

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CHIHUAHUA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

***“PERFILOMETRÍA DE SUPERFICIES POR
PROYECCIÓN ORTOGONAL DE FRANJAS EN COLOR”***

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

***DOCTORA EN CIENCIAS
EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA***

PRESENTA:

NADIA TORNERO MARTÍNEZ

**DIRECTOR DE LA TESIS:
*DR. GERARDO TRUJILLO SCHIAFFINO***

**CO-DIRECTOR DE LA TESIS:
*DR. MARCELINO ANGUIANO MORALES***

CHIHUAHUA, CHIH., AGOSTO 2021



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



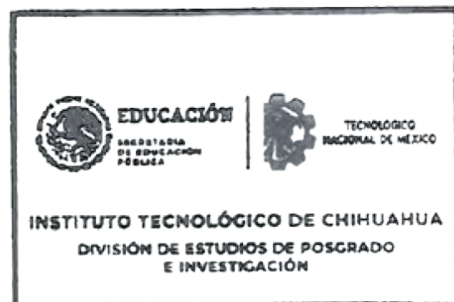


Chihuahua, Chih., 13 de agosto de 2021

NADIA TORNERO MARTÍNEZ
PRESENTE

En cumplimiento con los requerimientos para la obtención del grado de Doctora en Ciencias en Ingeniería Electrónica y a propuesta de su Comité Tutorial, la División de Estudios de Posgrado e Investigación le concede la autorización para imprimir la tesis titulada *"Perfilometría de superficies por proyección ortogonal de franjas en color"*, dirigida por el Dr. Gerardo Trujillo Schiaffino con el siguiente contenido de capítulos:

- I Antecedentes
- II Marco teórico
- III Técnica propuesta
- IV Configuración del sistema
- V Caracterización y calibración
- VI Proyección, captura y procesamiento
- VII Identificación de color
- VIII Análisis, mapas de altura y fusión
- IX Pruebas finales y validación
- X Conclusiones y trabajo futuro



ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®
"La técnica por el Engrandecimiento de México"

ROGELIO ENRIQUE PARAY ARANA
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



Chihuahua, Chih., 11 de agosto de 2021

ROGELIO ENRIQUE BARAY ARANA

JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

PRESENTE

En cumplimiento con los requerimientos para la obtención del grado de Doctora en Ciencias en Ingeniería Electrónica, le notificamos que el documento de tesis de la alumna **NADIA TORNERO MARTÍNEZ** titulado *"Perfilometría de superficies por proyección ortogonal de franjas en color"*, dirigido por el Dr. Gerardo Trujillo Schiaffino, ha sido aprobado y aceptado para su impresión.

Por lo anterior, proponemos le sea concedida la autorización de impresión correspondiente.

Agradeciendo la atención a la presente, quedamos de usted:

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®
"La técnica por el Engrandecimiento de México"

DR. GERARDO TRUJILLO SCHIAFFINO
DIRECTOR DE TESIS

DRA. PALOMA GUADALUPE MENDOZA
VILLEGAS
MIEMBRO DEL COMITÉ TUTORIAL

DR. MARCELINO ANGUIANO MORALES
MIEMBRO DEL COMITÉ TUTORIAL

DRA. DIDIA PATRICIA SALAS PEIMBERT
MIEMBRO DEL COMITÉ TUTORIAL



DR. LUIS FRANCISCO CORRAL MARTÍNEZ
MIEMBRO DEL COMITÉ TUTORIAL



Av. Tecnológico No. 2909 Col. 10 de Mayo C.P. 31310, Chihuahua, Chih.,

Tel. (614) 201 2000, (614) 413 5187, Ext. 2157 e-mail: dir_chihuahua@tecnm.mx

tecnm.mx | itchiuhua.edu.mx





CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la ciudad de Chihuahua el día 13 de agosto de 2021, la que suscribe, NADIA TORNERO MARTÍNEZ con número de control D17061538, del Doctorado en Ciencias en Ingeniería Electrónica adscrito a la División de Estudios de Posgrado e Investigación del Instituto Tecnológico de Chihuahua, manifiesta que es autor intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección de el Dr. Gerardo Trujillo Schiaffino y cede los derechos del trabajo titulado *"Perfilometría de superficies por proyección ortogonal de franjas en color"*, al Tecnológico Nacional de México y/o Instituto Tecnológico de Chihuahua para su difusión, divulgación, transmisión, reproducción, así como su digitalización con fines académicos y de investigación.

NADIA TORNERO MARTÍNEZ



DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD

En la ciudad de Chihuahua el día 13 de agosto de 2021, la que suscribe, NADIA TORNERO MARTÍNEZ con número de control D17061538, del Doctorado en Ciencias en Ingeniería Electrónica adscrito a la División de Estudios de Posgrado e Investigación del Instituto Tecnológico de Chihuahua, manifiesta ser autor intelectual del presente trabajo de Tesis titulado *"Perfilometría de superficies por proyección ortogonal de franjas en color"*, bajo la dirección de el Dr. Gerardo Trujillo Schiaffino; y manifiesta que el contenido es original y que las fuentes de información consultadas para su fundamentación están debidamente citadas y referenciadas.

NADIA TORNERO MARTÍNEZ

Chihuahua, Chih., 1 de Agosto del 2021

Dra. María Elena Álvarez-Buylla Roces
Directora de CONACYT

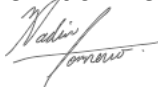
At'n. Mtro. Edwin Ricardo Triujeque Woods
Director de Becas

P r e s e n t e.

Por este conducto aprovecho la ocasión para saludarlo e informarle que a la fecha he obtenido el Grado de Doctorado en Ciencias de Ingeniería Electrónica en la División de Estudios de Posgrado e Investigación del Instituto Tecnológico de Chihuahua. Motivo por el cual agradezco todo el apoyo brindado por esta Institución que Usted representa, el otorgamiento de esta beca permitió dedicarme de tiempo completo a la realización de mis estudios de Posgrado y de esta manera lograr el cumplimiento del objetivo principal del convenio establecido.

Sin otro particular por el momento, le reitero todo mi agradecimiento. Muchas Gracias.

A t e n t a m e n t e



Dra. Nadia Tornero Martínez
Exbecario CONACYT No. 615357

c.c.p. M. C. Rogelio Enrique Baray Arana
Jefe de la División de Estudios de Posgrado e Investigación
Instituto Tecnológico de Chihuahua

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a mis directores de tesis el Dr. Gerardo Trujillo y Dr. Marcelino Anguiano por todo su apoyo en el desarrollo del trabajo, la dedicación que siempre han mostrado y la confianza que tuvieron en mí para ingresar al doctorado. Les agradezco por darme nuevas ideas que me ayudaran a mejorar y por siempre estar dispuestos a apoyarme en los proyectos propuestos. Gracias por ayudarme a cumplir esta meta, por darme las bases para mi desarrollo profesional y por ser un ejemplo de excelencia.

Agradezco a mis maestros Dra. Didia Salas, Dr. Francisco Corral, Dra. Paloma Mendoza y al Dr. Ismael Garduño por su ayuda, sus consejos, sus clases, por la disposición que siempre tienen para apoyarnos, por aclarar cualquier duda que surge y por su esmero. Gracias por compartir todo su conocimiento para nuestro progreso, han sido un gran ejemplo en mi vida. También quiero agradecer a la Maestra Alma Corral por todo su apoyo y atención durante este tiempo, a los maestros y personal que contribuyeron de alguna manera durante mi trayecto en el posgrado.

Agradezco a todos mis compañeros y amigos del Laboratorio de Óptica por compartir su conocimiento para ayudarnos unos a otros, por su amistad, por los buenos momentos que hemos pasado, por compartir todo el trabajo para iniciar el capítulo estudiantil y por las actividades que realizamos. Agradezco mucho por el ambiente que desarrollamos que nos ha permitido colaborar y apoyarnos para crecer profesionalmente.

Agradezco principalmente a mis padres por siempre creer en mí, por todo lo que me han enseñado, por dejarme soñar sin límites y hacerme creer que todo lo puedo lograr. Les agradezco por enseñarme la importancia de la educación y por hacerla una prioridad en nuestras vidas. Agradezco a mis hermanos por creer en mí, por siempre protegerme y hacerme reír; por ser mis mejores amigos y por estar conmigo cuando los necesito. Agradezco a mi familia por ser el pilar de mi vida, por darme fuerza y por empujarme a nuevos desafíos para mi progreso, todo lo que logro es por ustedes.

RESUMEN

PERFILOMETRÍA DE SUPERFICIES POR PROYECCIÓN ORTOGONAL DE FRANJAS EN COLOR

M. C. Nadia Tornero Martínez
Doctorado en Ciencias en Ingeniería Electrónica
División de Estudios de Posgrado e Investigación del
Instituto Tecnológico de Chihuahua
Chihuahua, Chih. 2021
Director de Tesis: Dr. Gerardo Trujillo Schiaffino
Co-Director de Tesis: Dr. Marcelino Anguiano Morales

Las técnicas de perfilometría tridimensional permiten obtener la topografía de un objeto con rapidez y precisión. Existe una gran diversidad de métodos que se pueden utilizar, entre los cuales se encuentra la proyección de luz estructurada. Estos sistemas se basan en la proyección de un patrón de luz sobre una superficie, el cual es deformado por la forma y relieves de la superficie del objeto. La deformación del patrón de luz que se percibe al hacer la proyección se puede analizar digitalmente por medio de diversos procedimientos para obtener la información necesaria y con ello, adquirir la reconstrucción tridimensional de la superficie.

