 2016].
- [42] MAKERBOT THINGIVERSE. Raspberry Pi Camera V2.1 Lens Adjustment Spanner [en línea]. <<http://www.thingiverse.com/thing:1574661>> [consulta: 20 julio 2016].
- [43] RASPBERRY PI FOUNDATION. Raspbian [en línea]. <<https://www.raspberrypi.org/downloads/raspbian/>> [consulta: 24 julio 2016].
- [44] RASPBERRY PI FOUNDATION. Help Guides and resources [en línea]. <<https://www.raspberrypi.org/help/>> [consulta: 12 agosto 2016].

- [45] RASPBERRY PI FOUNDATION. Camera Module [en línea]. <<https://www.raspberrypi.org/documentation/usage/camera/README.md>> [consulta: 15 agosto 2016].
- [46] RASPBERRY PI FOUNDATION. Getting started with PiCamera [en línea]. <<https://www.raspberrypi.org/learning/getting-started-with-picamera/worksheet/>> [consulta: 18 agosto 2016].

## 8 ANEXOS

### Anexo A. Modificación enfoque Cámara Raspberry Pi

Para mantener el lente en su posición este es adherido con un par de gotas de silicona. Por lo tanto es necesario forzar a que se desprege para conseguir desatornillar el lente, esto se consigue girando el lente con fuerza pero con cuidado de no dañar la cámara. El método escogido para realizar esta operación consiste en crear en una impresora 3D dos llaves, una con la forma de la parte superior del lente y otra con la forma de la base del lente, como las que se ven en la Ilustración 52, de forma de poder girar este sin rallar el lente. Los archivos .stl para imprimir estas piezas fueron conseguidos en thingiverse [42].



*Ilustración 52: Llaves para modificar enfoque* (imágenes obtenidas en [42]).

### Anexo B. Guía de instalación Raspberry

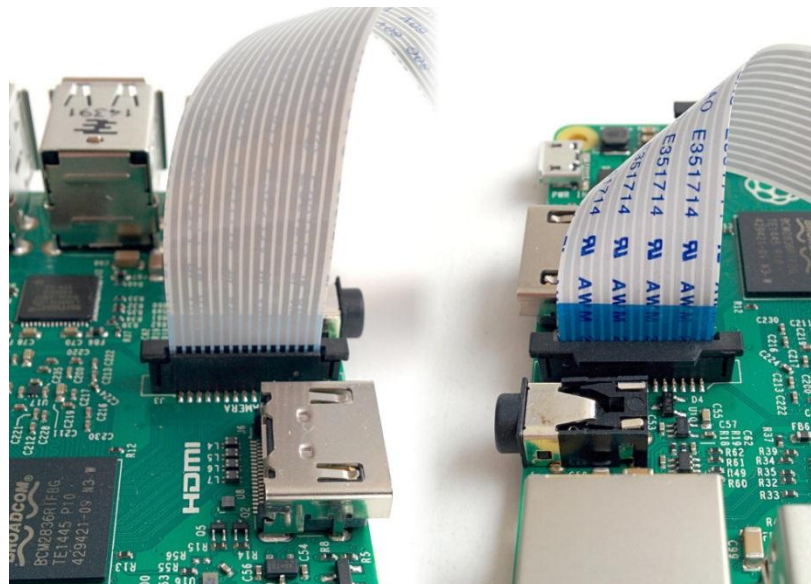
Implementos necesarios:

- Raspberry Pi
- Monitor con entrada HDMI
- Cable HDMI
- Teclado USB

- Mouse USB
- Tarjeta SD de 8GB

El primer paso es instalar el sistema operativo Raspbian Jessie en la tarjeta SD, para esto es necesario descargarlo desde la página oficial de Raspberry Pi [43] y descomprimirlo. Luego insertar la tarjeta SD en el computador y mediante un software de quemado de imágenes para tarjetas SD, como *Etcher SD card image utility*, quemar la imagen descargada. Realizado esto el sistema operativo se encuentra en la tarjeta SD. El siguiente paso es insertar la tarjeta SD y conectar los implementos en sus respectivos conectores, en último lugar conectar la fuente de poder ya que esto encenderá la Raspberry Pi. Para mayor información sobre la instalación de la Raspberry Pi revisar la sección de ayuda de la página oficial de Raspberry Pi [44].

Una vez que se tiene la Raspberry funcional es momento de conectar la cámara, lo primero es enchufarla en el conector de la Raspberry que dice cámara mientras esta ésta apagada, asegurándose que el cable quede conectado con el sentido correcto como se muestra en la Ilustración 53. Luego se enciende la Raspberry, se escribe en la terminal `sudo raspi-config`, se selecciona la opción *Enable Camera* y se reinicia la raspberry. Ahora la cámara esta lista para ser usada, puede probarse que esté funcionando correctamente escribiendo en la terminal `raspistill -o cam.jpg` con lo que se debería tomar una imagen. Para mayor información se pueden visitar los tutoriales en la página oficial de Raspberry Pi [45, 46]



*Ilustración 53: Conexión cable cámara Raspberry Pi (imagen obtenida en [46]).*

## **Anexo C. Pasos conexión SSH**

Lo primero que se debe hacer para conseguir conectar la Raspberry con el computador es modificar el archivo `/etc/network/interfaces` en la Raspberry, de manera que se vea de la siguiente manera:

```
# interfaces(5) file used by ifup(8) and ifdown(8)
# Please note that this file is written to be used with dhcpcd
# For static IP, consult /etc/dhcpcd.conf and 'man dhcpcd.conf'
# Include files from /etc/network/interfaces.d:
```

```
source-directory /etc/network/interfaces.d
auto lo
iface lo inet loopback
iface eth0 inet dhcp
auto wlan0
iface wlan0 inet static
    address 192.168.200.2
    netmask 255.255.255.0
    wireless-channel 1
    wireless-essid raspic
    wireless-mode ad-hoc
```

Al modificar este archivo se está configurando la Raspberry de forma que al iniciarse cree una red ad-hock de nombre raspic, donde su ip sea *192.168.200.2*. El siguiente paso es conectarse a la red raspic desde el computador, configurar manualmente la IP de la conexión para que sea *192.168.200.1* y luego mediante algún cliente ssh ingresar a la Raspberry con el nombre *pi@192.168.200.2* y contraseña: *Raspberry*.

## **Anexo D. Script de toma de imágenes**

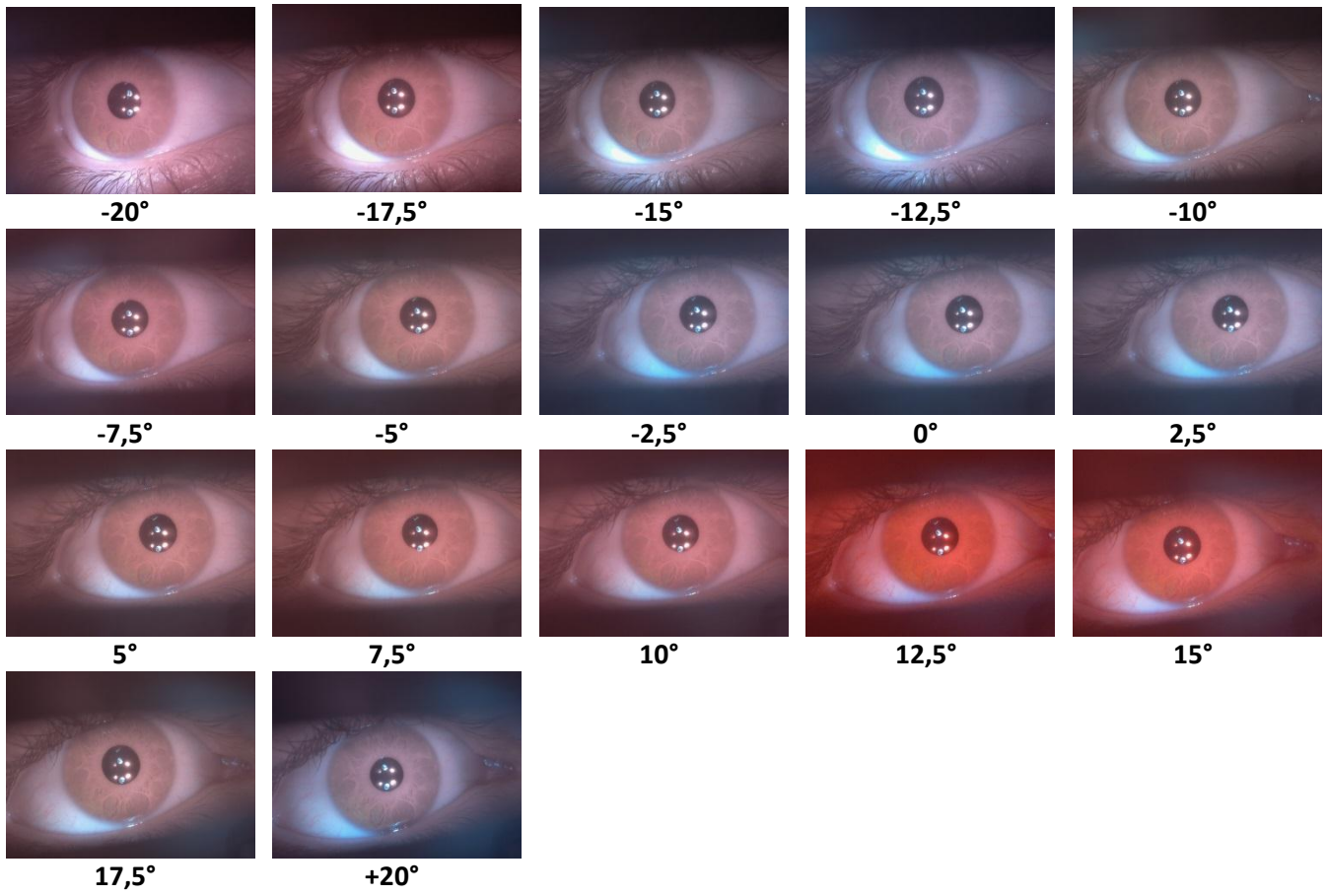
\*\*\* este script está diseñado para funcionar con la configuración de un computador en específico, para poder utilizarlo en otros computadores se debe modificar tanto el nombre del equipo “diego” como la carpeta a donde se envían las imágenes “Memoria/Pruebas”\*\*\*

```
#Sacado de fotos

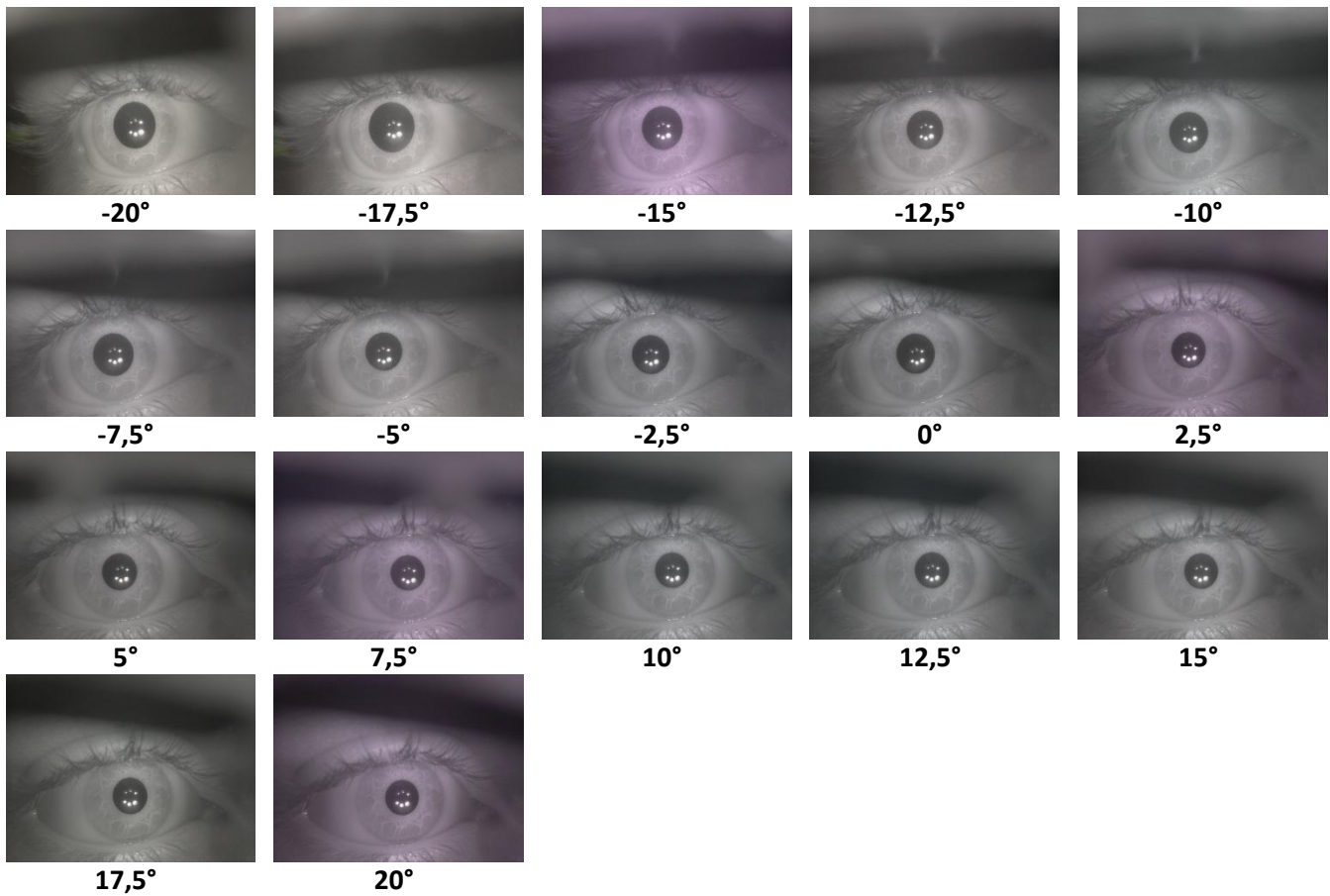
NOMBRE=$1
a=0
while [ $a -lt 17 ]
do
    raspistill -t 500 -w 2460 -h 1848 -roi 0.15,0.15,0.75,0.75 -o "${NOMBRE}_${a}.jpg"
    a=`expr $a + 1 `
    read -n1 -s
done
sudo ssh diego@192.168.200.1 "mkdir -p Memoria/Pruebas/${NOMBRE}"
sudo scp "${NOMBRE}_" "*" diego@192.168.200.1:Memoria/Pruebas/${NOMBRE}"
```

## **Anexo E. Resultados fotos cámara 1**

Con la cámara 1 se tomaron imágenes con solo leds infrarrojos y con una combinación de 4 leds infrarrojos y dos leds blancos en la placa de iluminación. A continuación se muestran los resultados de estos dos escenarios.