Actualmente existen diversos trabajos de investigación relacionados con optimización y corrección de las diferentes técnicas de luz estructurada, donde el uso de patrones de color se ha utilizado para mejorar los resultados obtenidos con los métodos convencionales existentes. Sin embargo, el desarrollo se ha enfocado al uso de las mismas técnicas de análisis aun con diferentes patrones de luz estructurada donde el color obtiene únicamente información auxiliar para mejorar los diferentes métodos de reconstrucción convencionales. Debido a la extensa investigación desarrollada, estas técnicas son capaces de obtener la topografía con precisión, sin embargo, no se enfocan en el desarrollo de nuevas técnicas con métodos de análisis simplificados, además las configuraciones de sistema que se utilizan deben de pasar por un estricto proceso de calibración.

En este proyecto de tesis se desarrolló una nueva técnica de perfilometría que utiliza luz estructurada en color con una configuración de montaje totalmente diferente a los métodos convencionales. El sistema desarrollado se basa en colocar los componentes ópticos (cámara y proyector) en dirección ortogonal, para luego realizar la proyección de un patrón de franjas de colores específicos y capturar una serie de imágenes.

Se desarrolló un método de calibración de color que permite que el matiz generado, proyectado y capturado; sea lo más similares posible en estas tres etapas. Por medio de la identificación del color capturado, se asigna directamente un valor de altura real a cada punto de la imagen sin necesidad de realizar una calibración y análisis matemático para convertir los resultados a valores reales de altura. Mediante el uso de una montura rotatoria se gira el objeto de prueba a diferentes posiciones para obtener la reconstrucción completa y para ello, también se desarrolló un método de fusión que permite unir la información obtenida.

Los resultados finales permitieron evaluar el desempeño de la técnica y establecer comparaciones contra otras técnicas publicadas en la literatura. Esta tesis presenta el desarrollo de un sistema de perfilometría con configuración ortogonal que utiliza la proyección de luz estructurada en color, realiza un análisis mediante la identificación de dicho color y finalmente, obtiene de manera directa los valores reales de altura del objeto.

ABSTRACT

SURFACE PROFILOMETRY BY ORTHOGONAL PROJECTION OF COLOR FRINGES

Tridimensional profilometry techniques allow the retrieval of an object's topography rapidly and accurately. There is a great diversity of methods that can be employed, among them, there is structured light projection. These systems are based on the projection of a structured light pattern onto a surface, which is distorted by its topography. The perceived pattern distortion can be digitally analyzed by diverse procedures to obtain the necessary information and thus, acquire the tridimensional reconstruction of the surface.

Currently there is extensive research related to optimization and correction of different color structured techniques, in which the use of color patterns has been used to improve the obtained results with conventional methods. Nonetheless, the development has been fixated on the use of the same analysis techniques even with different structured light patterns where color solely obtains auxiliary information to improve different conventional reconstruction methods. Because of the extensive developed research, these techniques are capable of obtaining topographies with accuracy, nevertheless, they do not emphasize on the development of new techniques with simplified analysis methods, and system configurations have to go through a strict calibration process and present some limitations.

In this thesis project a new profilometry technique was developed using color structured light with a completely different setup. The developed system is based on the placement of optical components (camera and projector) in an orthogonal direction, a specific color fringe pattern is projected, and a series of images captured.

A color calibration method was developed that allows that the generated, projected, and captured hue, were as similar as possible in the three stages. Through identification of the captured color, a real height value is directly assigned to each image point without the necessity of implementing a calibration and mathematical analysis to convert the results to real values.

Through the use of a rotary stage the tested object is rotated to different positions to obtain a complete reconstruction, thus, a fusion method was developed that allowed the unification of the obtained information.

Final results allowed us to evaluate the performance of the technique and to establish a comparison to other techniques published in the literature. This thesis presents a profilometry technique with an orthogonal setup using color structured light, then carries the analysis through the identification of such color, and finally, directly obtains the real height values of an object.

CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS	<i>xiv</i>
LISTA DE TABLAS	<i>xx</i>
INTRODUCCIÓN	<i>xxi</i>
CAPÍTULO I. ANTECEDENTES	1
1.1 Técnicas de perfilometría	1
1.2 Técnicas de luz estructurada	4
1.2.1 Proyección secuencial	5
1.2.2 Patrón de variación continua	7
1.2.3 Indexación de franjas	7
1.3 Técnicas de luz estructurada en color	8
1.3.1 Corrimiento de fase	10
1.3.1.1 Captura única	10
1.3.1.2 Captura múltiple	13
1.3.2 Corrimiento de fase híbrido	14
1.3.2.1 Captura única	15
1.3.2.2 Captura múltiple	16
1.3.3 Variación continua	18
1.3.3.1 Código de color con variación continua	18
1.3.3.2 Cámara arcoíris 3D	18
1.3.4 Franjas indexadas	19
1.3.5 Arreglos indexados	20
1.4 Configuraciones para proyección de franjas	21
1.4.1 Proyector perpendicular y cámara con ángulo	21
1.4.2 Proyector con ángulo y cámara perpendicular	22
1.4.3 Proyector y cámara con ángulo	22
1.4.4 Proyector y cámara perpendiculares	23
1.4.5 Múltiples proyectores y cámaras	24
1.5 Parámetros importantes	24
1.6 Trabajos realizados	25

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	31
2.1 Colorimetría	31
2.1.1 Teoría tricromática	32
2.1.2 Atributos del color	33
2.1.3 Espacios de color	35
2.1.3.1 Modelo RGB	36
2.1.3.2 Modelo CMY	37
2.1.3.3 Modelos HSI	39
2.1.3.4 Sistema de Munsell	40
2.1.3.5 CIE XYZ	41
2.1.3.6 CIE L*a*b*	42
2.1.4 Conversión de modelos de color	43
2.1.4.1 RGB a CMY	44
2.1.4.2 RGB a HSL	44
2.1.4.3 RGB a HSV	45
2.1.4.4 RGB a HSI	46
2.1.4.5 Representación digital	47
2.2 Parámetros de una cámara	48
2.2.1 Sensor de imagen y tamaño de sensor	48
2.2.2 Distancia focal	49
2.2.3 Campo de visión	49
2.2.4 Profundidad de campo	51
2.2.5 Resolución	51
2.3 Procesamiento de imágenes	52
2.3.1 Imagen digital	52
2.3.1.1 Tipos de imágenes	54
2.3.2 Funciones para procesamiento de imágenes	55
2.3.2.1 Funciones básicas	56
2.3.2.2 Funciones de morfología	57
2.3.2.3 Filtros espaciales	58
2.3.3 Análisis de imágenes	59

2.4	Fusión de imágenes	60
2.4.1	Métodos espaciales	61
2.4.2	Métodos en dominio de frecuencia	63
CAPÍTULO III. TÉCNICA PROPUESTA		66
3.1	Descripción de la técnica de reconstrucción	66
3.2	Proceso para la reconstrucción tridimensional	68
CAPÍTULO IV. CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA		72
4.1	Equipo	72
4.1.1	Proyector	72
4.1.2	Cámara	73
4.1.3	Lente	75
4.2	Configuraciones de montaje	76
4.2.1	Configuración ortogonal simple	77
4.2.2	Configuración ortogonal con múltiple proyección	77
4.2.3	Configuración ortogonal con montura rotatoria	78
4.2.3.1	Alineación de montura rotatoria	80
4.3	Montura rotatoria y controlador	80
4.3.1	Montura rotatoria MM-4M-R	81
4.3.2	Controlador MicroMini	82
4.3.3	Configuración de operación	82
4.3.3.1	Comunicación	83
4.3.3.2	Corriente programable	84
4.3.3.3	Conexiones	85
4.3.4	Programación e instrucciones básicas	86
4.4	Ángulos mínimo y máximo de observación	88
CAPÍTULO V. CARACTERIZACIÓN Y CALIBRACIÓN		90
5.1	Caracterización del proyector	90
5.2	Caracterización de la cámara	95
5.2.1	Método 1	95

5.2.2	Método 2	97
5.3	Calibración del color en imágenes	98
5.3.1	Calibración del color con método 1	99
5.3.2	Calibración del color con método 2	101
CAPÍTULO VI. PROYECCIÓN, CAPTURA Y PROCESAMIENTO		103
6.1	Franjas en color	103
6.1.1	Corrimiento de franjas	104
6.2	Adquisición de imagen	104
6.3	Procesamiento de imagen	107
6.3.1	Generación de máscara	107
6.3.2	Enmascaramiento de la imagen	108
6.3.3	Filtrado de planos de color	109
6.3.4	Calibración de color	112
CAPÍTULO VII. IDENTIFICACIÓN DE COLOR		116
7.1	Clasificador de color	116
7.1.1	Etapas de entrenamiento	116
7.1.2	Etapas de clasificación	117
7.2	Rangos de matiz	119
CAPÍTULO VIII. ANÁLISIS, MAPAS DE ALTURA Y FUSIÓN		124
8.1	Altura real	124
8.1.1	Pendiente de altura	125
8.2	Mapas de altura	129
8.3	Fusión de mapas de altura	131
8.3.1	Transformada discreta de Wavelet	132
8.3.2	Método de fusión propuesto	134
8.4	Unidades reales en ejes X y Y	136
CAPÍTULO IX. PRUEBAS FINALES Y VALIDACIÓN		138
9.1	Pruebas finales	138

9.1.1	Fusión de textura	141
9.1.2	Objeto de referencia	143
9.2	Análisis de datos y validación estadística	145
9.2.1	Proceso de medición	145
9.2.2	Estadística de los datos	149
9.2.3	Histograma	149
9.2.3.1	Distribución normal	151
9.2.3.2	Prueba de bondad de ajuste Chi-cuadrada	155
9.3	Medición del error	158
9.3.1	Exactitud	160
9.3.2	Precisión	162
CAPÍTULO X. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO		164
10.1	Conclusiones generales	164
10.2	Conclusiones de la configuración ortogonal	165
10.3	Conclusiones de la técnica de análisis	168
10.4	Conclusiones del software desarrollado	169
10.5	Trabajo futuro	170
REFERENCIAS		173
ANEXOS		187
ANEXO 1	CARACTERÍSTICAS DE LA CÁMARA CMLN-132C-CS	187
ANEXO 2	ESPECIFICACIONES DE LENTE DOBLE GAUSS CON DISTANCIA FOCAL DE 18 mm	188
ANEXO 3	VALORES CRÍTICOS DE LA DISTRIBUCIÓN CHI-CUADRADA	189
APÉNDICES		190
APÉNDICE A	INTERFAZ DE USUARIO DEL SOFTWARE DE RECONSTRUCCIÓN	190

APÉNDICE B	SOFTWARE DE RECONSTRUCCIÓN EN LABVIEW®	191
APÉNDICE C	SOFTWARE DE PROYECCIÓN DE FRANJAS EN LABVIEW®	198
APÉNDICE D	SOFTWARE DE CONTROL DE GIROS CON MONTURA ROTATORIA EN LABVIEW®	199
APÉNDICE E	SOFTWARE DE GENERACIÓN Y APLICACIÓN DE MÁSCARA EN LABVIEW®	200
APÉNDICE F	SOFTWARE DE FILTRADO DE LA IMAGEN EN LABVIEW®	201
APÉNDICE G	SOFTWARE DE CALIBRACIÓN DE MATIZ EN LABVIEW®	202
APÉNDICE H	SOFTWARE DE IDENTIFICACIÓN DE COLOR POR RANGOS DE MATIZ EN LABVIEW®	203
APÉNDICE I	SOFTWARE PARA CÁLCULO Y ASIGNACIÓN DE VALORES DE ALTURA EN LABVIEW®	204
APÉNDICE J	CÓDIGO EN MATLAB® PARA FUSIÓN DE MAPAS DE ALTURA PROMEDIADOS	205
APÉNDICE K	CÓDIGO EN MATLAB® PARA CÁLCULO DE MODELOS ESTADÍSTICOS, PRUEBA CHI-CUADRADA, ERROR, EXACTITUD Y PRECISIÓN	206

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO I. ANTECEDENTES	1
Figura 1.1 Escaneo con luz láser.	2
Figura 1.2 Patrón moiré proyectado sobre objeto.	2
Figura 1.3 Fotogrametría.	3
Figura 1.4 Técnica de proyección de luz estructurada.	3
Figura 1.5 Proyección de franjas.	4
Figura 1.6 Franjas código binario.	6
Figura 1.7 Corrimiento de fase.	6
Figura 1.8 Código de color con variación continua.	7
Figura 1.9 Rejilla codificada en color.	8
Figura 1.10 Clasificación de técnicas codificadas en color.	9
Figura 1.11 Corrimiento de fase en color (captura única).	11
Figura 1.12 Modulación de intensidad de un patrón de corrimiento de fase de tres pasos.	12
Figura 1.13 Corrimiento de fase en color (captura múltiple).	13
Figura 1.14 Patrón sinusoidal + Franjas discretas en color.	13
Figura 1.15 Franjas binarias codificadas en color con desfaseamiento (captura única).	15
Figura 1.16 Corrimiento de fase codificado en color.	16
Figura 1.17 Franjas binarias en color con desfaseamiento (captura múltiple).	17
Figura 1.18 Técnica de color con variación continua.	18
Figura 1.19 Principio de cámara arcoíris.	19
Figura 1.20 Franjas en color codificadas con la secuencia de De Bruijn.	19
Figura 1.21 Franjas sinusoidales codificadas en color con la secuencia de De Bruijn.	20
Figura 1.22 Configuración con proyector perpendicular y cámara con ángulo.	21
Figura 1.23 Configuración con cámara perpendicular y proyector con ángulo.	22
Figura 1.24 Configuración con proyector y cámara con ángulos $\alpha/2$.	23
Figura 1.25 Configuración con proyector y cámara ortogonales al plano de referencia.	23
Figura 1.26 Configuración con múltiples proyectores y cámaras.	24
Figura 1.27 Técnica de cámara arcoíris de Geng.	26
Figura 1.28 Patrones de franjas de color de Anguiano.	28

Figura 1.29	Proyección de franjas RGB de Huang.	28
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO		31
Figura 2.1	Espectro electromagnético.	31
Figura 2.2	Triángulo de Maxwell.	32
Figura 2.3	Matiz.	33
Figura 2.4	Saturación.	33
Figura 2.5	Luminosidad.	34
Figura 2.6	Matiz, saturación y luminosidad.	34
Figura 2.7	Colores aditivos RGB.	36
Figura 2.8	Espacio de color RGB.	37
Figura 2.9	Colores sustractivos CMY.	38
Figura 2.10	Espacio de color CMY.	38
Figura 2.11	Espacio de color HSL.	39
Figura 2.12	Espacio de color HSV.	40
Figura 2.13	Sistema de Munsell.	41
Figura 2.14	Espacio de color CIE XYZ.	42
Figura 2.15	Espacio de color CIE $L^*a^*b^*$.	43
Figura 2.16	Distancia focal de una lente.	49
Figura 2.17	Parámetros de la cámara.	50
Figura 2.18	Profundidad de campo reducida.	51
Figura 2.19	Imagen digital.	53
Figura 2.20	Diferentes niveles de gris en una imagen.	53
Figura 2.21	Máscara.	56
Figura 2.22	Región de interés.	56
Figura 2.23	Extracción de planos de color.	57
Figura 2.24	Descomposición piramidal.	63
Figura 2.25	Descomposición wavelet.	64
Figura 2.26	Fusión con transformada de wavelet.	64
CAPÍTULO III. TÉCNICA PROPUESTA		66
Figura 3.1	Sistema de reconstrucción tridimensional propuesto.	67
Figura 3.2	Proceso para la reconstrucción tridimensional.	69
CAPÍTULO IV. CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA		72
Figura 4.1	Proyector Acer K335.	72

Figura 4.2	Distancia y área de proyección respectiva.	73
Figura 4.3	Cámara Point Grey Chameleon CMLN-13S2C-CS.	74
Figura 4.4	Curvas de eficiencia.	74
Figura 4.5	Lente doble Gauss.	75
Figura 4.6	Diagrama de configuración ortogonal.	76
Figura 4.7	Configuración ortogonal simple.	77
Figura 4.8	Configuración ortogonal con múltiple proyección.	78
Figura 4.9	Configuración ortogonal con montura rotatoria.	79
Figura 4.10	Diagrama de configuración ortogonal con montura rotatoria.	80
Figura 4.11	Montura rotatoria centrada.	80
Figura 4.12	Montura rotatoria.	81
Figura 4.13	Controlador MicroMini de National Aperture®.	82
Figura 4.14	Interruptores y conectores de microcontrolador, a) panel frontal, b) panel posterior.	83
Figura 4.15	Configuración de dirección.	83
Figura 4.16	Interruptores para corriente programable.	84
Figura 4.17	Conexiones del controlador.	85
Figura 4.18	Programa para realizar un giro de 60°.	87
Figura 4.19	Programa para realizar un giro de 60° en LabVIEW®.	88
Figura 4.20	Placa plano-paralela para medición de, a) ángulo mínimo y b) ángulo máximo de observación.	88
Figura 4.21	Franjas de color capturadas con, a) ángulo mínimo y b) ángulo máximo de observación.	89
CAPÍTULO V. CARACTERIZACIÓN Y CALIBRACIÓN		90
Figura 5.1	Caracterización del proyector Acer K335, a) esfera integradora, b) proyección de color de referencia.	91
Figura 5.2	Reporte para la proyección del color rojo.	91
Figura 5.3	Espectro emitido por proyector Acer K335, a) color rojo, b) color verde, c) color azul.	93
Figura 5.4	Curva de eficiencia en cada longitud de onda para proyector Acer K335.	94
Figura 5.5	Curva de eficiencia pico en cada longitud de onda.	95
Figura 5.6	Configuración en línea para calibración de cámara (Método 1).	96
Figura 5.7	Proyección de colores de referencia (Método 1).	96
Figura 5.8	Configuración en línea para calibración de cámara (Método 2).	97
Figura 5.9	Proyección de colores de referencia (Método 2).	97
Figura 5.10	Evaluación de calibración de color (Método 1).	99