*Ilustración 54: Imágenes cámara 1 iluminación blanca e infrarroja.*

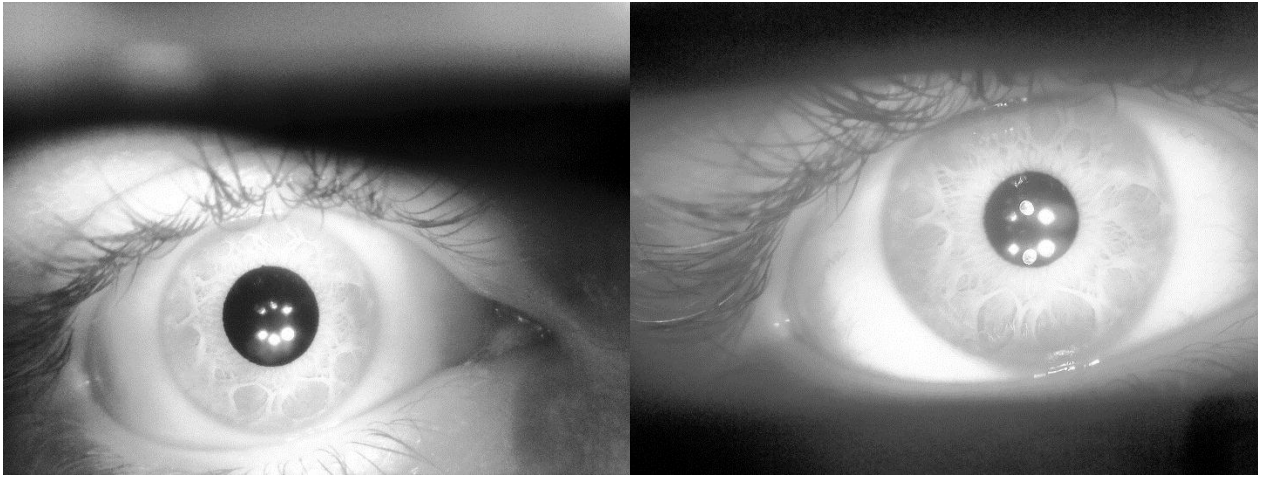


*Ilustración 55: Imágenes cámara 1 iluminación infrarroja.*

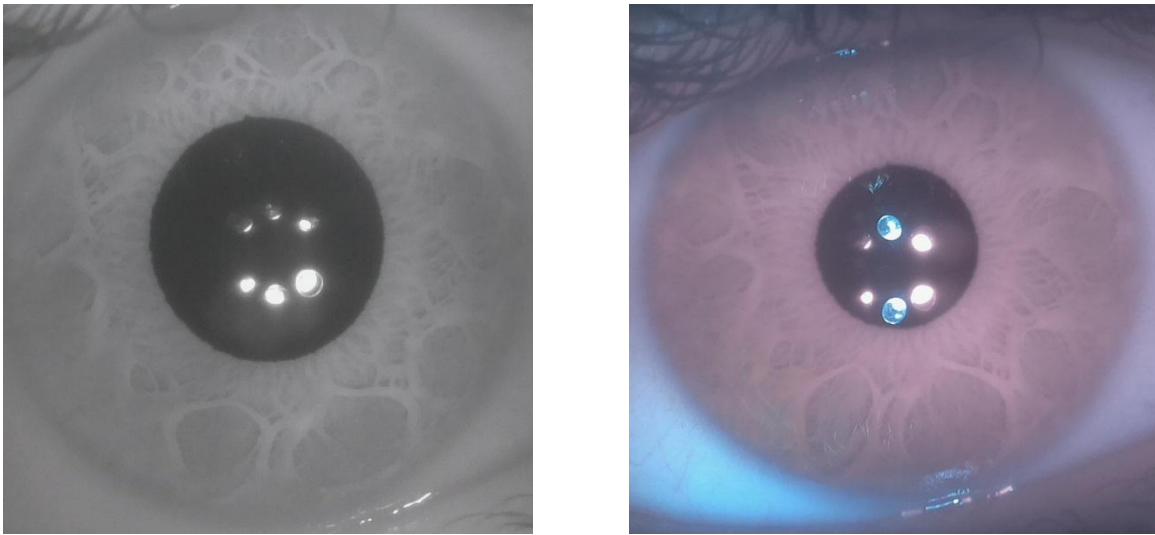
Al comparar la Ilustración 54 y la Ilustración 55 se puede apreciar que la iluminación puramente infrarroja entrega mejores resultados en término de definición de la textura del iris, mientras que la iluminación blanca produce mayor reflejo en el iris. También se puede ver que la pupila del ojo se encuentra más contraída y constante cuando existe presencia de luz blanca, esto debido a que la luz infrarroja no es visible por el ojo humano. De esto se concluye que la luz blanca es necesaria para obtener una mayor área del iris al tener la pupila contraída pero que la iluminación puramente infrarroja entrega imágenes del iris con menos ruido.

## **Anexo F. Procesamiento Cámara 1**

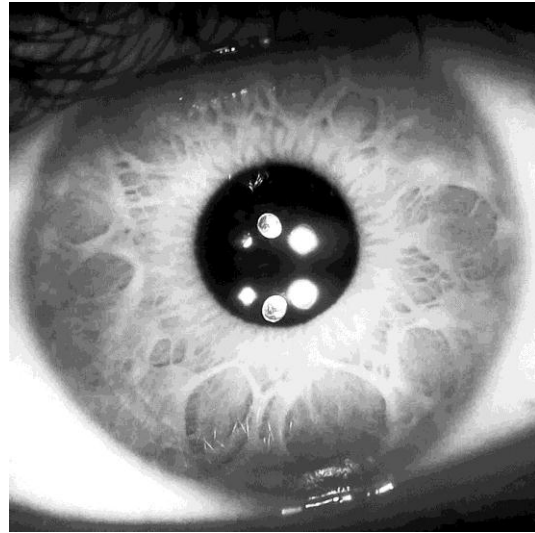
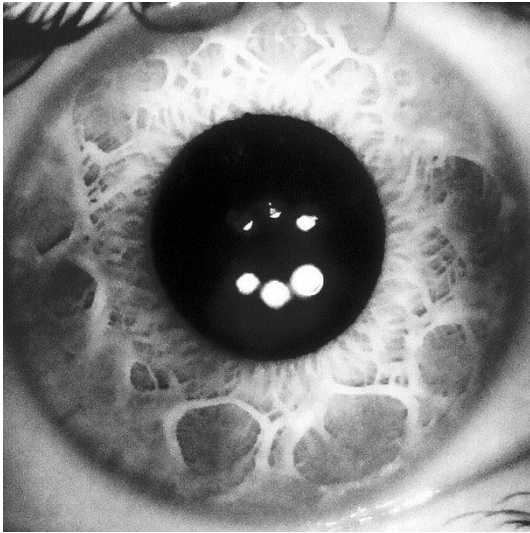
A continuación se mostrarán los resultados de realizar los procesamientos a las imágenes con luz infrarroja y blanca e infrarroja obtenidas con la cámara 1.



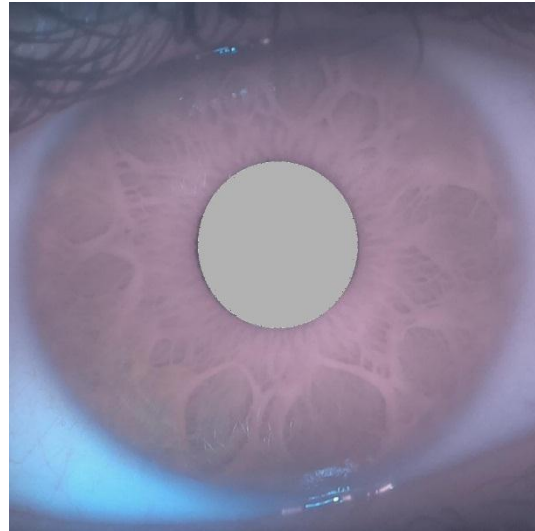
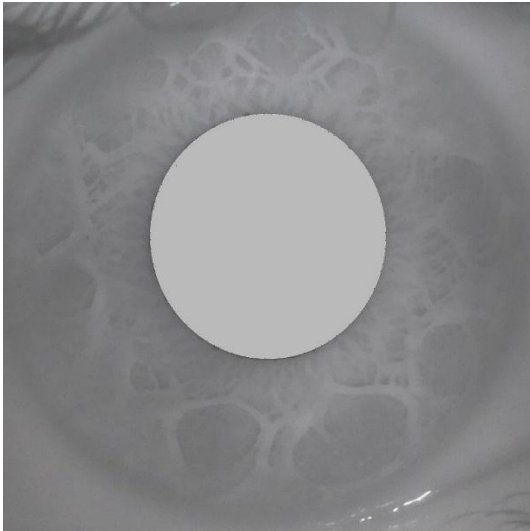
*Ilustración 56: Ecuación cámara 1.*



*Ilustración 57: Encuadre cámara 1.*

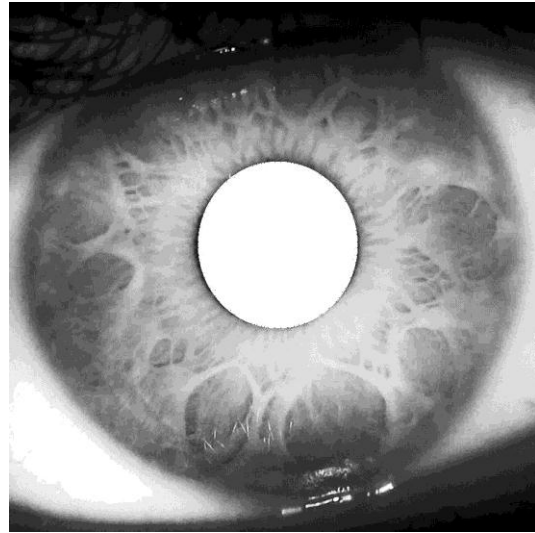
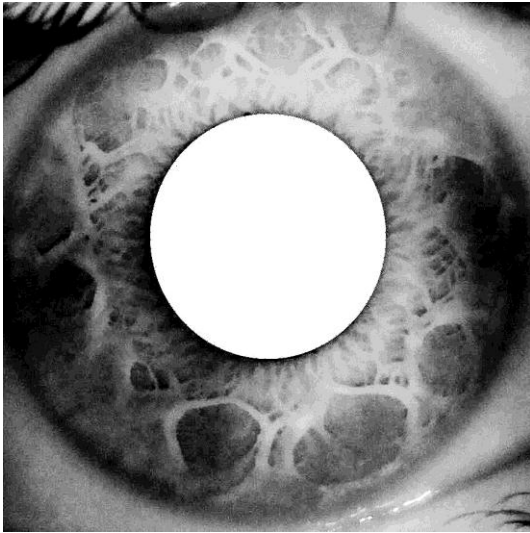


*Ilustración 58: Encuadre y ecualización cámara 1.*

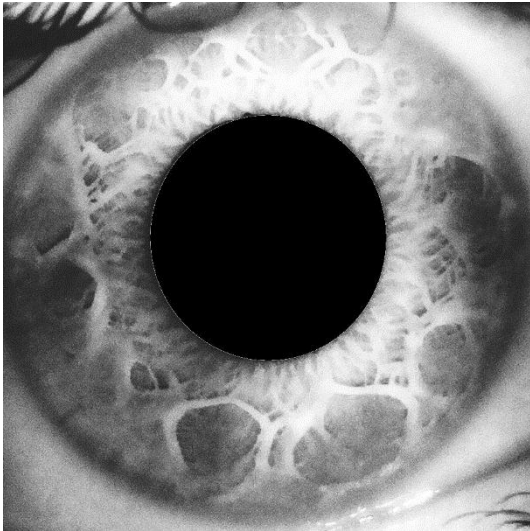


*Ilustración 59: Encuadrar y borrar pupila cámara 1.*

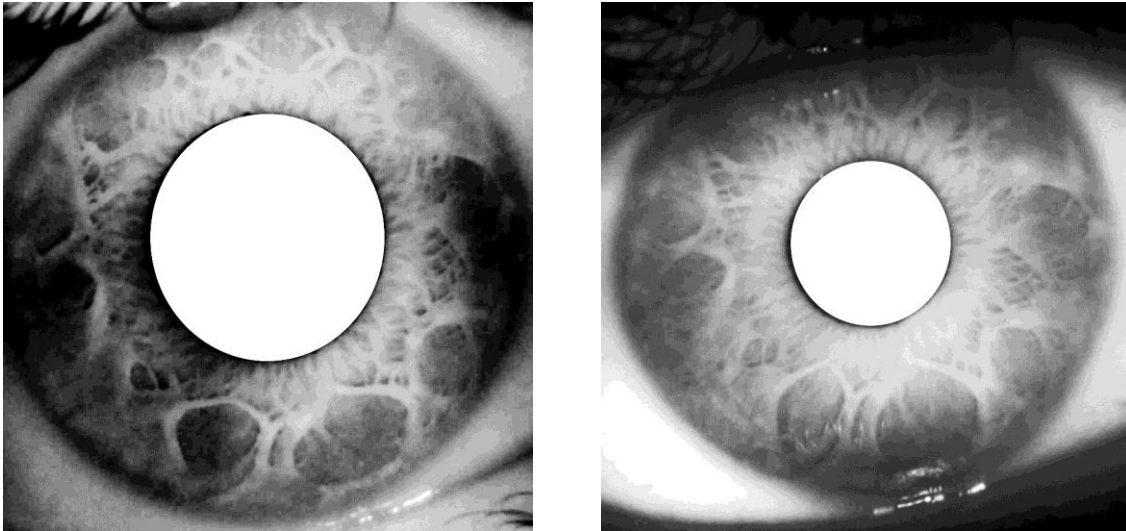




*Ilustración 60: Encuadrar, borrar pupila y ecualizar cámara 1.*



*Ilustración 61: Encuadrar, ecualizar y borrar pupila cámara 1.*



*Ilustración 62: Encuadrar, suavizar, borrar pupila y ecualizar cámara 1.*

En la Ilustración 56 se tiene la primera aproximación a los procesamientos que se realizarán, la ecualización directamente al ojo. Luego, en la Ilustración 57 se tiene el encuadre del iris, para conseguir que los procesamientos y el modelamiento se enfoquen específicamente al área deseada. Se continúa con la ecualización al ojo encuadrado, como se muestra en la Ilustración 58, donde se consigue un mayor contraste en el iris. En la Ilustración 59 se muestra el resultado de eliminar la pupila de los ojos para eliminar el ruido que hay en esta.