Figura 5.11	Perfil de línea (Método 1).	100
Figura 5.12	Evaluación de calibración de color (Método 2).	101
Figura 5.13	Perfil de línea (Método 2).	102
CAPÍTULO VI. PROYECCIÓN, CAPTURA Y PROCESAMIENTO		103
Figura 6.1	Patrón de franjas en color.	103
Figura 6.2	Franjas de color con corrimiento.	104
Figura 6.3	Selección de fuente de adquisición.	105
Figura 6.4	Selección de tipo de adquisición.	105
Figura 6.5	Configuración de parámetros de adquisición.	106
Figura 6.6	Software para captura de imágenes.	106
Figura 6.7	Imagen original.	107
Figura 6.8	Plano de luminosidad.	108
Figura 6.9	Máscara de la imagen.	108
Figura 6.10	Enmascaramiento de la imagen.	109
Figura 6.11	Imagen enmascarada.	109
Figura 6.12	Imagen enmascarada aumentada.	110
Figura 6.13	Proceso de filtrado de la imagen.	110
Figura 6.14	Imagen filtrada aumentada.	111
Figura 6.15	Región de interés de la imagen.	111
Figura 6.16	Imagen capturada, a) procesada y b) calibración de color.	112
Figura 6.17	Valores RGB de la franja verde en colorímetro digital de la imagen, a) procesada y b) con calibración de color.	113
Figura 6.18	Valores RGB de la franja roja en colorímetro digital de la imagen, a) procesada y b) con calibración de color.	114
Figura 6.19	Valores RGB de la franja azul en colorímetro digital de la imagen, a) procesada y b) con calibración de color.	115
CAPÍTULO VII. IDENTIFICACIÓN DE COLOR		116
Figura 7.1	Vector de color de la muestra conocida.	117
Figura 7.2	Vector de color de la región analizada.	117
Figura 7.3	Selección de cuadro de píxeles.	118
Figura 7.4	Clasificador de color.	118
Figura 7.5	Rangos de matiz.	120
Figura 7.6	Identificación de color con rangos de matiz.	120
Figura 7.7	Rangos de matiz corregidos.	121
Figura 7.8	Identificación de color con rangos de matiz corregidos.	122

Figura 7.9	Identificación de color con, a) clasificador de color, b) rangos de matiz.	123
------------	--	-----

CAPÍTULO VIII. ANÁLISIS, MAPAS DE ALTURA Y FUSIÓN 124

Figura 8.1	Medición de franjas en pantalla de referencia a 42.5 cm.	124
Figura 8.2	Medición de franjas en pantalla de referencia, a) 36.085 cm, b) 48.915 cm.	126
Figura 8.3	Pendiente de proyección para franja azul.	127
Figura 8.4	Mapas de altura con cada corrimiento.	129
Figura 8.5	Software para filtrado del mapa de altura.	130
Figura 8.6	Mapa de altura promediado.	130
Figura 8.7	Mapas de altura con cada giro.	131
Figura 8.8	Fusión con DWT.	132
Figura 8.9	Fusión con DWT en MATLAB®.	133
Figura 8.10	Mapa de alturas fusionado con DWT.	134
Figura 8.11	Fusión con método propuesto.	135
Figura 8.12	Mapa de altura fusionado con método propuesto.	136

CAPÍTULO IX. PRUEBAS FINALES Y VALIDACIÓN 138

Figura 9.1	Reconstrucción tridimensional de esfera de unicel.	139
Figura 9.2	Reconstrucción tridimensional de máscara de cerámica 1.	140
Figura 9.3	Reconstrucción tridimensional de máscara de cerámica 2.	140
Figura 9.4	Reconstrucción tridimensional de esfera de unicel con textura.	141
Figura 9.5	Reconstrucción tridimensional de máscara de cerámica 1 con textura.	142
Figura 9.6	Reconstrucción tridimensional de máscara de cerámica 2 con textura.	142
Figura 9.7	Plano inclinado de referencia, a) diseñado en SolidWorks® y b) impreso en 3D.	143
Figura 9.8	Reconstrucción tridimensional de plano inclinado.	144
Figura 9.9	Reconstrucción tridimensional de plano inclinado con textura.	144
Figura 9.10	Plano inclinado con marcas en alturas de referencia.	146
Figura 9.11	Medición de alturas de referencia reales.	147
Figura 9.12	Valores de altura reales y promedio en puntos de referencia.	147
Figura 9.13	Histograma de valores de altura registrados para <i>P1</i> .	150
Figura 9.14	Histograma de valores de altura registrados para <i>P2</i> .	150
Figura 9.15	Histograma de valores de altura registrados para <i>P3</i> .	150
Figura 9.16	Histograma de valores de altura para <i>P1</i> con curva de distribución normal.	151

Figura 9.17	Histograma de valores de altura para $P2$ con curva de distribución normal.	151
Figura 9.18	Histograma de valores de altura para $P3$ con curva de distribución normal.	152
Figura 9.19	Distribución normal.	152
Figura 9.20	Probabilidad normalizada para $P1$.	153
Figura 9.21	Probabilidad normalizada para $P2$.	154
Figura 9.22	Probabilidad normalizada para $P3$.	154
Figura 9.23	Prueba de Chi-cuadrada en MATLAB® para, a) $P1$, b) $P2$ y c) $P3$.	157
Figura 9.24	Diferencia entre el valor real de $P1$ y valores obtenidos.	159
Figura 9.25	Diferencia entre el valor real de $P2$ y valores obtenidos.	159
Figura 9.26	Diferencia entre el valor real de $P3$ y valores	160
CAPÍTULO X. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO		164
Figura 10.1	Montaje auxiliar con espejo para zonas ocluidas.	168

LISTA DE TABLAS

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	31
Tabla 2.1 Representación de color en diferentes modelos de color.	48
Tabla 2.2 Valores típicos en la resolución espacial.	53
Tabla 2.2 Valores típicos en la definición de una imagen.	54
 CAPÍTULO IV. CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA	 72
Tabla 4.1 Datos del sensor Sony ICX445.	74
Tabla 4.2 Datos de la lente.	75
Tabla 4.3 Parámetros de montura rotatoria MM-4M-R.	81
Tabla 4.4 Configuración de tasa de datos.	84
Tabla 4.5 Configuración de corriente utilizada en montura.	85
 CAPÍTULO V. CARACTERIZACIÓN Y CALIBRACIÓN	 90
Tabla 5.1 Resumen de resultados obtenidos con el espectroradiómetro.	92
Tabla 5.2 Conversión de radios de color a modelo HSL.	93
 CAPÍTULO VIII. ANÁLISIS, MAPAS DE ALTURA Y FUSIÓN	 124
Tabla 8.1 Valores de altura máxima a 42.5 cm.	125
Tabla 8.2 Pendientes de proyección calculadas para cada color.	127
Tabla 8.3 Valores de altura calculados en 0, 640 y 1280 píxeles.	128
 CAPÍTULO IX. PRUEBAS FINALES Y VALIDACIÓN	 138
Tabla 9.1 Datos de altura registrada con plano inclinado calibrado.	148
Tabla 9.2 Datos obtenidos de las muestras.	149
Tabla 9.3 Prueba de Chi-cuadrada para P_1 .	156
Tabla 9.4 Prueba de Chi-cuadrada para P_2 .	156
Tabla 9.5 Prueba de Chi-cuadrada para P_3 .	156
Tabla 9.6 Error calculado en cada una de las mediciones.	161

INTRODUCCIÓN

Esta tesis se encuentra dividida en diez capítulos, a continuación se hace una breve descripción del contenido de cada uno de ellos.

En el Capítulo I se presenta una introducción del área en la que se desarrolló el trabajo de investigación y se mencionan algunas de las técnicas que se utilizan actualmente en la perfilometría tridimensional, describiéndose algunas de las técnicas más conocidas relacionadas con el uso de luz estructurada en color, parámetros relevantes y distintas configuraciones para la proyección de luz estructurada. Se muestran algunas contribuciones realizadas por diferentes autores en el área de perfilometría.

El Capítulo II contiene un marco teórico de información relevante para la comprensión y desarrollo de la investigación en aspectos de colorimetría, parámetros de la cámara, procesamiento de imágenes y diferentes métodos de fusión de imágenes.

En el Capítulo III se presenta la técnica de reconstrucción tridimensional desarrollada y se describen las actividades realizadas para la implementación de la misma en diferentes etapas.