Siguiendo con la Ilustración 60 y la Ilustración 61 se debe notar que la diferencia de orden en los dos procesamientos, *Encuadrar, borrar pupila y ecualizar* y *Encuadrar, ecualizar y borrar pupila*, también afecta en los resultados. La ecualización realizada luego de eliminar la pupila genera más contraste ya que se eliminan las luces de la pupila que genera el desplazamiento del histograma la zona de blancos. Por otra parte este mayor contraste también amplifica el ruido gaussiano que existe en las imágenes. Finalmente en la Ilustración 62 se intenta disminuir el ruido mediante el suavizado de la imagen y luego ecualizar.

## **Anexo G. Script de eliminación de imágenes**

```

from os import listdir
from os.path import isfile, join
import sys, os
from shutil import copyfile
from shutil import copytree
from shutil import move

if __name__ == '__main__':
    print(__doc__)

    def foldear_del(path_orig, n_del):

```

```

new_name= path_orig + "_" + str(n_del)
copytree ( path_orig, new_name)
n_del_str= "_" + str(n_del) + "."
onlyfiles = [ f for f in listdir(new_name) if isfile(join(new_name,f)) ]
for i in range(0, len(onlyfiles)):
    if (onlyfiles[i].find(n_del_str)>=0):
        os.remove(new_name + "/" + onlyfiles[i])
        break
return new_name

def read_mod(fold_sin_img, width):
    resul_path= fold_sin_img.replace("Pruebas", "Resultados_osm", 1) + "_width_" + str(width)
    mod_path = resul_path + "/pmvs/models/pmvs_options.txt.patch"
    texto = open(mod_path, 'r')
    linea= texto.readline()
    numero= int(texto.readline())
    return numero

def ejecutor_cam(folder, width):
    input_cam= "cameras_" + width + ".sqlite"
    resul_folder= folder.replace("Pruebas", "Resultados_osm", 1) + "_width_" + str(width)
    copyfile("/home/diego/Memoria/datos_camaras/" + input_cam, "/home/diego/osm-
bundler/linux/osmbundler/cameras/cameras.sqlite")
    orden= "python ~/osm-bundler/linux/RunBundler.py --photos="+folder+" --
featureExtractor=siftvlfeat --photoScalingFactor=1"
    os.system(orden)
    llegada= "/home/diego/Memoria/Resultados_osm/Llegada/"
    folders = [ f for f in listdir(llegada)]
    if len(folders)>1:
        print ("ERROR: havia mas de una carpeta en llegada")
        sys.exit()
    else:
        move(llegada + "/" + folders[0], resul_folder)

def recur(path_in, path_orig, width, img_list):
    if (len(img_list)== 2):
        return
    numero_max=0
    index=0
    for i in range(0, len(img_list)):
        fold_sin_img=foldear_del( path_orig, img_list[i])
        #orden= "~/Memoria/Tools/ejecutor_cam.sh " + fold_sin_img + " " + width
        #print (orden)
        #os.system(orden)
        ejecutor_cam(fold_sin_img, width)
        numero = read_mod(fold_sin_img, width)
        if (numero >= numero_max):
            chosen_folder= fold_sin_img
            numero_max=numero
            index=i

```

```
if (numero_max==0):  
    return  
del img_list[index]  
recur(path_in, chosen_folder, width, img_list)
```

```
path_in = sys.argv[1]  
path_root= sys.argv[2]  
width = sys.argv[3]  
path_orig= path_in + "eliminar"  
copytree ( path_root, path_orig)  
img_list=[0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16]  
recur(path_in, path_orig, width, img_list)
```

## **Anexo H. Resultados de los Modelos 3D obtenidos de las imágenes de la cámara 1**

### **H.1. Modelamiento de imágenes con *CCD width original***

En la Tabla 14 se tienen los resultados al construir los modelos con el width real de la cámara 1 con iluminación infrarroja, mientras que en la Tabla 15 son los resultados con luz infrarroja y blanca. En el caso con solo luz infrarroja se tiene que el único escenario en que se obtuvo un modelo, que no fuera solo ruido, es cuando se realizó la ecualización directamente al ojo. Obteniendo resultados como los de la Ilustración 34. En cambio cuando se utilizó la luz infrarroja y blanca el caso en el que se obtuvo éste resultado fue cuando no se realizó ninguno procesamiento.

*Tabla 14: Resultados cámara 1 IR con CCD width original.*

Iluminación	Procesamiento	CCD Width	Nº Nubes Preliminar	Nº Puntos	Modelo
<b>IR</b>	Ninguno	3,76	3	8803	ruido cono
	Ecuilizado	3,76	5	27356	ojo ruidoso, más ruido en los bordes
	Encuadre	3,76	4	3724	ruido cono
	encuadre y ecualizado	3,76	4	3949	ruido cono
	Encuadre y borrar pupila	3,76	2	0	nada
	Encuadre, borrar pupila y ecualizado	3,76	2	0	nada
	Encuadre, ecualizado y borrar pupila	3,76	4	0	nada
	Encuadre, suavizado, borrar pupila y ecualizado	3,76	6	5032	ruido cono

*Tabla 15: Resultados cámara 1 IR + Blanca con CCD width original.*

Iluminación	Procesamiento	CCD Width	Nº Nubes Preliminar	Nº Puntos	Modelo
<b>IR + Blanca</b>	Ninguno	3,76	6	29673	ojo ruidoso, más ruido en los bordes
	Ecuilizado	3,76	7	20095	ruido cono
	Encuadre	3,76	4	3523	ruido cono
	encuadre y ecualizado	3,76	6	7691	ruido cono
	Encuadre y borrar pupila	3,76	4	0	nada
	Encuadre, borrar pupila y ecualizado	3,76	5	0	nada
	Encuadre, ecualizado y borrar pupila	3,76	5	9080	ruido cono
	Encuadre, suavizado, borrar pupila y ecualizado	3,76	2	0	nada

## H.2. Modelamiento de imágenes con diferentes CCD width

A continuación se tienen los resultados obtenidos al utilizar diversos CCD width en cada procesamiento de imagen. En la Tabla 16 y Tabla 17 se muestra que con el procesamiento de *Encuadre* no se consiguió ningún modelo del iris, solamente ruido.

Tabla 16: Resultados cámara 1 IR con encuadre con diferentes CCD width.

Iluminación	Procesamiento	CCD Width	N° Nubes Preliminar	N° Puntos	Modelo
IR	Encuadre	3	3	0	nada
		3,5	4	5528	ruido cono
		3,7	4	2918	ruido
		3,8	4	8223	ruido cono
		3,9	4	6007	ruido cono
		4	4	5688	ruido cono
		4,2	4	6072	ruido cono
		4,4	4	1911	ruido

Tabla 17: Resultados cámara 1 IR blanca con encuadre con diferentes CCD width.

Iluminación	Procesamiento	CCD Width	N° Nubes Preliminar	N° Puntos	Modelo
IR + blanca	Encuadre	3	4	7601	ruido cono
		3,5	4	6359	ruido cono
		3,7	6	8160	ruido cono
		3,8	4	7058	ruido cono
		3,9	4	6553	ruido cono
		4	4	7885	ruido cono
		4,2	4	8268	ruido cono
		4,4	4	6979	ruido cono

Por otra parte al realizar el procesamiento de *Encuadre* y *ecualizado* la Tabla 18 muestra que las imágenes con iluminación infrarroja obtuvieron algunos modelos. Al utilizar el CCD width 4 se obtiene un modelo del tipo *1/2 iris con ruido cono* como el de la Ilustración 37 y al utilizar CCD width 4,4 se obtiene una *sección del iris visible, con ruido cono* como la mostrada en la Ilustración 36. En cambio en la Tabla 19 se muestra que la iluminación Infrarroja con blanca no obtuvo modelos con este procesamiento.

*Tabla 18: Resultados cámara 1 IR con encuadre y ecualizado con diferentes CCD width.*

Iluminación	Procesamiento	CCD Width	N° Nubes Preliminar	N° Puntos	Modelo
IR	Encuadre y Ecualizado	3	5	15078	½ iris con ruido cono
		3,5	4	3683	ruido cono
		3,7	4	8756	ruido cono
		3,8	6	7587	ruido cono
		3,9	6	8087	ruido cono
		4	6	14276	½ iris con ruido cono
		4,2	5	8364	ruido cono
		4,4	5	9268	sección del iris visible, con ruido cono

*Tabla 19: Resultados cámara 1 IR + blanca con encuadre y ecualizado con diferentes CCD width.*

Iluminación	Procesamiento	CCD Width	N° Nubes Preliminar	N° Puntos	Modelo
IR + blanca	Encuadre y Ecualizado	3	6	7746	ruido cono
		3,5	6	8226	ruido cono
		3,7	6	8756	ruido cono
		3,8	6	7587	ruido cono
		3,9	6	8807	ruido cono
		4	6	9026	ruido cono
		4,2	6	8364	ruido cono
		4,4	6	9268	ruido cono

Tanto las imágenes con luz puramente infrarroja como las con luz infrarroja y blanca, no obtuvieron modelos al aplicarles el procesamiento *Encuadre y borrar pupila* como se muestra en la Tabla 20 y la Tabla 21. Esto se debe a que al eliminar la pupila se tiene menos área de la imagen con detalles que el algoritmo pueda percibir para el calce de imágenes. Luego sin otros procesamientos a la imagen encuadrada y sin pupila le falta información para lograr construir el modelo.

*Tabla 20: Resultados cámara 1 IR con encuadre y borrar pupila con diferentes CCD width.*

Iluminación	Procesamiento	width	N° Nubes Preliminar	N° Puntos	Modelo
IR	<b>Encuadre y Borrar pupila</b>	3	2	0	nada
		3,5	2	0	nada
		3,7	2	0	nada
		3,8	2	0	nada
		3,9	2	0	nada
		4	2	0	nada
		4,2	2	0	nada
		4,4	2	0	nada

*Tabla 21: Resultados cámara 1 IR + blanca con encuadre y borrar pupila con diferentes CCD width.*

Iluminación	Procesamiento	CCD Width	N° Nubes Preliminar	N° Puntos	Modelo
IR + blanca	<b>Encuadre y Borrar pupila</b>	3	2	0	nada
		3,5	2	0	nada
		3,7	2	0	nada
		3,8	2	0	nada
		3,9	2	0	nada
		4	2	0	nada
		4,2	2	0	nada
		4,4	5	0	nada

Al igual que con el procesamiento anterior al realizar *Encuadre, borrar pupila y ecualizado* ni con la iluminación puramente infrarroja ni la mezcla de infrarroja y blanca se consigue construir un modelo como se ve en la Tabla 22 y la Tabla 23. Esta es la razón que se le atribuye a esta falta de modelos, es el ruido gaussiano que se potencia al ecualizar luego de eliminar la pupila.

*Tabla 22: Resultados cámara 1 IR con encuadre, borrar pupila y ecualizado con diferentes CCD width.*

Iluminación	Procesamiento	CCD Width	N° Nubes Preliminar	N° Puntos	Modelo
IR	<b>Encuadre, Borrar pupila y Ecualizado</b>	3	2	0	nada
		3,5	2	0	nada
		3,7	2	0	nada
		3,8	2	0	nada
		3,9	2	0	nada
		4	2	0	nada
		4,2	2	0	nada
		4,4	2	0	nada



Tabla 23: Resultados cámara 1 IR +blanca con encuadre, borrar pupila y ecualizado con diferentes CCD width.

Iluminación	Procesamiento	CCD Width	N° Nubes Preliminar	N° Puntos	Modelo
IR + blanca	Encuadre, borrar pupila y ecualizado	3	2	0	nada
		3,5	2	0	nada
		3,7	2	0	nada
		3,8	2	0	nada
		3,9	2	0	nada
		4	2	0	nada
		4,2	2	0	nada
		4,4	2	0	nada

Por otra parte al utilizar el procesamiento *Encuadre, ecualizado y borrar pupila* se comienzan obtener modelos. En la Tabla 24 se muestra que el escenario con luz infrarroja obtiene dos *modelos del iris* como los de la Ilustración 41 y un *modelo iris ruidoso* como el que se ve en la Ilustración 63. Mientras que el escenario con luz infrarroja y blanca obtiene modelos con descripción *sección del iris visible, con ruido cono y 1/2 del iris con ruido cono* como los de la Ilustración 36 y la Ilustración 37 respectivamente. Por lo tanto se tiene que las imágenes con luz puramente infrarroja obtuvieron mejores resultados con este tipo de procesamiento.

Tabla 24: Resultados cámara 1 IR con encuadre, ecualizado y borrar pupila con diferentes CCD width.

Iluminación	Procesamiento	CCD Width	N° Nubes Preliminar	N° Puntos	Modelo
IR	Encuadre, ecualizado y borrar pupila	3	2	0	nada
		3,5	2	0	nada
		3,7	4	0	nada
		3,8	3	0	nada
		3,9	5	24713	Modelo del iris ruidoso
		4	4	0	nada
		4,2	4	72	ruido
		4,4	5	844	ruido
		4,7	4	24800	Modelo del iris
		7	4	23135	Modelo del iris

Tabla 25: Resultados cámara 1 IR + blanca con encuadre, ecualizado y borrar pupila con diferentes CCD width.