En el Capítulo IV se describe la configuración ortogonal propuesta y parámetros importantes, también se presentan diferentes alternativas de la configuración que permiten tener un área de proyección más extendida. También se incluyen parámetros que fueron considerados para establecer el montaje experimental de los diferentes componentes utilizados.

En el Capítulo V se hace una descripción del proceso realizado para caracterizar el proyector utilizado, un estudio de las características de la cámara y proyector. Se

proponen dos métodos de calibración para ajustar el color proyectado y capturado por la cámara, para que ambos sean lo más cercano posible al color real.

El Capítulo VI contiene las actividades desarrolladas para realizar la proyección de las franjas de color, adquisición de las imágenes y llevar a cabo el procesamiento que permite implementar la calibración del color y mejorar la calidad de las capturas.

En el Capítulo VII se describen dos métodos desarrollados para llevar a cabo la identificación de color en LabVIEW®. Se hace una comparación de los resultados obtenidos utilizando los dos procedimientos.

En el Capítulo VIII se hace una descripción del análisis desarrollado para la asignación de valores de altura para cada franja de color, que permite obtener diferentes mapas de altura. Después se presenta un método propuesto para realizar la fusión de los resultados y obtener un solo mapa que contenga toda la información de altura de la superficie y conseguir la reconstrucción tridimensional.

En el Capítulo IX se presentan los resultados obtenidos con diferentes objetos de prueba y se hace una evaluación del desempeño de la técnica por medio de la validación estadística.

En el Capítulo X se dan a conocer las conclusiones del trabajo, recomendaciones y consideraciones a tomar en cuenta con el sistema ortogonal. También se plantea el trabajo a futuro que se puede realizar para mejorar las limitantes encontradas.

CAPÍTULO I

ANTECEDENTES

En la actualidad la perfilometría tridimensional es un tema que se investiga ampliamente en el ámbito académico y en la industria para una gran variedad de aplicaciones. La perfilometría se basa en el uso de alguna técnica para obtener la forma tridimensional de un objeto o superficie y para realizar mediciones exactas de la forma del objeto. Algunas de las áreas donde se utiliza la perfilometría son en la industria automotriz, aeroespacial, ingeniería inversa, calidad, sector salud: ortopedia, cirugía plástica, odontología, entre otros [1]–[3].

1.1 Técnicas de perfilometría

Existen dos tipos de métodos para obtener el perfil tridimensional de un objeto: contacto y no contacto. Los métodos de contacto requieren el uso de una punta o lápiz mecánico que palpa la superficie del objeto, normalmente se utiliza un equipo de medición de coordenadas (CMM) para medir las características geométricas de un objeto utilizando un palpador, este equipo es muy preciso, pero es lento y requiere ser utilizado por un operador hábil. El estudio de la perfilometría ha permitido el desarrollo de nuevos equipos de medición tridimensional que usan métodos de no contacto, es decir, no requieren estar en contacto con la superficie de un objeto. Existe una gran variedad de métodos de no contacto como: escaneo con luz láser, moiré, fotogrametría y luz estructurada.

En el método de escaneo con luz láser se proyecta una delgada línea de luz láser sobre una superficie y ésta se observa deformada dependiendo de la topografía de dicho objeto, ver Figura 1.1. Imágenes de la deformación de la línea son capturadas por una cámara y posteriormente analizadas a través de técnicas de triangulación. Una desventaja de este método es que puede resultar lento dependiendo de la cantidad de

líneas proyectadas a lo largo de toda la superficie del objeto y del análisis respectivo [1], [3], [4].

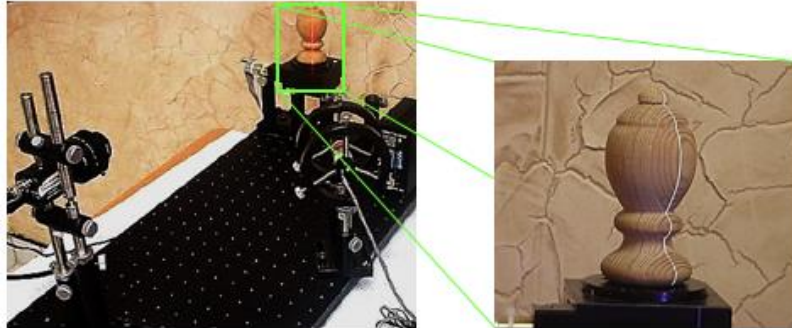


Figura 1.1 Escaneo con luz láser.

En el método de moiré se utilizan dos rejillas Ronchi, una de ellas es considerada la rejilla principal y la otra la rejilla de referencia. Al sobreponer ambas rejillas se forma un patrón que se proyecta sobre la superficie del objeto, el cual es deformado según la geometría del objeto. Esta deformación se captura utilizando una cámara y finalmente se analiza la imagen y se reconstruye el objeto. Para la reconstrucción del objeto, la técnica de moiré utiliza el análisis de corrimiento de fase. En la Figura 1.2 se muestra un ejemplo de un patrón moiré proyectado sobre la superficie de un objeto.



Figura 1.2 Patrón moiré proyectado sobre objeto.

La fotogrametría es un método cuyo principio se basa en capturar múltiples imágenes digitales de un objeto y procesar la información que de ellas se obtiene. Existen diferentes técnicas como: fotogrametría simple que toma solo una imagen de la superficie, fotogrametría estéreo que toma dos imágenes de la superficie y después une la información de ambas imágenes, y fotogrametría con varias imágenes que

puede combinar propiedades de las dos técnicas anteriores para obtener la forma tridimensional de la superficie como se muestra en el ejemplo de la Figura 1.3.



Figura 1.3 Fotogrametría.

Los métodos de luz estructurada se basan en proyectar un patrón de luz sobre un objeto y capturar la deformación del patrón con una cámara, después se analiza la imagen para obtener la información de profundidad del objeto. Para la proyección de los patrones de luz se utiliza normalmente un proyector LCD (*Liquid Crystal Display*) o DMD (*Digital Mirror Display*). En la Figura 1.4 se muestra un esquema de un sistema de proyección de luz estructurada. A diferencia del método de franjas moiré, este método no requiere utilizar alguna rejilla para formar los patrones y se puede decodificar la información de la deformación directamente de las franjas. Algunas de las ventajas de estos métodos son: rapidez para medición de campo completo, facilidad de implementación, no es necesario mover el sistema de proyección o el objeto para obtener la digitalización y existe una gran variedad de técnicas para la proyección de patrones de luz estructurada y para el análisis de patrones.

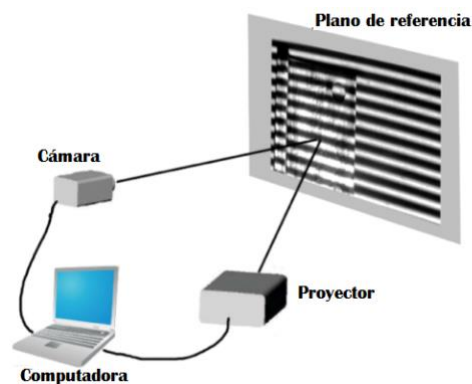


Figura 1.4 Técnica de proyección de luz estructurada.

1.2 Técnicas de luz estructurada

Estas técnicas proyectan un patrón bidimensional de luz sobre un objeto y con una cámara se observa cómo se distorsiona este patrón. En la Figura 1.5 se puede observar la proyección de un patrón de luz estructurada sobre un objeto y cómo dicho patrón es deformado de acuerdo con la geometría del objeto. Se pueden utilizar una o más cámaras para capturar el patrón proyectado y una unidad de procesamiento para realizar el análisis de la imagen adquirida. Si el patrón proyectado es idéntico al de referencia, entonces la superficie es plana; las irregularidades en la superficie del objeto provocan distorsiones. El patrón distorsionado puede ser analizado con diferentes métodos para calcular la profundidad o altura de la superficie.

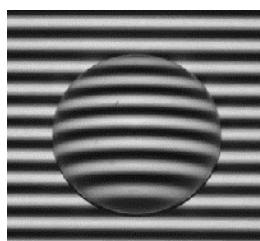


Figura 1.5 Proyección de franjas.

Es difícil escanear materiales que son altamente reflectores o transparentes. Este problema normalmente se corrige aplicando una delgada capa de pintura especial (similar al talco) en la superficie del objeto para que se convierta en una superficie opaca.

La ventaja más grande de este método es su velocidad ya que es posible adquirir miles de puntos de la superficie en una sola adquisición en lugar de escanear puntos en secuencia. Además, con este método se pueden escanear objetos que se encuentran en movimiento e incluso se pueden detectar deformaciones en las superficies [5]. Para utilizar este método normalmente se sigue la serie de pasos que se describen a continuación:

Generación y proyección: primero se debe seleccionar el tipo de luz estructurada que se va a utilizar, después se debe generar el patrón por medio de un software y por

último se realiza la proyección del patrón de luz estructurada sobre la superficie de un objeto ubicado sobre un plano de referencia.

Adquisición: utilizando una cámara se realiza la captura de las imágenes del patrón proyectado sobre el objeto y se registran las imágenes necesarias según la técnica que se utilice.