Iluminación	Procesamiento	CCD Width	N° Nubes Preliminar	N° Puntos	Modelo
IR + blanca	Encuadre, ecualizado y borrar pupila	3	6	12916	½ iris con ruido cono
		3,5	2	0	nada
		3,7	5	8467	ruido cono
		3,8	6	9152	sección del iris visible, con ruido cono
		3,9	6	15678	½ iris con ruido cono
		4	6	13202	sección del iris visible, con ruido cono
		4,2	6	11800	ruido cono
		4,4	2	0	nada

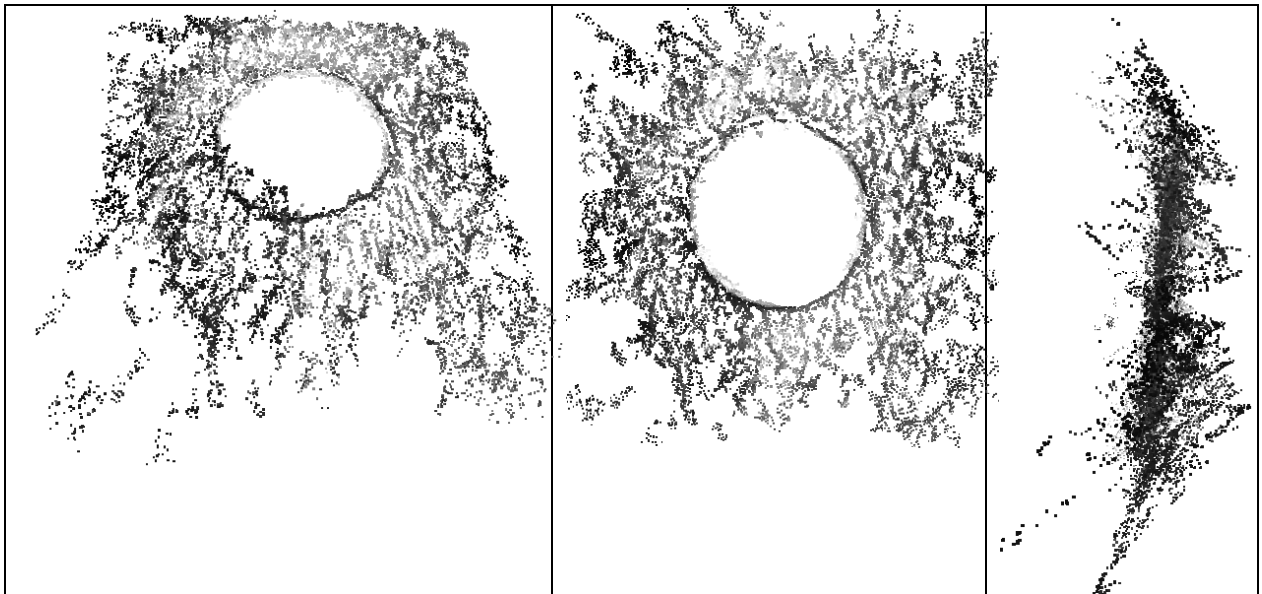


Ilustración 63: Modelo iris ruidoso.

Finalmente se tienen los resultados obtenidos al aplicar el procesamiento *Encuadre, suavizado, borrar pupila y ecualizado*. En la Tabla 26 se muestran los resultados obtenidos al aplicar este procesamiento en las imágenes con luz infrarroja, se tienen que al utilizar los CCD width 3,7 y 4,4 se obtienen modelos del tipo *Modelo del iris ruidoso* y que al utilizar CCD width 4 se obtiene un modelo del tipo *½ del iris ruidoso* como el de la Ilustración 38. Por otra parte en la Tabla 27 se muestran los resultados obtenidos al utilizar las imágenes con luz blanca e infrarroja, se tienen dos modelos del tipo *½ del iris ruidos* y un modelo del tipo *sección del iris visible, con ruido cono*.

**Tabla 26: Resultados cámara 1 IR con encuadre, suavizado, ecualizado y borrar pupila con diferentes CCD width.**

Iluminación	Procesamiento	CCD Width	Nº Nubes Preliminar	Nº Puntos	Modelo
IR	<b>Encuadre, suavizado, borrar pupila y ecualizado</b>	3	6	5594	ruido cono
		3,5	6	6330	ruido cono
		3,7	6	1945	Modelo del iris ruidoso
		3,8	6	6004	ruido cono
		3,9	6	6258	ruido cono
		4	6	1541	½ iris ruidoso
		4,2	6	4306	ruido cono
		4,4	6	2008	Modelo del iris ruidoso

**Tabla 27: Resultados cámara 1 IR + blanca con encuadre, suavizado, ecualizado y borrar pupila con diferentes CCD width.**

Iluminación	Procesamiento	CCD Width	Nº Nubes Preliminar	Nº Puntos	Modelo
IR + blanca	<b>Encuadre, suavizado, borrar pupila y ecualizado</b>	3	7	5480	ruido cono
		3,4	8	19600	½ iris ruidoso
		3,5	8	12070	sección del iris visible, con ruido cono
		3,7	6	4737	ruido cono
		3,8	2	0	nada
		3,9	2	0	nada
		4	2	0	nada
		4,2	7	9603	ruido cono
4,4	7	11874	½ iris ruidoso		

De los resultados se aprecia que para las imágenes con iluminación infrarroja pura el procesamiento que obtiene los mejores resultados es el *Encuadre, ecualizado y borrar pupila* donde se obtienen dos modelos del iris bien formados. Por otra parte para la iluminación infrarroja y blanca el procesamiento *Encuadre, suavizado, borrar pupila y ecualizado* donde se obtienen dos modelos del tipo *½ iris ruidoso*. Por lo tanto las imágenes con iluminación puramente infrarroja obtuvieron mejores resultados que los con luz blanca e infrarroja.

### H.3. Modelamiento variando la cantidad de imágenes

En esta sección se muestran los resultados que entregaron modelos, al variar la cantidad de imágenes de los conjuntos de entrada, Utilizando el procesamiento *Encuadre, ecualizado y borrar pupila* con el CCD width que entrego los mejores resultados en cada tipo de iluminación para la cámara 1. En este caso solo se llegó a probar eliminando tres imágenes de los conjuntos. Se ve en la Tabla 28 que en el caso de la iluminación infraroja se obtienen 2 modelos del iris bien formados, 3 *Modelos del iris ruidosos* y un modelo del tipo *½ iris con ruido cono*. Mientras que en la Tabla 29 se muestra que con la iluminación infrarroja y blanca solo se obtienen 3 modelos del tipo *¾ del iris ruidoso*. Esto muestra que al eliminar imágenes se pueden conseguir mejoras en los modelos.

**Tabla 28: Resultados eliminación de imágenes cámara 1 IR con encuadre, ecualizado y borrar pupila con CCD width 4,7.**

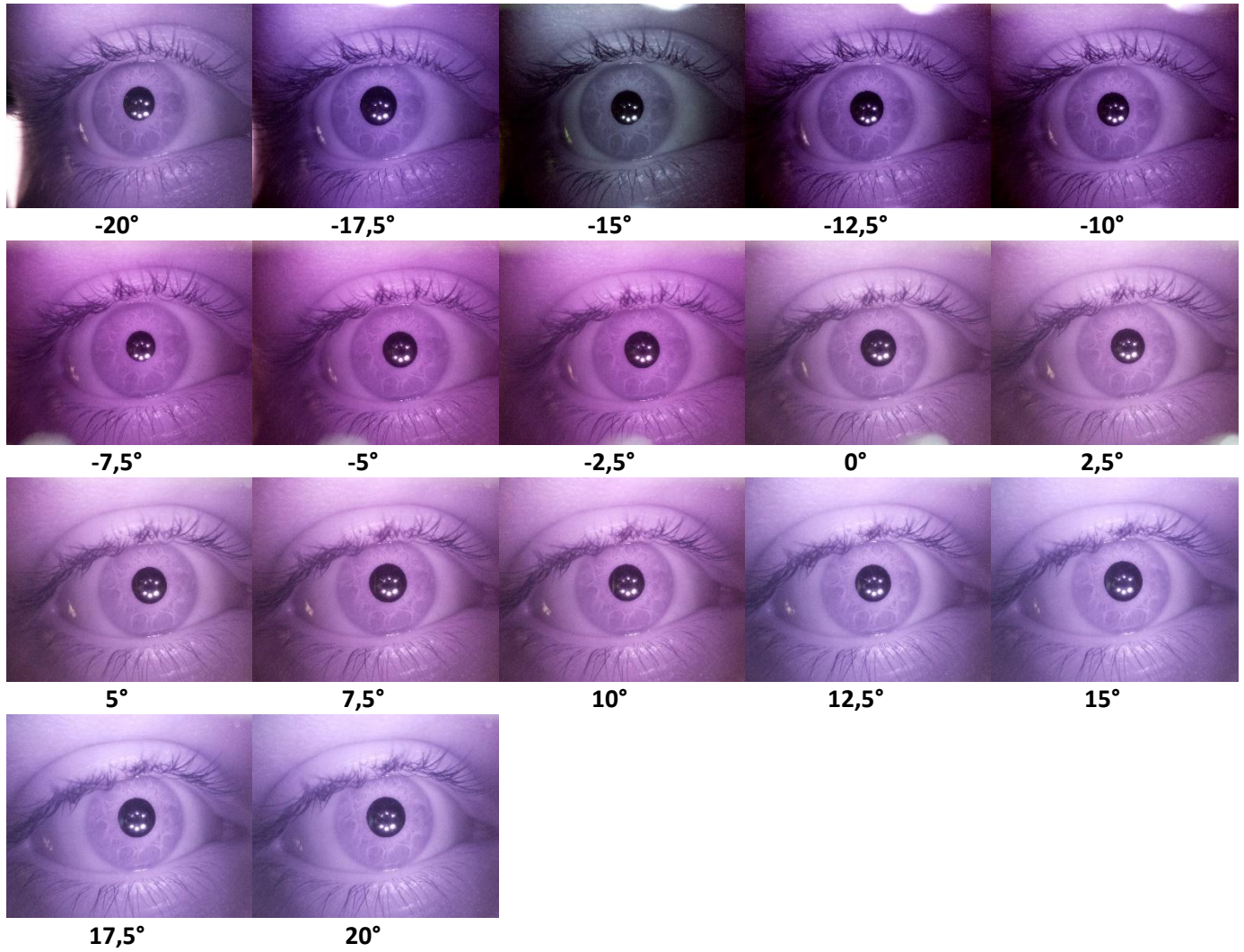
Iluminación	Procesamiento	CCD Width	Imágenes Eliminadas	N° Nubes Preliminar	N° Puntos	Modelo
IR	Encuadre, ecualizado Y borrar pupila	4,7	2	4	31451	Modelo del iris
		4,7	2,7	4	24399	Modelo del iris
		4,7	2,16	4	13151	Modelo del iris ruidoso
		4,7	2,7,1	4	11696	Modelo del iris ruidoso
		4,7	2,7,9	4	3846	½ iris con ruido cono
		4,7	2,7,1	4	10764	Modelo del iris ruidoso

**Tabla 29: Resultados eliminación de imágenes cámara 1 IR + blanca con encuadre, ecualizado y borrar pupila con CCD width 2,5.**

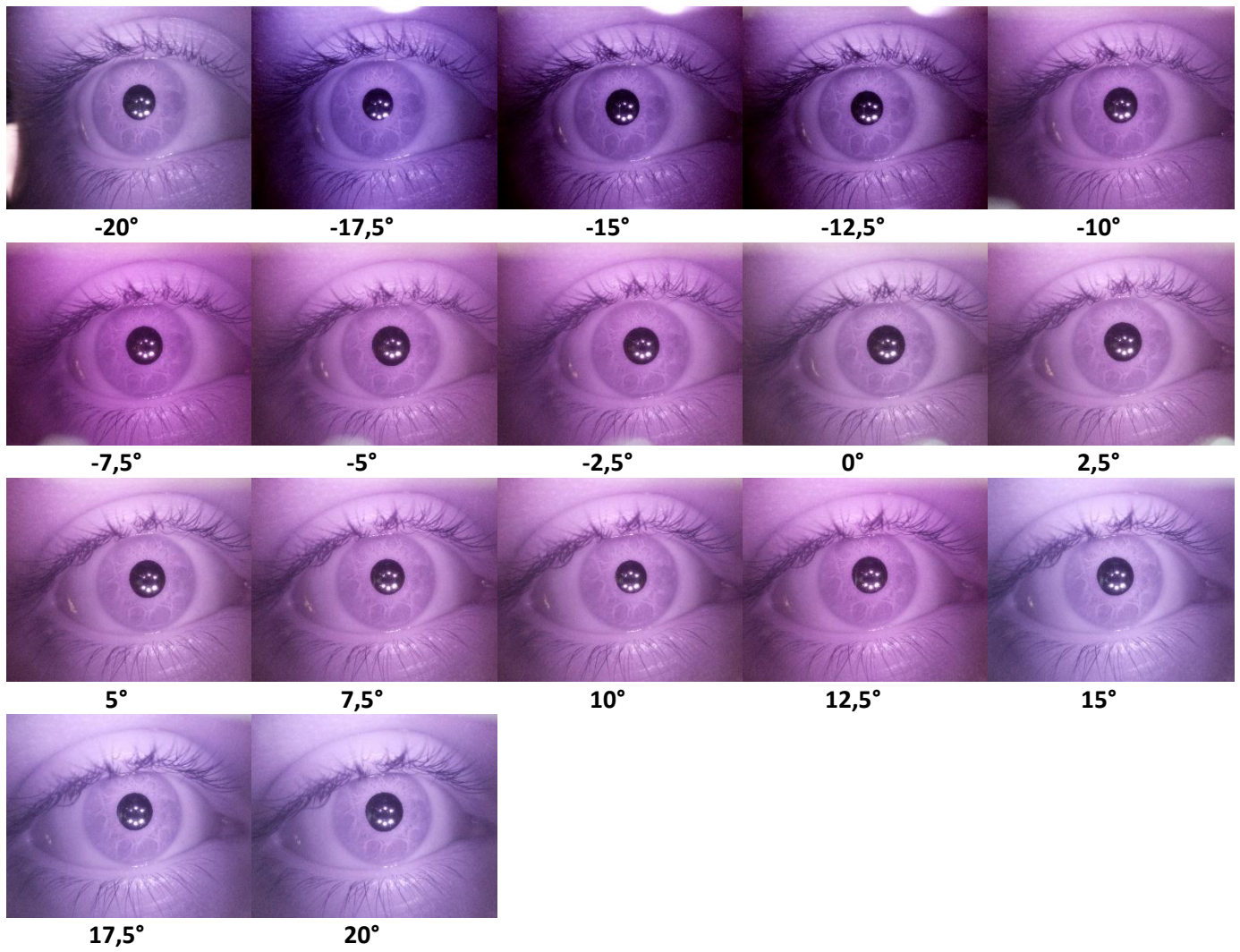
Iluminación	Procesamiento	CCD Width	Imágenes Eliminadas	N° Nubes Preliminar	N° Puntos	Modelo
IR + Blanca	Encuadre, ecualizado Y borrar pupila	2,5	10	6	14710	¾ del iris ruidoso
		2,5	14	6	9256	¾ del iris ruidoso
		2,5	14,13	6	16520	¾ del iris ruidoso

## Anexo I. Resultados de la Validación

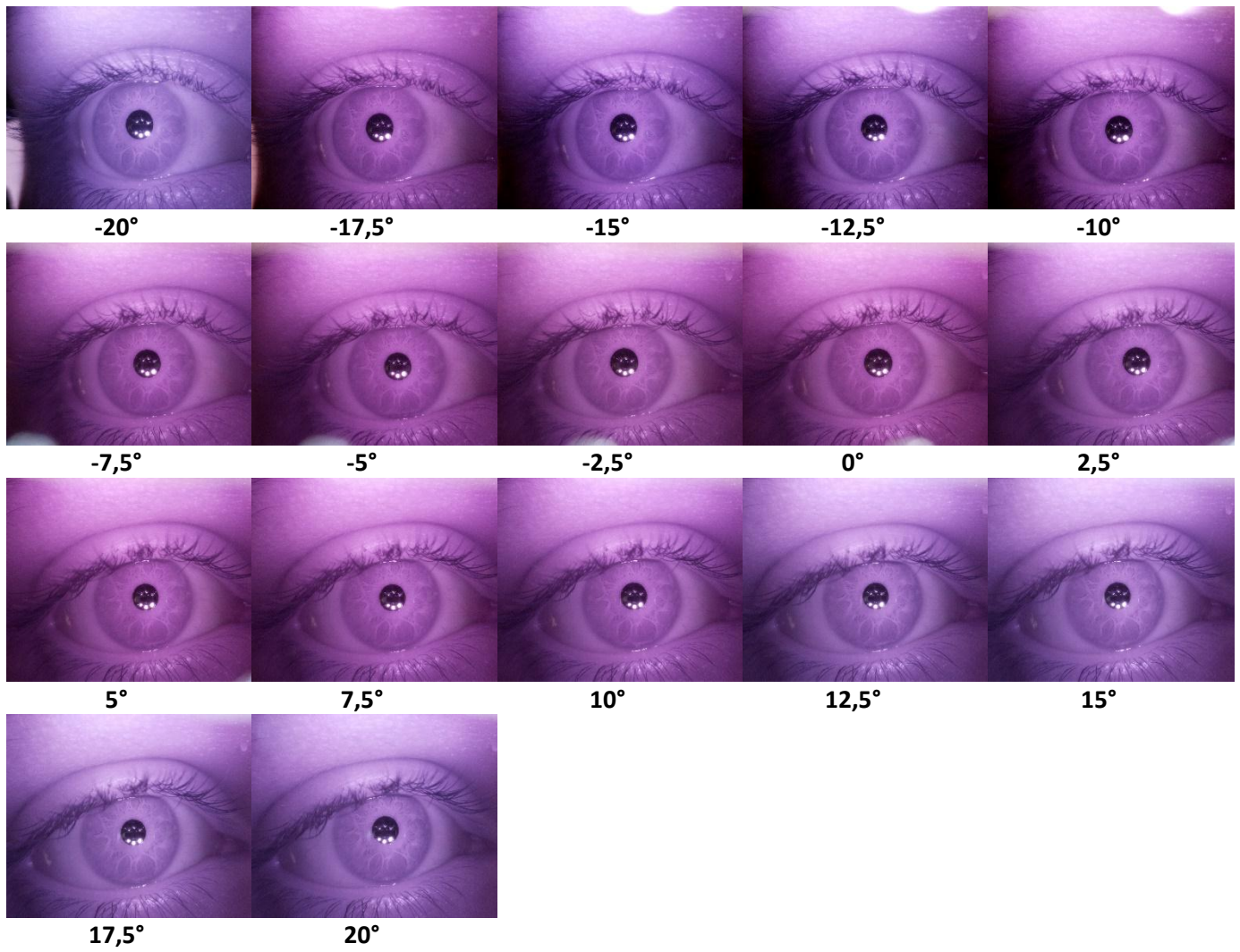
### I.1. Conjuntos de imágenes Iris 1



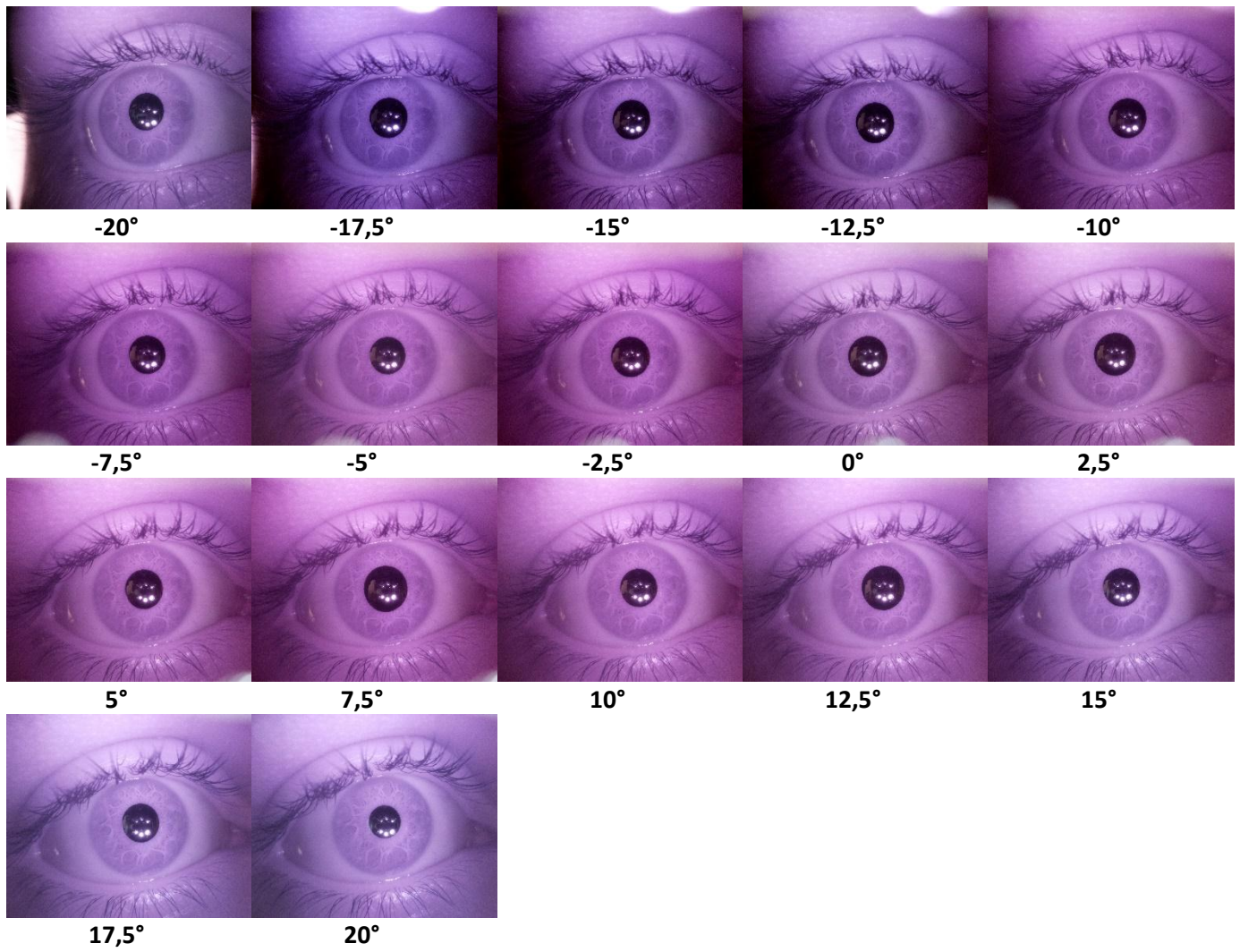
*Ilustración 64: Conjunto de imágenes de validación iris 1\_1.*