Análisis: se utiliza algún método para hacer los cálculos necesarios que permitan obtener la forma del objeto a partir de las imágenes capturadas. Existen diferentes métodos de análisis y se deben seleccionar dependiendo del tipo de proyección que se utilice, el que sea más adecuado, rápido y sencillo.

Calibración: por último, se debe encontrar una relación entre las coordenadas de la imagen y las coordenadas del mundo real para después realizar la reconstrucción del objeto y obtener sus dimensiones físicas [6], [7].

Existen diversas técnicas de proyección de luz estructurada que se utilizan para obtener la forma 3-D de un objeto. Una de las clasificaciones más reconocidas de las técnicas de luz estructurada es según el tipo de franjas proyectadas como: proyección secuencial, patrón de variación continua, indexación de franjas, indexación de rejilla y métodos híbridos [8], [9]. A continuación se hace una descripción de algunas de estas técnicas [5]–[12].

1.2.1 Proyección secuencial

A la proyección secuencial también se le llama de múltiples capturas. Una de las ventajas que presenta es que obtiene la reconstrucción 3-D con alta precisión, sin embargo tiene la desventaja de requerir múltiples proyecciones y capturas para completar la información necesaria que le permita obtener la reconstrucción del objeto. Algunas de las técnicas de proyección secuencial más reconocidas son: franjas binarias y corrimiento de fase.

La técnica de franjas binarias consiste en un patrón que contiene solo dos valores de intensidad: 0 y 1, por lo que utiliza una serie de franjas blancas y negras como se muestra en la Figura 1.6. El sistema de coordenadas 3-D es calculado en base al principio de triangulación. En la reconstrucción, esta técnica puede alcanzar una alta precisión, ya que no se ve afectada por la no linealidad del proyector y de la cámara.

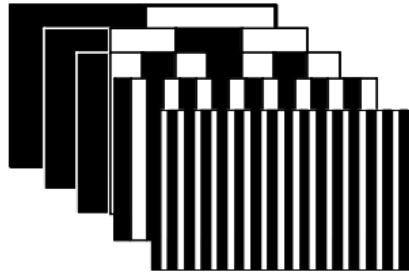


Figura 1.6 Franjas código binario.

En la técnica de corrimiento de fase, se proyecta sobre la superficie del objeto una serie de patrones sinusoidales que se encuentran desfasados por un ángulo constante, como se muestra en la Figura 1.7. Con esta técnica se lleva a cabo un proceso de corrimiento y se recuperan valores de fase modulada en intervalos de 2π , por lo que es necesario utilizar algoritmos de desenvolvolvimiento de fase para eliminar discontinuidades y obtener la reconstrucción. Cualquier superficie que no sea plana provoca una deformación en el patrón y esto se conoce como una desviación de fase. Esta desviación de fase contiene información de la superficie iluminada, al encontrar la relación entre el patrón proyectado y la imagen capturada se puede obtener la información de la topografía del objeto, estas técnicas ofrecen mayor resolución y velocidad.

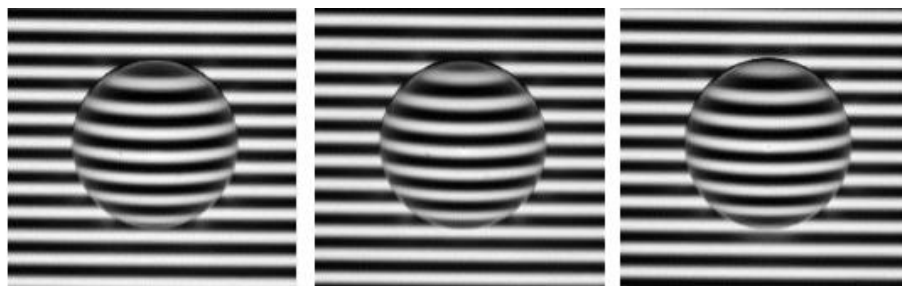


Figura 1.7 Corrimiento de fase.

1.2.2 Patrón de variación continua

Estos patrones usan información de color o una codificación única del patrón de proyección. La ventaja de la técnica de variación continua es que solo requiere adquirir una imagen del objeto iluminado para obtener el cuadro completo de la imagen tridimensional. Estos patrones son codificados en color y no necesariamente presentan una relación de variación lineal con el espectro de color.

Cuando se utiliza un proyector y patrones de color se presenta el factor gamma. Este factor corresponde a la proporción del espacio de color que puede ser representado por cada dispositivo que genere señales de color, es una función no lineal por lo que el proyector y la computadora pueden tener valores de gamma distintos provocando que patrones con valores lineales sean cambiados a una forma no lineal. En este tipo de patrones es necesario aplicar técnicas para corregir la no linealidad de la cámara y del proyector. Algunas de las técnicas conocidas son cámara arcoíris 3D y código de color con variación continua, Figura 1.8.



Figura 1.8 Código de color con variación continua.

1.2.3 Indexación de franjas

En este tipo de patrones, el orden en el que se proyectan las franjas no es necesariamente el mismo orden en el que se observan. Se basan en la proyección de un patrón que puede ser codificado en color o en escala de grises como: un patrón de franjas con una secuencia específica, una matriz de datos o una rejilla, ver Figura 1.9. En estas técnicas cada elemento tiene asociado una palabra o código con el cual pueden ser identificados individualmente. El código asociado permite localizar el elemento analizado que contiene información de las coordenadas reales asociadas.

Normalmente para la codificación de estos patrones se pueden utilizar dos formas de codificación de datos distintas: una matriz de datos o franjas codificadas. Una de las ventajas de esta técnica es que puede reducir el problema de ambigüedad. Algunas de las técnicas reconocidas son: franjas codificadas en color, franjas codificadas en escala de grises, rejillas, etc.

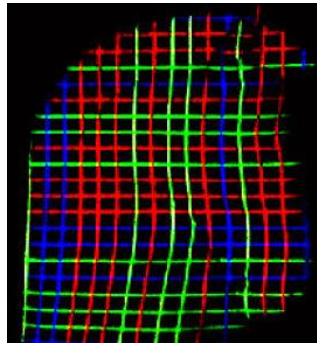


Figura 1.9 Rejilla codificada en color.

1.3 Técnicas de luz estructurada en color

Los patrones codificados en color se utilizan principalmente en métodos de captura única, debido a la capacidad que tienen de codificar más información en una sola imagen a través de los diferentes canales de color y además, reducen el tiempo de adquisición. Debido al continuo desarrollo en las tecnologías de cámaras y proyectores, parámetros como el color verdadero y rango de color han sido mejorados, por lo cual se ha observado un incremento en el uso de este tipo de técnicas. Algunas de las ventajas que se obtienen son: mayor precisión en la reconstrucción de superficies al codificar información en tres canales de color diferentes, gran diversidad de patrones, desarrollo de técnicas de captura única que aceleran el proceso de reconstrucción, se pueden combinar diferentes algoritmos de análisis, utilizar diferentes modelos de color, etc. En la Figura 1.10 se propone una clasificación de las diferentes técnicas de color según la proyección utilizada y el análisis que se realiza, se muestra además un ejemplo del patrón utilizado [13]. A continuación, se hace una descripción de cada una de las técnicas y se mencionan algunos de los autores que la utilizan.