*Ilustración 65: Conjunto de imágenes de validación iris 1\_2.*

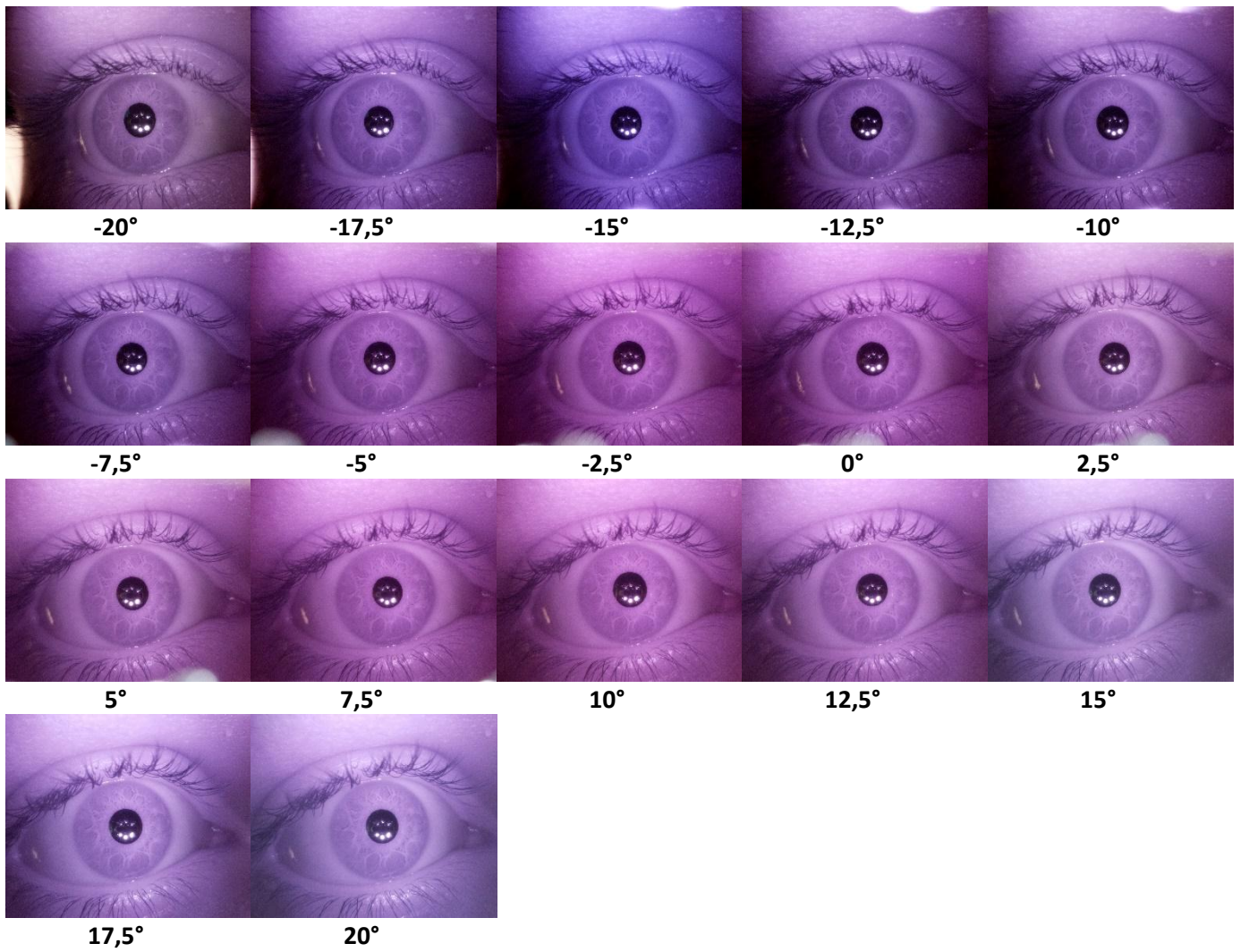


*Ilustración 66: Conjuntos de imágenes de validación iris 1\_3.*

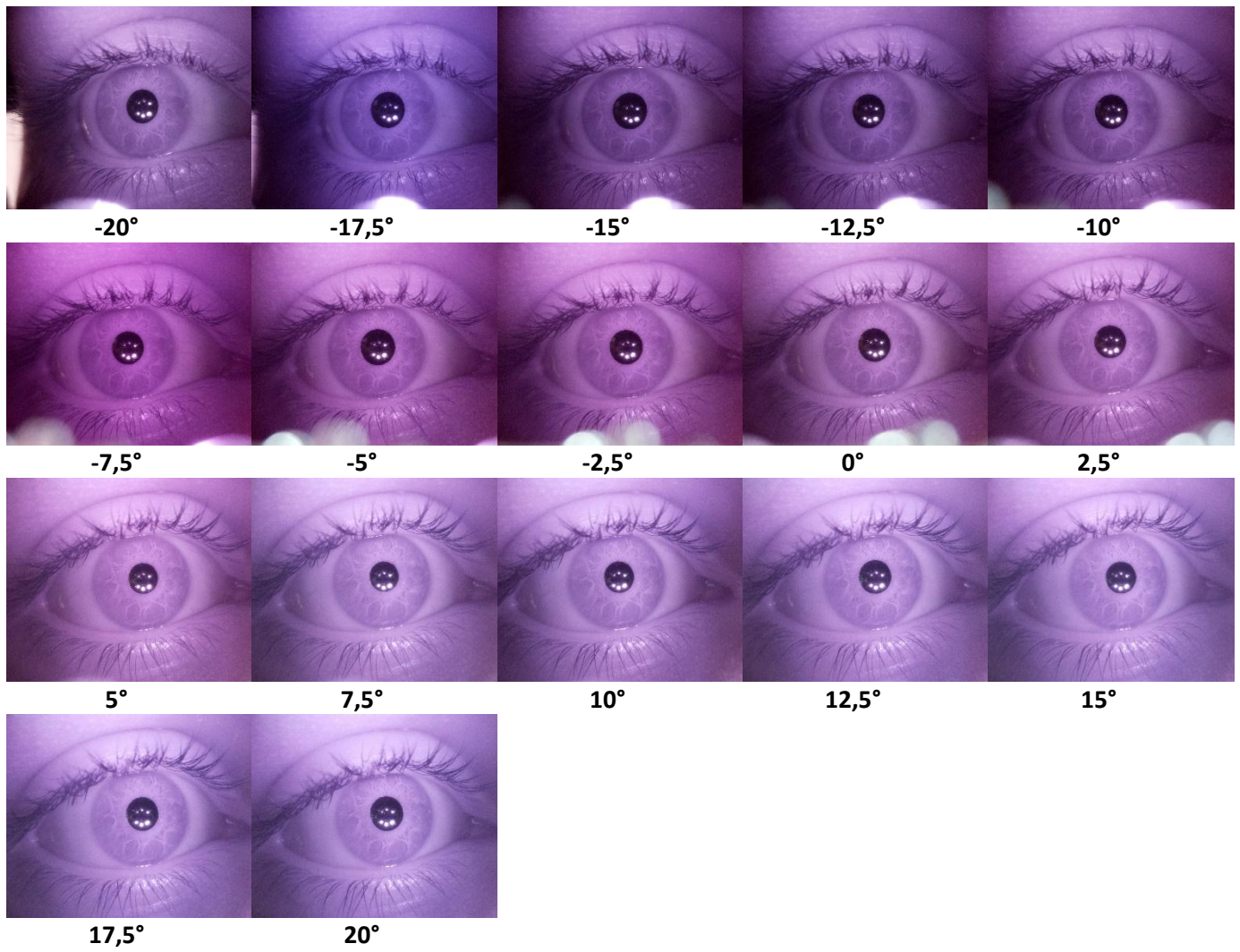


*Ilustración 67: Conjuntos de imágenes de validación iris 1\_4.*

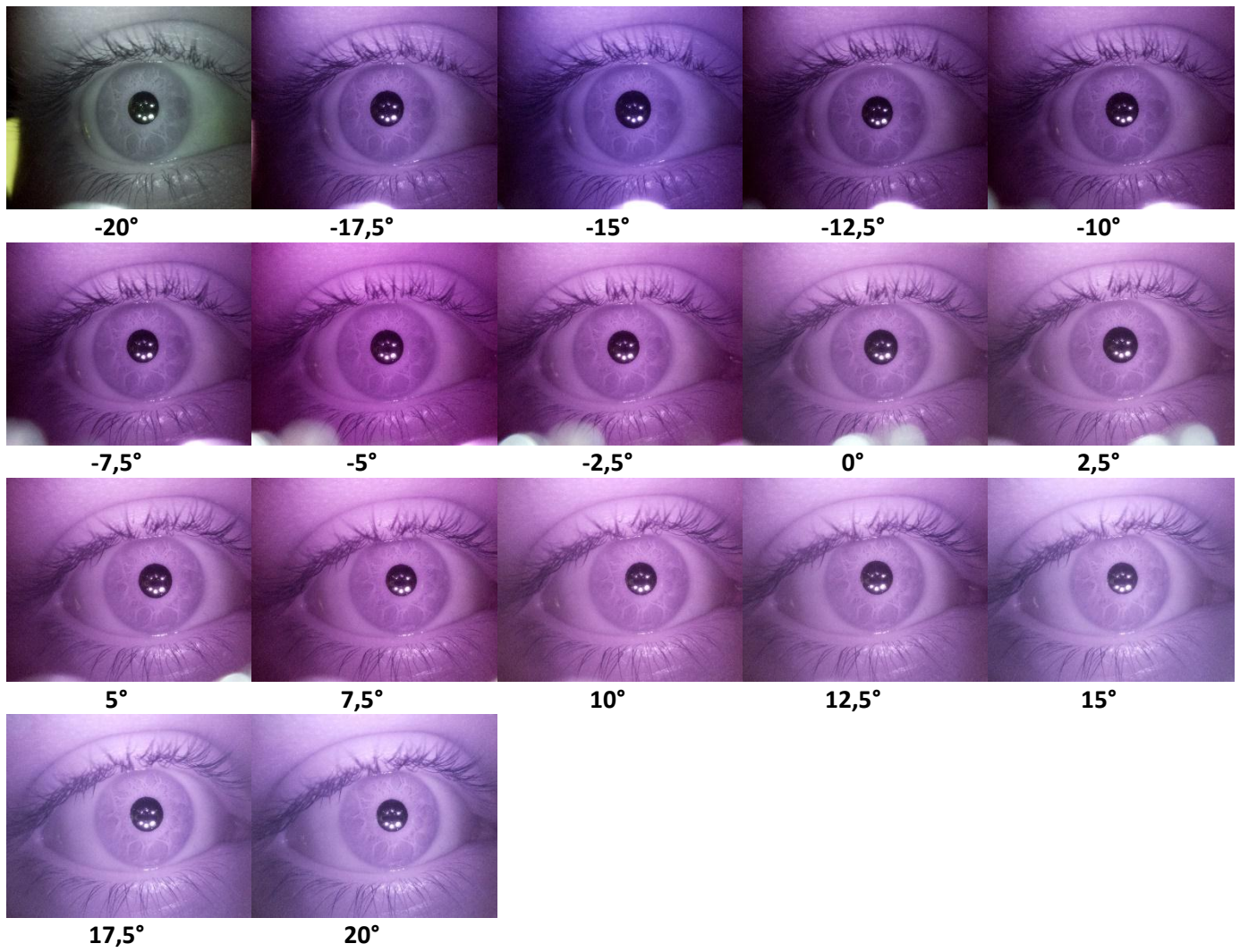




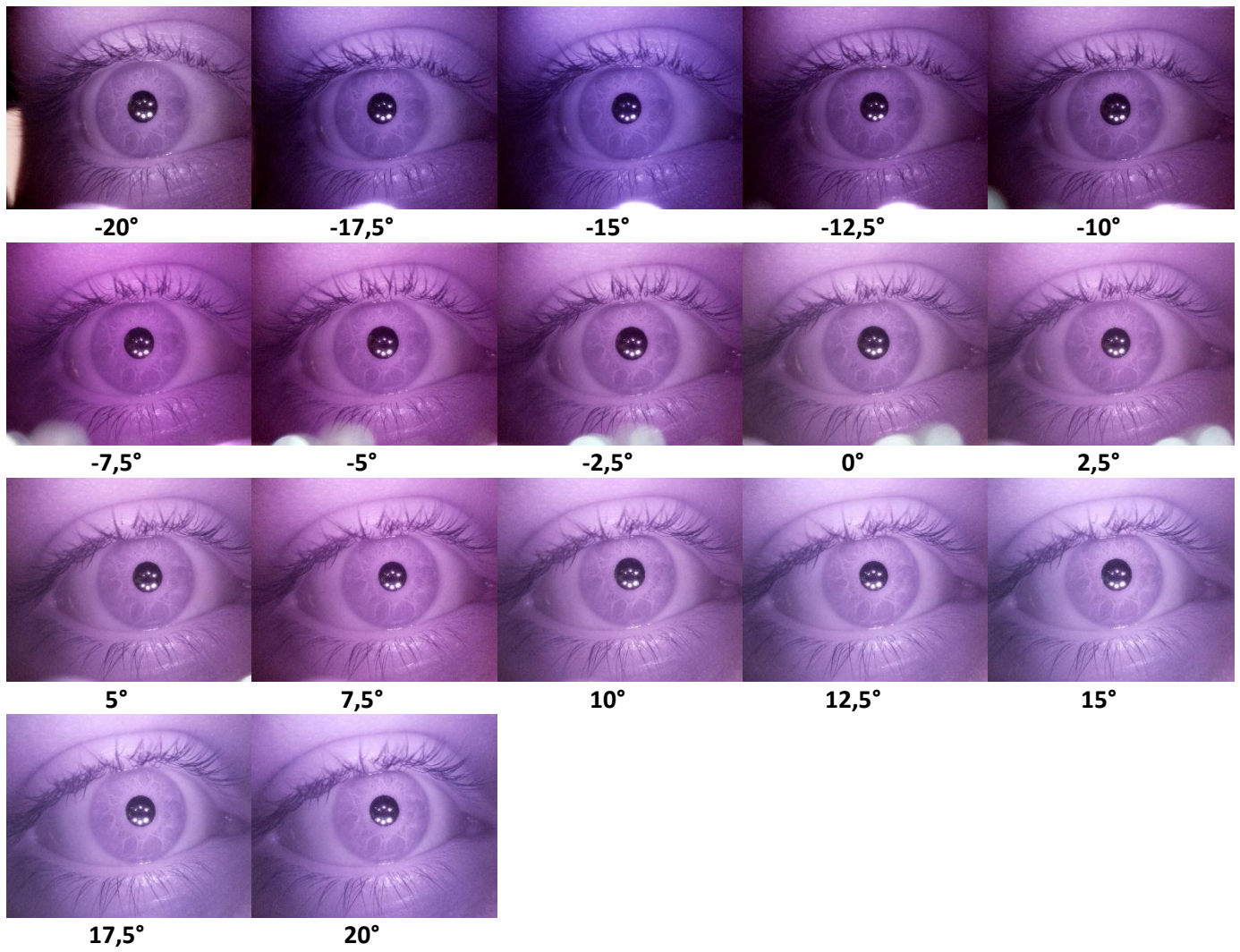
*Ilustración 68: Conjuntos de imágenes de validación iris 1\_5.*



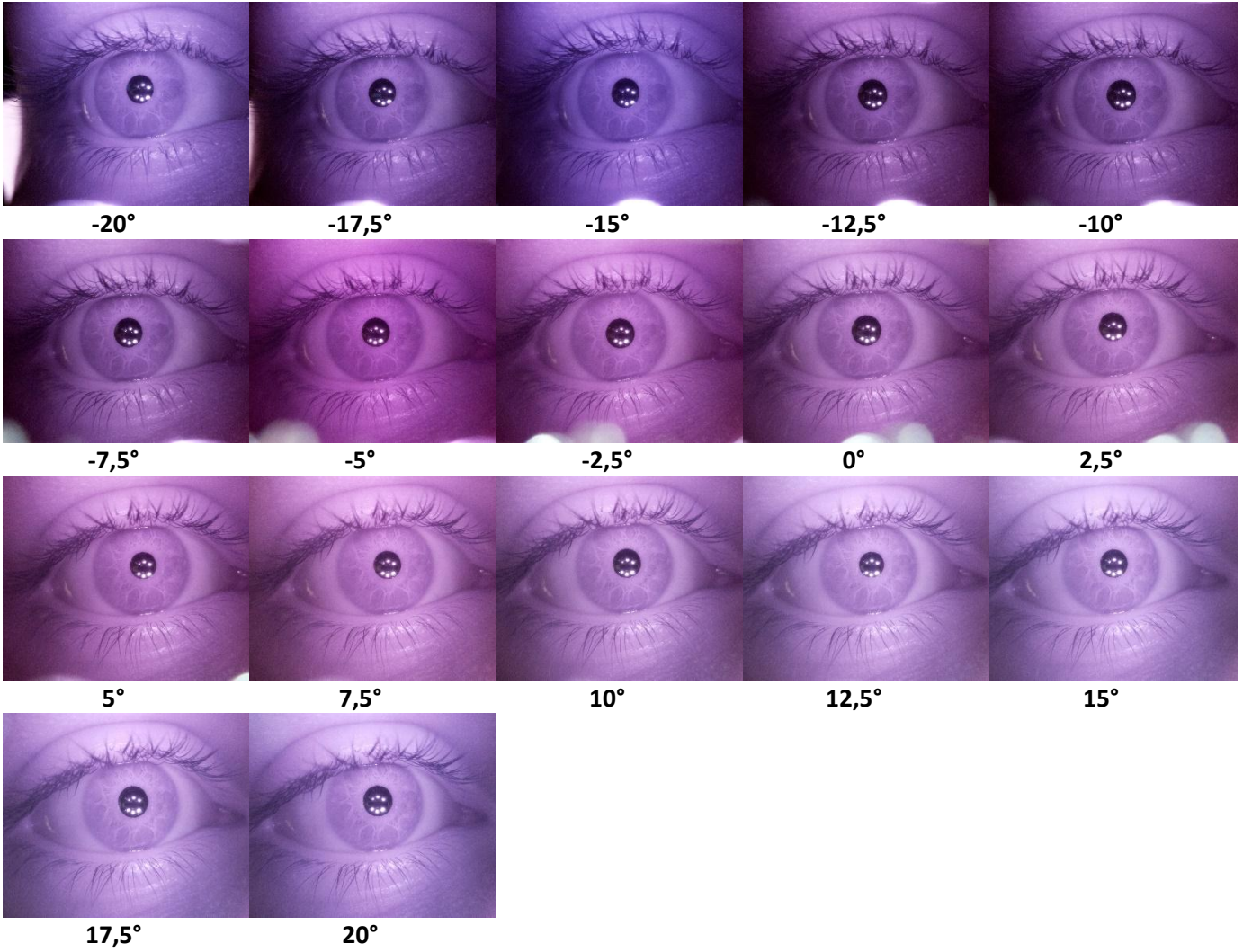
*Ilustración 69: Conjuntos de imágenes de validación iris 1\_6.*



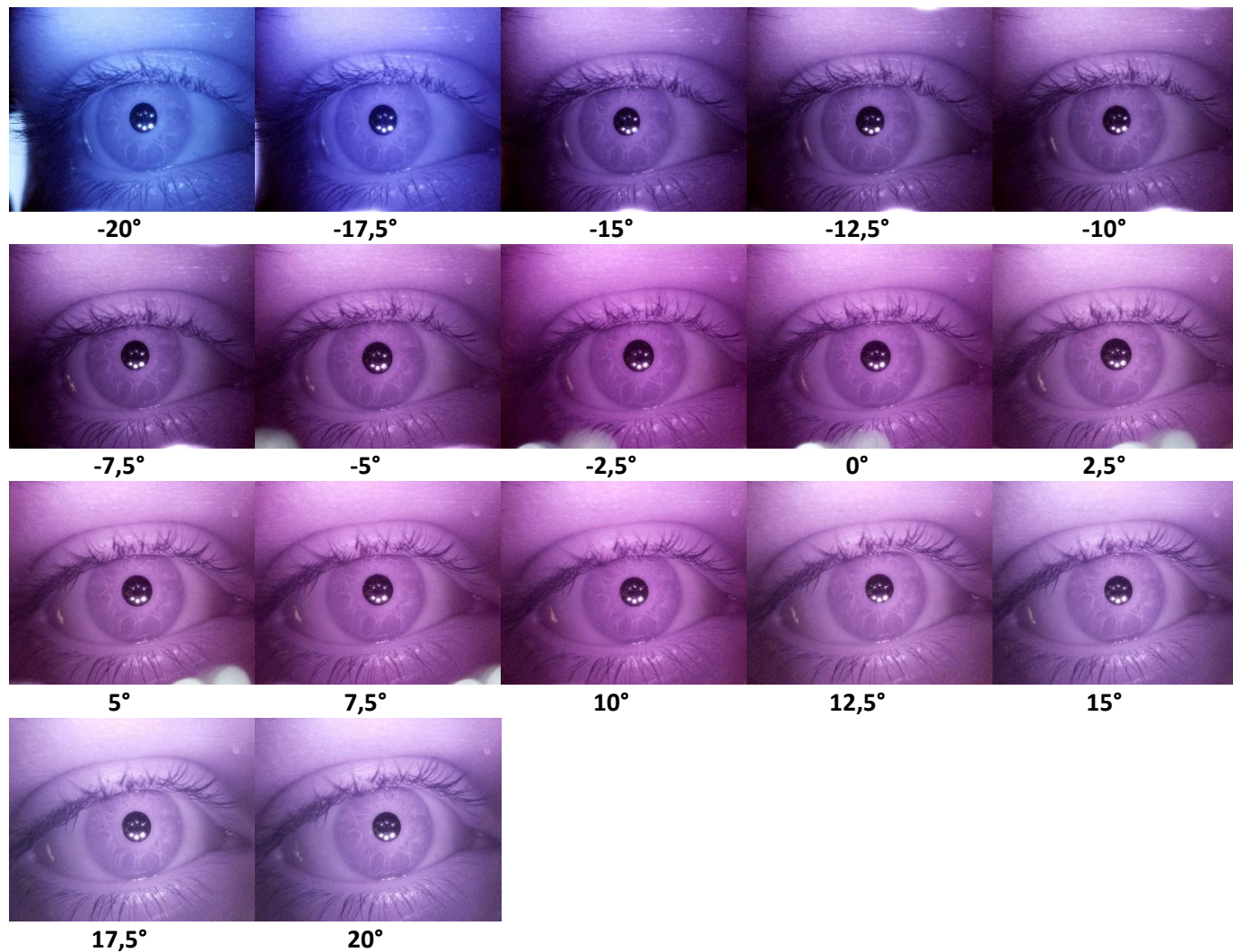
*Ilustración 70: Conjuntos de imágenes de validación iris 1\_7.*



*Ilustración 71: Conjuntos de imágenes de validación iris 1\_8.*



*Ilustración 72: Conjuntos de imágenes de validación iris 1\_9.*



*Ilustración 73: Conjuntos de imágenes de validación iris 1\_10.*

## I.2. Resultados variación CCD width Iris 1

Tabla 30: Resultados variar combinaciones CCD width, en el conjunto de imágenes de validación iris 1\_1.