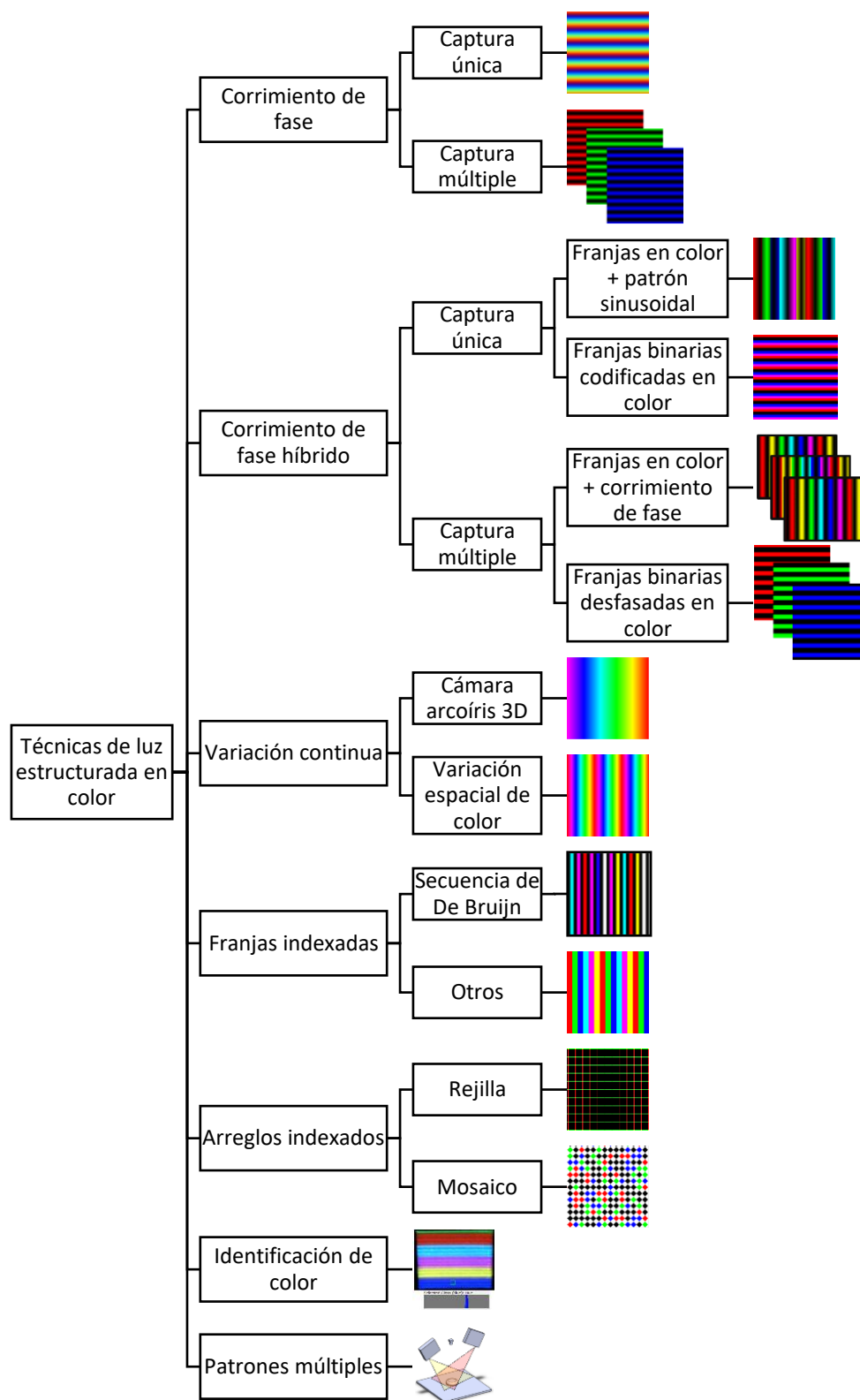


Figura 1.10 Clasificación de técnicas codificadas en color.

1.3.1 Corrimiento de fase

Las técnicas de corrimiento de fase se utilizan con frecuencia en escáneres tridimensionales debido a su precisión y rapidez, aunque presentan algunas limitaciones. En años recientes el uso de color en técnicas de corrimiento de fase ha permitido el desarrollo de técnicas de captura única y múltiple, por su capacidad de codificar en un patrón más información a través de los canales de color en la imagen, reduciendo la ambigüedad que se presenta en las técnicas de corrimiento de fase tradicionales con superficies discontinuas.

El método de corrimiento de fase de tres pasos se utiliza frecuentemente en los patrones codificados en color, ya que requieren el mínimo número de proyecciones, aunque otras técnicas también pueden ser implementadas. Existen dos maneras en las que se pueden utilizar estas técnicas: captura única y múltiple.

1.3.1.1 Captura única

Tres patrones de franjas sinusoidales desfasados son codificados en un patrón de color a través de los canales RGB, el cual es proyectado sobre la superficie de un objeto, de la cual se captura una sola imagen en color. De acuerdo con la topografía de la superficie de prueba, el patrón será distorsionado permitiendo la obtención de la fase del objeto. Al extraer los planos de color de la imagen adquirida, tres patrones sinusoidales desfasados son obtenidos. Después, a través del método tradicional de corrimiento de fase, se obtienen la fase envuelta y se aplica un algoritmo para llevar a cabo el desenvolvimiento de fase [14]–[24].

En la Figura 1.11 se muestra el proceso de corrimiento de fase en color para captura única, codificando tres patrones diferentes en los canales RGB de la imagen y después se extrae cada plano de la imagen para su posterior análisis. La mayor ventaja de estas técnicas es la alta velocidad que presentan debido a la adquisición y procesamiento de una sola imagen, por lo que estas técnicas se utilizan para la reconstrucción de objetos dinámicos permitiendo la obtención de información de una

superficie en tiempo real. Durante la etapa de análisis se extraen los planos RGB de la imagen, obteniendo tres patrones de franjas desfasadas que son después analizadas con los algoritmos tradicionales de corrimiento de fase para llevar a cabo el desenvolvimiento de fase hasta obtener la reconstrucción de la superficie.

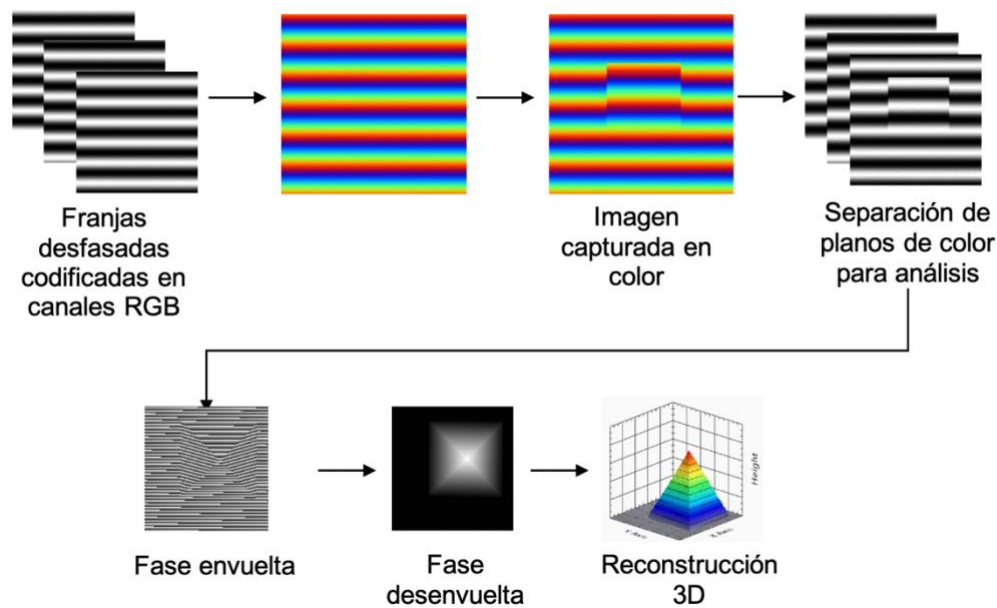


Figura 1.11 Corrimiento de fase en color (captura única).

Las ventajas de las técnicas de corrimiento de fase en color (captura única) son su alta velocidad, la posibilidad de usarse en superficies dinámicas y mediciones de topografías en tiempo real. Además, reducen la ambigüedad que se presenta en la fase envuelta con la técnica tradicional, causada por la presencia de superficies discontinuas. Al combinar el uso de corrimiento de fase y color se obtiene una infinidad de patrones de luz estructurada que pueden utilizarse.

Aun cuando la ambigüedad es reducida, se debe implementar un algoritmo de desenvolvimiento para eliminar discontinuidades mayores a 2π . Se debe utilizar un proyector y cámara de alta calidad para alcanzar la mejor proyección y adquisición del color verdadero. El solapamiento de color en la cámara y la superposición de longitudes de onda similares, puede llevar a la pérdida de información de la superficie. La gamma o no linealidad del proyector puede afectar el desenvolvimiento de fase.

Superficies de color pueden alterar el patrón proyectado, por lo que es necesario utilizar la técnica en objetos de prueba con tonos blancos o neutros. Se sugiere llevar a cabo una calibración para mejorar la calidad del color tanto en la proyección, como adquisición de la imagen. Con estas técnicas no se obtiene una fase absoluta, por lo que es necesario utilizar un algoritmo de desenvolvimiento.

Huang *et al.* [14], [15] codifican tres patrones sinusoidales con un desfaseamiento de $2\pi/3$ a través de los canales rojo, verde y azul de una sola imagen como se muestra en la Figura 1.12. Después de adquirir una sola imagen, se extraen los planos RGB de la imagen, al obtener tres patrones de franjas sinusoidales se aplica el algoritmo de corrimiento de fase de tres pasos, la fase se obtiene a través de la ecuación 1.1.

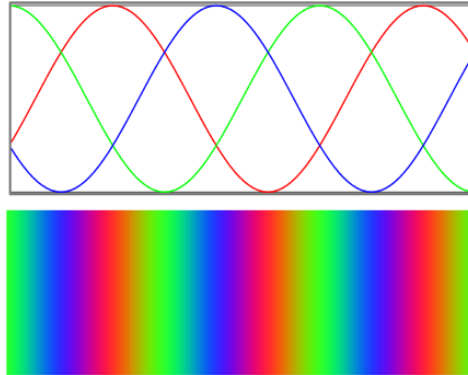


Figura 1.12 Modulación de intensidad de un patrón de corrimiento de fase de tres pasos.

$$\phi(x, y) = \tan^{-1} \left[\sqrt{3} \frac{I_1 - I_3}{2I_2 - I_1 - I_3} \right] \quad (1.1)$$

Algunos autores utilizan el mismo patrón de proyección y realizan algunas modificaciones a la técnica propuesta. Yin *et al.* [16] utilizan el mismo patrón, sin embargo hacen una conversión de la imagen RGB a HIS, en donde del plano de matiz (*hue*) se extrae la fase envuelta y utilizando triangulación se obtiene la topografía. Los planos de saturación e intensidad se utilizan para reducir las ambigüedades, detectando los cambios abruptos de fase en superficies irregulares. Flores *et al.* [17] proponen un algoritmo para la corrección del solapamiento de color. Je *et al.* [18] muestran una corrección de la distorsión que existe entre el proyector y la cámara,

reduciendo la no linealidad y el solapamiento de color. Con su técnica se reduce el efecto de superficies de color y reflejantes, por lo que se puede utilizar en superficies coloridas. Hu *et al.* [19] estudian los efectos del solapamiento de color, proponen un método para reducir el solapamiento e ignorar el proceso de calibración, mejorando la precisión. Da *et al.* [20], Padilla *et al.* [21] y Skydan *et al.* [22] hacen algunas modificaciones a la técnica para implementar el uso de la transformada de Fourier. Karpinsky *et al.* [24] demostraron cómo esta técnica puede ser utilizada para obtener reconstrucciones en tiempo real, lo cual puede ser de gran utilidad en diferentes aplicaciones.