Tipo	Procesamientos	CCD Width	N° Nubes Preliminares	Puntos	Modelo
Iris_1_1	<b>Encuadre, suavizado, Borrar pupila y Ecuilizado</b>	99	4	0	nada
		100	4	0	nada
		101	5	6581	ruido cono
		102	3	5456	ruido cono
		103	3	3774	ruido cono
		104	4	5940	ruido cono
		105	4	6438	ruido cono
		106	3	6349	ruido cono
		107	3	473	ruido
		108	3	0	nada
		109	3	0	nada
		110	3	512	ruido

Tabla 31: Resultados variar combinaciones CCD width, en el conjunto de imágenes de validación iris 1\_2.

Tipo	Procesamientos	CCD Width	N° Nubes Preliminares	Puntos	Modelo
Iris_1_2	<b>Encuadre, suavizado, Borrar pupila y Ecuilizado</b>	99	2	0	nada
		100	2	0	nada
		101	2	0	nada
		102	4	620	ruido
		103	2	0	nada
		104	2	0	nada
		105	2	0	nada
		106	4	399	ruido
		107	3	0	nada
		108	4	7322	ruido cono
		109	4	8144	ruido cono
		110	4	8252	ruido cono

Tabla 32: Resultados variar combinaciones CCD width, en el conjunto de imágenes de validación iris 1\_3.

Tipo	Procesamientos	CCD Width	N° Nubes Preliminares	Puntos	Modelo
Iris_1_3	<b>Encuadre, suavizado, Borrar pupila y Ecuilizado</b>	99	2	7808	ruido cono
		100	2	6963	ruido cono
		101	2	8261	ruido cono
		102	2	7636	ruido cono
		103	2	7264	ruido cono
		104	2	7384	ruido cono
		105	2	7672	ruido cono
		106	2	8627	ruido cono
		107	2	7774	ruido cono
		108	2	7772	ruido cono
		109	2	8284	ruido cono
		110	2	8924	ruido cono

Tabla 33: Resultados variar combinaciones CCD width, en el conjunto de imágenes de validación iris 1\_4.

Tipo	Procesamientos	CCD Width	N° Nubes Preliminares	Puntos	Modelo
Iris_1_4	<b>Encuadre, suavizado, Borrar pupila y Ecuilizado</b>	99	5	4067	ruido cono
		100	5	23090	modelo iris ruidos
		101	5	16513	$\frac{3}{4}$ modelo iris ruidoso
		102	5	6118	ruido cono
		103	5	1424	ruido cono
		104	4	3746	ruido cono
		105	4	24029	modelo iris
		106	4	21848	modelo iris ruidos
		107	4	6457	ruido cono
		108	4	21267	modelo iris ruidos
		109	4	1808	ruido cono
		110	5	1674	ruido cono



*Tabla 34: Resultados variar combinaciones CCD width, en el conjunto de imágenes de validación iris 1\_5.*

Tipo	Procesamientos	CCD Width	N° Nubes Preliminares	Puntos	Modelo
<b>Iris_1_5</b>	<b>Encuadre, suavizado, Borrar pupila y Ecuilizado</b>	99	2	5613	ruido cono
		100	2	6331	ruido cono
		101	2	5918	ruido cono
		102	2	6188	ruido cono
		103	2	5856	ruido cono
		104	2	6468	ruido cono
		105	2	5444	ruido cono
		106	2	8688	ruido cono
		107	2	7629	ruido cono
		108	2	5905	ruido cono
		109	2	5370	ruido cono
		110	2	5604	ruido cono

*Tabla 35: Resultados variar combinaciones CCD width, en el conjunto de imágenes de validación iris 1\_6.*

Tipo	Procesamientos	CCD Width	N° Nubes Preliminares	Puntos	Modelo
<b>Iris_1_6</b>	<b>Encuadre, suavizado, Borrar pupila y Ecuilizado</b>	99	4	5987	ruido cono
		100	3	0	nada
		101	4	3991	ruido cono
		102	4	0	nada
		103	4	7942	ruido cono
		104	4	4189	ruido cono
		105	4	5077	ruido cono
		106	4	2796	ruido cono
		107	4	6995	ruido cono
		108	4	7734	ruido cono
		109	4	7630	ruido cono
		110	4	6774	ruido cono

*Tabla 36: Resultados variar combinaciones CCD width, en el conjunto de imágenes de validación iris 1\_7.*

Tipo	Procesamientos	CCD Width	N° Nubes Preliminares	Puntos	Modelo
<b>Iris_1_7</b>	<b>Encuadre, suavizado, Borrar pupila y Ecuilizado</b>	99	3	4569	ruido cono
		100	3	6884	ruido cono
		101	3	6049	ruido cono
		102	3	7031	ruido cono
		103	3	5040	ruido cono
		104	3	6712	ruido cono
		105	3	4374	ruido cono
		106	3	5381	ruido cono
		107	3	4969	ruido cono
		108	3	4928	ruido cono
		109	3	4286	ruido cono
		110	3	4664	ruido cono

*Tabla 37: Resultados variar combinaciones CCD width, en el conjunto de imágenes de validación iris 1\_8.*

Tipo	Procesamientos	CCD Width	N° Nubes Preliminares	Puntos	Modelo
<b>Iris_1_8</b>	<b>Encuadre, suavizado, Borrar pupila y Ecuilizado</b>	99	2	8655	ruido cono
		100	2	10085	ruido cono
		101	2	8355	ruido cono
		102	2	7517	ruido cono
		103	2	0	nada
		104	2	8325	ruido cono
		105	2	7353	ruido cono
		106	2	8253	ruido cono
		107	2	8507	ruido cono
		108	2	0	nada
		109	2	7319	ruido cono
		110	2	6874	ruido cono

*Tabla 38: Resultados variar combinaciones CCD width, en el conjunto de imágenes de validación iris 1\_9.*

Tipo	Procesamientos	CCD Width	N° Nubes Preliminares	Puntos	Modelo
Iris_1_9	<b>Encuadre, suavizado, Borrar pupila y Ecuilizado</b>	99	4	11089	ruido cono
		100	5	16170	½ iris ruido cono
		101	4	10813	ruido cono
		102	4	12410	ruido cono
		103	4	10942	ruido cono
		104	4	19900	½ iris ruido cono
		105	4	23813	Modelo iris ruidoso
		106	5	32850	modelo iris
		107	5	9042	ruido cono
		108	5	8719	ruido cono
		109	5	14186	½ iris ruido cono
110	5	13751	½ iris ruido cono		

*Tabla 39: Resultados variar combinaciones CCD width, en el conjunto de imágenes de validación iris 1\_10.*

Tipo	Procesamientos	CCD Width	N° Nubes Preliminares	Puntos	Modelo
Iris_1_10	<b>Encuadre, suavizado, Borrar pupila y Ecuilizado</b>	99	2	7712	ruido cono
		100	2	0	nada
		101	2	0	nada
		102	2	6821	ruido cono
		103	2	7414	ruido cono
		104	2	7380	ruido cono
		105	2	7041	ruido cono
		106	2	7461	ruido cono
		107	2	6592	ruido cono
		108	2	5449	ruido cono
		109	2	7634	ruido cono
		110	2	7860	ruido cono

### I.3. Resultados variar combinaciones de imágenes Iris 1

Tabla 40: Resultados variar combinaciones de imágenes, en el conjunto de imágenes de validación iris 1\_1.

Tipo	Imágenes eliminadas	CCD Width	Nº Nubes Preliminares	Puntos	Descripción Modelo
<b>Iris_1_1 Encuadre, suavizado, Borrar pupila y Ecuilizado</b>	12	101	3	27986	modelo iris
	15	101	3	10287	ruido cono
	12, 15	101	4	10885	½ modelo iris ruidoso
	12, 15, 11	101	4	9273	½ iris muy ruidoso
	12, 15, 7	101	4	10076	½ iris muy ruidoso

Tabla 41: Resultados variar combinaciones de imágenes, en el conjunto de imágenes de validación iris 1\_2.

Tipo	Imágenes eliminadas	CCD Width	Nº Nubes Preliminares	Puntos	Descripción Modelo
<b>Iris_1_2 Encuadre, suavizado, Borrar pupila y Ecuilizado</b>	11, 10	110	4	15113	¾ iris ruidoso
	11, 10, 12, 5, 3	110	4	12638	¾ iris ruidoso
	11, 10, 12, 5, 9	110	3	15097	Modelo del iris ruidoso
	11, 10, 12, 5, 9, 1	110	4	8137	½ iris ruido cono
	11, 10, 12, 5, 9, 6	110	4	10021	½ iris ruidoso
	11, 10, 12, 5, 9, 8	110	4	17190	Modelo del iris ruidoso
	11, 10, 12, 5, 9, 8, 6	110	4	10640	1/3 iris ruidoso
	11, 10, 12, 5, 9, 8, 6, 13	110	4	14316	Modelo del iris ruidoso
	11, 10, 12, 5, 9, 8, 6, 13, 1	110	4	22613	Modelo del iris
	11, 10, 12, 5, 9, 8, 6, 13, 1, 14, 0, 7	110	3	7374	¾ iris ruidoso
	11, 10, 12, 5, 9, 8, 6, 13, 3	110	3	10298	½ iris ruidoso
	11, 10, 12, 5, 9, 8, 6, 7	110	5	11608	¾ iris ruidoso

Tabla 42: Resultados variar combinaciones de imágenes, en el conjunto de imágenes de validación iris 1\_3.

Tipo	Imágenes eliminadas	CCD Width	Nº Nubes Preliminares	Puntos	Descripción Modelo
<b>Iris_1_3 Encuadre, suavizado, Borrar pupila y Ecuilizado</b>	12	110	2	10490	ruido cono
	13	110	2	11411	ruido cono
	15	110	3	10246	ruido cono
	13, 16	110	2	11261	ruido cono

Tabla 43: Resultados variar combinaciones de imágenes, en el conjunto de imágenes de validación iris 1\_4.

Tipo	Imágenes eliminadas	CCD Width	Nº Nubes Preliminares	Puntos	Descripción Modelo
<b>Iris_1_4 Encuadre, suavizado, Borrar pupila y Ecuilizado</b>	1	105	4	22421	modelo iris ruidoso
	2	105	4	21105	modelo iris ruidoso
	4	105	4	16050	$\frac{3}{4}$ modelo iris ruido cono
	8	105	5	23646	modelo iris
	13	105	4	25353	modelo iris
	13, 3	105	4	22041	modelo iris
	13, 3, 16	105	3	21613	modelo iris ruidoso
	13, 3, 2	105	3	26366	modelo iris
	13, 3, 2, 1	105	4	24102	modelo iris
	13, 3, 2, 11	105	4	9670	$\frac{1}{2}$ iris ruido cono
	13, 3, 2, 15	105	4	24551	modelo iris
	13, 3, 2, 15, 7, 10	105	4	22072	modelo iris ruidoso
	13, 3, 2, 15, 7, 14	105	4	23880	modelo iris
	13, 3, 2, 15, 7, 14, 0	105	4	22275	modelo iris
	13, 3, 2, 15, 7, 14, 0, 10	105	4	22378	modelo iris
	13, 3, 2, 15, 7, 14, 0, 12	105	4	8154	$\frac{1}{2}$ iris ruidoso
	13, 3, 2, 15, 7, 14, 10	105	4	20097	modelo iris
	13, 3, 2, 15, 7, 14, 8	105	4	18746	modelo iris ruidoso
	13, 3, 2, 15, 7, 14, 9	105	5	20756	modelo iris
	13, 3, 2, 15, 7, 6	105	4	16652	modelo iris ruidoso
13, 3, 2, 8	105	3	9559	$\frac{1}{2}$ iris ruidoso	
13, 3, 6	105	5	8100	$\frac{1}{2}$ iris ruido cono	

*Tabla 44: Resultados variar combinaciones de imágenes, en el conjunto de imágenes de validación iris 1\_5.*

Tipo	Imágenes eliminadas	CCD Width	N° Nubes Preliminares	Puntos	Descripción Modelo
<b>Iris_1_5 Encuadre, suavizado, Borrar pupila y Ecuilizado</b>	4, 3	106	2	8419	ruido cono
	4, 3, 13	106	2	15666	½ iris ruido cono
	4, 3, 8	106	2	8303	ruido cono

*Tabla 45: Resultados variar combinaciones de imágenes, en el conjunto de imágenes de validación iris 1\_6.*

Tipo	Imágenes eliminadas	CCD Width	N° Nubes Preliminares	Puntos	Descripción Modelo
<b>Iris_1_6 Encuadre, suavizado, Borrar pupila y Ecuilizado</b>	11	102	3	8487	ruido cono
	11, 13	102	3	7996	ruido cono
	11, 13, 1, 9, 12	102	4	13222	¾ iris muy ruidoso
	11, 13, 1, 9, 12, 10, 3, 14	102	4	8417	½ iris ruido cono
	11, 13, 1, 9, 12, 10, 3, 14, 5, 15	102	4	7740	½ iris
	11, 13, 1, 9, 12, 10, 3, 14, 5, 8	102	5	8562	½ iris ruidoso
	11, 2	102	2	7826	ruido cono

*Tabla 46: Resultados variar combinaciones de imágenes, en el conjunto de imágenes de validación iris 1\_7.*

Tipo	Imágenes eliminadas	CCD Width	N° Nubes Preliminares	Puntos	Descripción Modelo
<b>Iris_1_7 Encuadre, suavizado, Borrar pupila y Ecuilizado</b>	0	100	2	10423	ruido cono
	10	100	2	9077	ruido cono
	0, 7, 10, 5, 2	100	2	13383	½ iris muy ruidoso

*Tabla 47: Resultados variar combinaciones de imágenes, en el conjunto de imágenes de validación iris 1\_8.*

Tipo	Imágenes eliminadas	CCD Width	N° Nubes Preliminares	Puntos	Descripción Modelo
<b>Iris_1_8 Encuadre, suavizado, Borrar pupila y Ecuilizado</b>	0	100	2	10423	ruido cono
	10	100	2	9077	ruido cono
	0,7,10,5,2	100	2	13383	½ iris muy ruidoso

*Tabla 48: Resultados variar combinaciones de imágenes, en el conjunto de imágenes de validación iris 1\_9.*

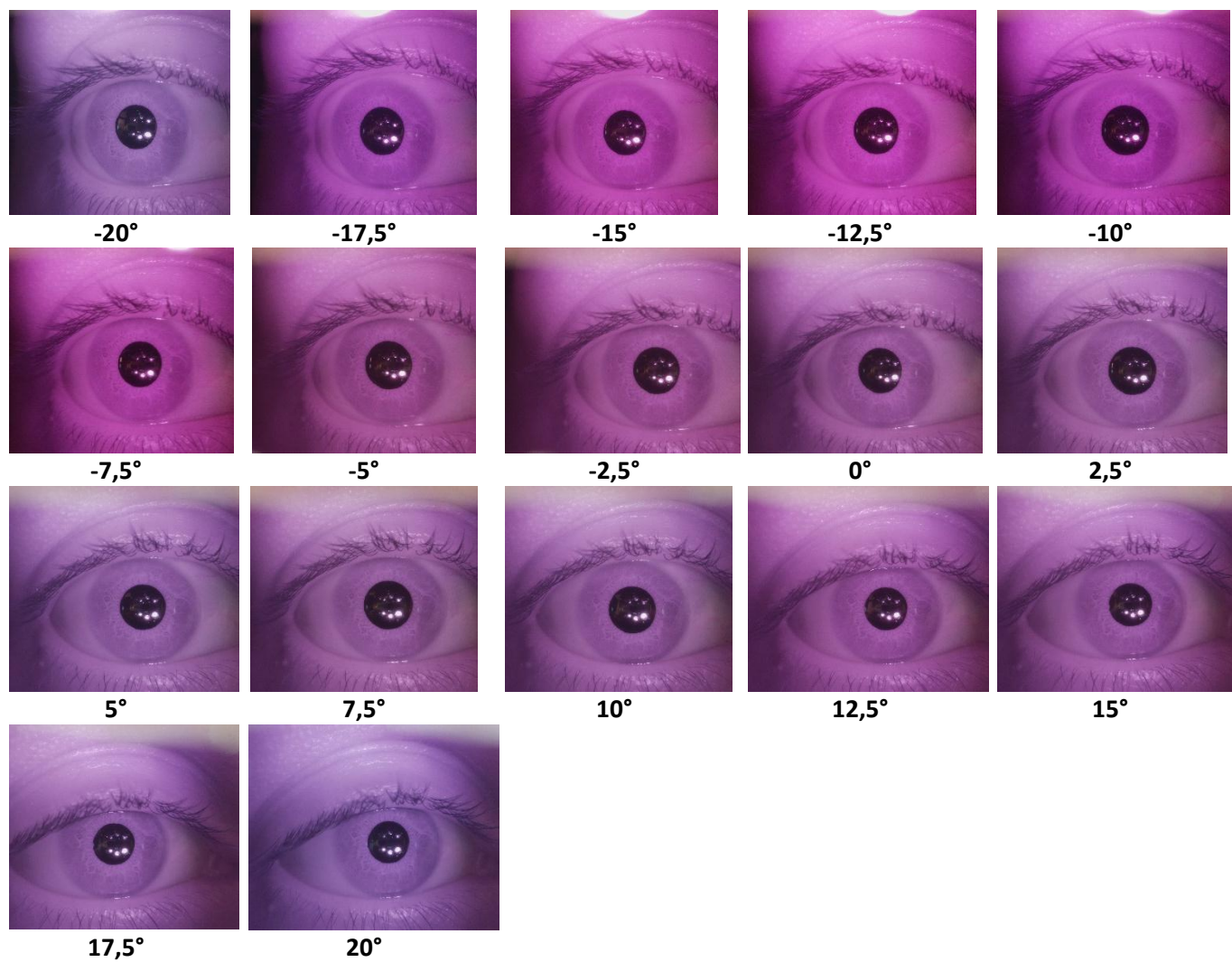
Tipo	Imágenes eliminadas	CCD Width	N° Nubes Preliminares	Puntos	Descripción Modelo
<b>Iris_1_9 Encuadre, suavizado, Borrar pupila y Ecuilizado</b>	11	106	5	11622	ruido cono
	16	106	5	13798	ruido cono
	16, 4	106	4	11988	ruido cono
	16, 8	106	4	16290	ruido cono
	16, 8, 0	106	4	17812	½ iris ruido cono
	16, 8, 9	106	5	20977	Modelo iris ruidoso
	16, 8, 9, 11	106	4	11218	ruido cono
	16, 8, 9, 11, 1	106	4	13730	½ iris ruido cono
	16, 8, 9, 11, 10	106	4	16771	¾ iris ruidoso
	16, 8, 9, 11, 10, 6	106	4	15032	½ iris ruido cono

**Tabla 49: Resultados variar combinaciones de imágenes, en el conjunto de imágenes de validación iris 1\_10.**

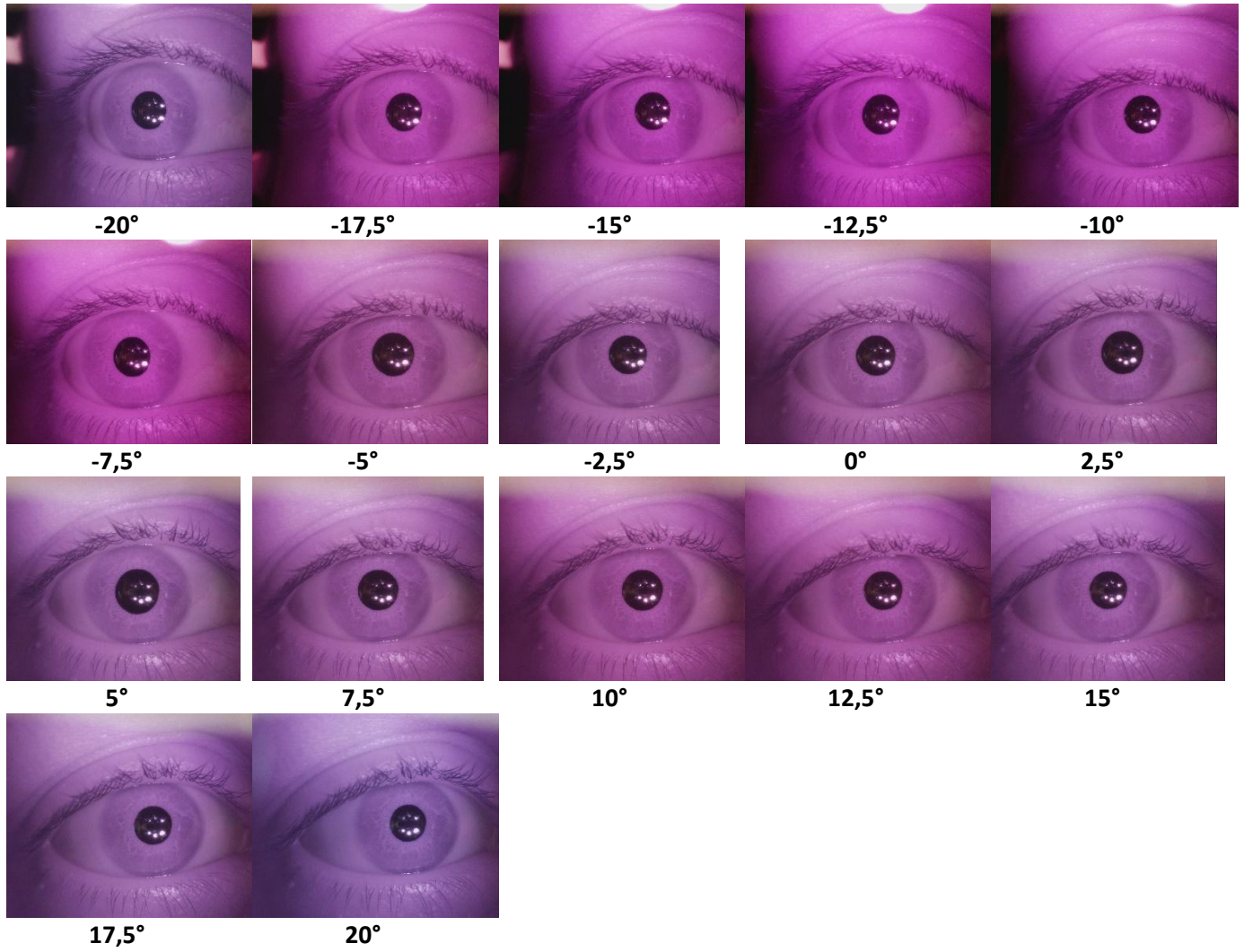
Tipo	Imágenes eliminadas	CCD Width	Nº Nubes Preliminares	Puntos	Descripción Modelo
<b>Iris_1_10 Encuadre, suavizado, Borrar pupila y Ecuilizado</b>	4, 0	110	3	14415	$\frac{3}{4}$ iris ruido cono
	4, 15	110	3	24646	modelo iris ruidoso
	4, 15, 14, 12, 8	110	2	10855	$\frac{1}{2}$ iris ruido cono
	4, 15, 14, 12, 8, 3	110	3	18952	modelo iris ruidoso
	4, 15, 14, 12, 8, 9	110	3	22794	modelo iris ruidoso
	4, 15, 14, 12, 8, 9, 13	110	4	16213	$\frac{3}{4}$ iris ruido cono
	4, 15, 14, 12, 8, 9, 5	110	4	19218	modelo iris ruidoso
	4, 15, 14, 12, 8, 9, 5, 11	110	4	15492	$\frac{3}{4}$ iris ruido cono
	4, 15, 14, 12, 8, 9, 5, 11, 10	110	3	15399	$\frac{3}{4}$ iris ruido cono
	4, 15, 14, 12, 8, 9, 5, 11, 2	110	3	17064	modelo iris ruidoso
	4, 15, 14, 12, 8, 9, 5, 11, 2, 7, 13	110	4	11326	$\frac{3}{4}$ iris ruidoso
	4, 15, 14, 12, 8, 9, 5, 11, 2, 7, 13, 10, 16	110	3	9395	$\frac{3}{4}$ iris ruidoso
	4, 15, 14, 12, 8, 9, 5, 6	110	3	11376	$\frac{1}{2}$ iris ruidoso
	4, 15, 14, 12, 8, 9, 5, 7	110	4	10353	$\frac{1}{2}$ iris ruido cono
	4, 15, 14, 12, 8, 9, 6	110	3	18707	modelo iris ruidoso



#### I.4. Conjuntos de imágenes Iris 2



*Ilustración 74: Conjunto de imágenes de validación iris 2\_1.*



*Ilustración 75: Conjunto de imágenes de validación iris 2\_2.*

## I.5. Resultados variación CCD width Iris 2

Tabla 50: Resultados variar combinaciones CCD width, en el conjunto de imágenes de validación iris 2\_1.

Tipo	Procesamientos	CCD Width	N° Nubes Preliminares	Puntos	Modelo
Iris_2_1	<b>Encuadre, suavizado, Borrar pupila y Ecuilizado</b>	99	3	6545	ruido cono
		100	3	5855	ruido cono
		101	3	4103	ruido cono
		102	3	4346	ruido cono
		103	3	4903	ruido cono
		104	3	5629	ruido cono
		105	3	6904	ruido cono
		106	3	6126	ruido cono
		107	3	5888	ruido cono
		108	3	6595	ruido cono
		109	3	4920	ruido cono
		110	3	5307	ruido cono

Tabla 51: Resultados variar combinaciones CCD width, en el conjunto de imágenes de validación iris 2\_2.

Tipo	Procesamientos	CCD Width	N° Nubes Preliminares	Puntos	Modelo
Iris_2_2	<b>Encuadre, suavizado, Borrar pupila y Ecuilizado</b>	99	2	0	nada
		100	2	0	nada
		101	2	0	nada
		102	2	0	nada
		103	2	0	nada
		104	2	0	nada
		105	2	0	nada
		106	2	0	nada
		107	2	0	nada
		108	2	0	nada
		109	2	0	nada
		110	4	6528	ruido cono

## I.6. Resultados variar combinaciones de imágenes Iris 2

Tabla 52: Resultados variar combinaciones de imágenes, en el conjunto de imágenes de validación iris 2\_1.

Tipo	imágenes eliminadas	CCD Width	N° Nubes Preliminares	Puntos	Descripción Modelo
<b>Iris_2_1 Encuadre, suavizado, Borrar pupila y Ecuilizado</b>	16	105	4	6923	ruido cono
	16, 12, 7, 2, 9, 8, 3, 6, 1	105	4	6923	½ iris ruidoso
	16, 12, 7, 2, 9, 8, 3, 6, 13	105	4	8750	½ iris ruidoso
	16, 12, 7, 2, 9, 8, 3, 6, 15, 11	105	3	8926	½ iris ruidoso
	16, 12, 7, 2, 9, 8, 3, 6, 15	105	4	9476	¾ iris ruidoso
	16, 12, 7, 2, 9, 8, 3, 6, 15, 0	105	4	9857	¾ iris ruidoso
	16, 12, 7, 2, 9, 8, 3, 6	105	4	9956	½ iris muy ruidoso
	16, 12, 7, 2, 9, 8, 3, 6, 15, 1	105	4	12829	¾ iris ruidoso
	16, 12, 7, 2, 9, 5	105	5	13875	½ iris ruido cono
	16, 12, 7, 2, 9, 8	105	4	29627	modelo iris ruidoso

Tabla 53: Resultados variar combinaciones de imágenes, en el conjunto de imágenes de validación iris 2\_2.

Tipo	imágenes eliminadas	CCD Width	N° Nubes Preliminar	Puntos	Descripción Modelo
<b>Iris_2_2 Encuadre, suavizado, Borrar pupila y Ecuilizado</b>	0	110	4	10960	½ iris ruido cono
	12	110	3	10325	½ iris ruido cono
	0, 4	110	5	9168	ruido cono
	0, 5	110	3	11861	½ iris ruido cono
	0, 5, 15, 14	110	5	12359	½ iris ruido cono
	0, 5, 15, 14, 12, 11, 16	110	3	10488	½ iris muy ruidoso
	0, 5, 15, 14, 12, 11, 9	110	4	13317	¾ iris ruidoso
	0, 5, 15, 14, 12, 11, 9, 10	110	4	11147	¾ iris ruidoso
	0, 5, 15, 14, 12, 11, 9, 10, 4	110	4	11081	¾ iris ruidoso
	0, 5, 15, 14, 12, 11, 9, 10, 4, 6	110	4	12973	¾ iris ruidoso