1.3.1.2 Captura múltiple

Consiste en la combinación de una serie de patrones de franjas sinusoidales con información de color, son proyectados de forma secuencial sobre una superficie a través de los diferentes canales de la cámara y múltiples imágenes son capturadas. Utilizando las técnicas de corrimiento tradicionales se puede obtener la fase desenvuelta de la superficie. Los patrones de franjas se codifican en los canales RGB para su proyección, pero a diferencia de la técnica anterior los canales no se combinan para crear un patrón único, sino que se proyecta el patrón generado en cada plano. Una de las ventajas de esta técnica es que se tiene mayor resolución ya que se tiene más información de la superficie al capturar múltiples imágenes, aunque al aumentar el número de imágenes se requiere de mayor tiempo para el procesamiento y análisis. En la Figura 1.13 se muestra cómo se codifican tres patrones diferentes en los canales RGB de la imagen y después se extrae cada plano de la imagen para su posterior análisis [25]–[31].

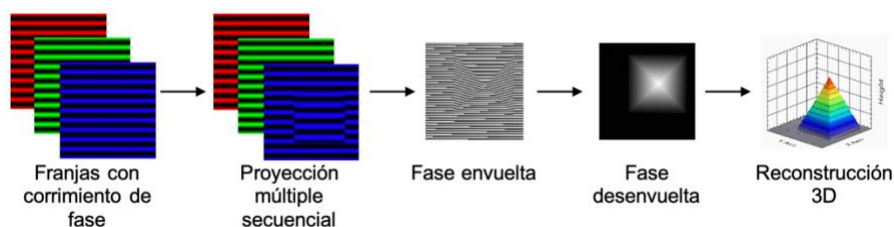


Figura 1.13 Corrimiento de fase en color (captura múltiple).

Zhang *et al.* [25]–[28] utilizan tres patrones de franjas sinusoidales desfasados codificados en los canales RGB de la imagen, los cuales son proyectados de forma secuencial. Utilizando una cámara monocromática se capturan las secuencias y con una cámara de color se captura la superficie para extraer la textura. Utilizando la ecuación 1.2 la fase de la superficie es obtenida para desfases de $\pi/2$ y después se lleva a cabo el desenvolvemento. Esta técnica se puede utilizar en superficies dinámicas.

$$\phi(x, y) = \tan^{-1} \left[\frac{I_1 - I_3}{I_2 - I_3} \right] \quad (1.2)$$

Otros autores como Z. Zhang *et al.* [29] y López *et al.* [30], [31] utilizan el corrimiento de fase de cuatro pasos, proyectando cuatro patrones secuencialmente a través de cada canal RGB, adquiriendo un total de 12 imágenes para la reconstrucción. Se logra alcanzar una mejor resolución, sin embargo, el tiempo de procesamiento y análisis se puede incrementar.

1.3.2 Corrimiento de fase híbrido

Estas técnicas combinan el uso de franjas binarias, discretas en color, corrimiento de fase y franjas sinusoidales. Al igual que en el corrimiento de fase, existen dos tipos de captura que se pueden utilizar: única y múltiple [31]–[42]. Además de proporcionar diferentes tipos de captura, existen dos variaciones principales al utilizar franjas sinusoidales o binarias.

Un patrón de franjas discretas en color puede ser codificado junto con franjas sinusoidales para cualquier tipo de captura. Implementando las técnicas de corrimiento de fase, transformada de Fourier y otros; se puede obtener la fase envuelta y absoluta y realizar una corrección para reducir los problemas de ambigüedad.

Por otro lado, las franjas discretas pueden ser codificadas con franjas binarias para las dos formas de captura. Se pueden utilizar las técnicas de corrimiento de fase y detección de borde por ejemplo, para determinar la fase envuelta y absoluta.

1.3.2.1 Captura única

Un patrón de franjas en color es codificado con un patrón de intensidad sinusoidal como se observa en la Figura 1.14. La mayor ventaja de esta técnica es que mejora el desenvolvimiento de fase al utilizar una secuencia codificada en color, que contiene la ubicación de cada franja dentro del patrón. Este método obtiene mejores reconstrucciones de objetos con superficies discontinuas. El conocer la ubicación de cada franja permite mejorar la precisión en el desenvolvimiento de fase al identificar áreas donde ocurren pasos o discontinuidades mayores a 2π , removiendo así la ambigüedad que se presenta en el método tradicional. Al no requerir la codificación de un patrón sinusoidal en cada canal de color, no es necesario implementar el corrimiento de fase. El análisis en esta técnica es más rápido al utilizar una sola imagen [32]–[36].

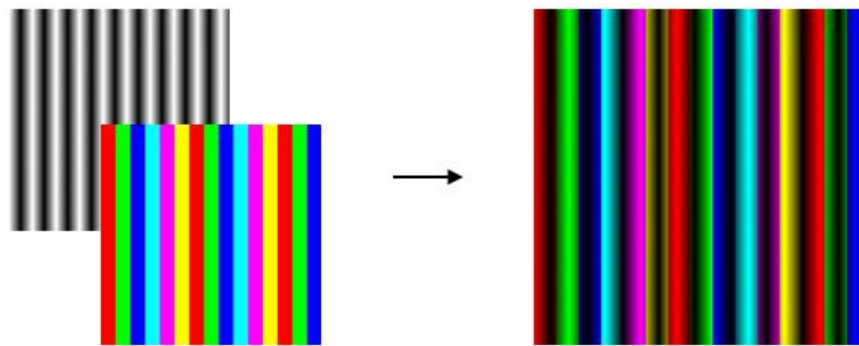


Figura 1.14 Patrón sinusoidal + Franjas discretas en color.

Fong *et al.* [34], [35] utilizan un patrón donde las franjas discretas se encuentran verticales y el patrón sinusoidal horizontal. De la secuencia sinusoidal se extrae la fase envuelta del objeto y de las franjas discretas se obtiene la fase absoluta.

Otra variante para captura única se presenta al codificar dos o más patrones de franjas binarias o discretas en color con un desfaseamiento entre ellos en un solo patrón, como se muestra en la Figura 1.15. También se puede realizar la proyección de forma secuencial para captura múltiple. Ayubi *et al.* [36] codifican dos patrones de franjas binarias desfasados en uno codificado en color. A través del análisis de corrimiento de fase se obtiene la topografía de la superficie.

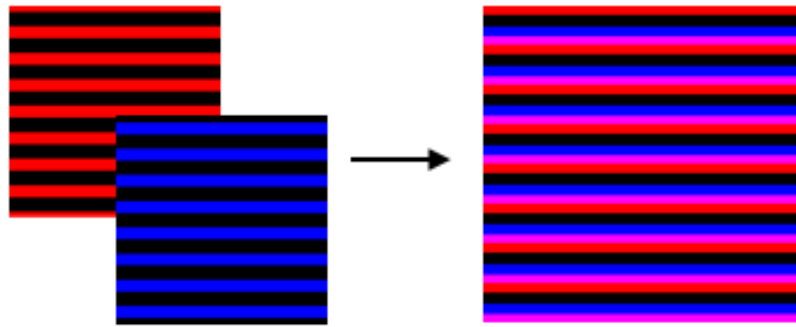


Figura 1.15 Franjas binarias codificadas en color con desfaseamiento (captura única).

1.3.2.2 Captura múltiple

Se combinan franjas discretas en color con múltiples patrones con corrimiento de fase, creando una serie de imágenes de franjas sinusoidales codificadas en color desfasadas como se muestra en la Figura 1.16. Se utiliza el corrimiento de fase para obtener la fase envuelta y se implementa un algoritmo de desenvolvolvimiento. Usualmente se utiliza el análisis de corrimiento de fase de tres pasos para estimar la fase del objeto de prueba. Las ventajas de estas técnicas incluyen el mejoramiento al desenvolver la fase al utilizar una secuencia codificada en color, codificar la ubicación de cada franja en el patrón y las superficies pueden tener discontinuidades mayores a 2π . La diferencia con el método de captura única es que se toman más imágenes, por lo cual se requiere mayor procesamiento y análisis [37]–[39].

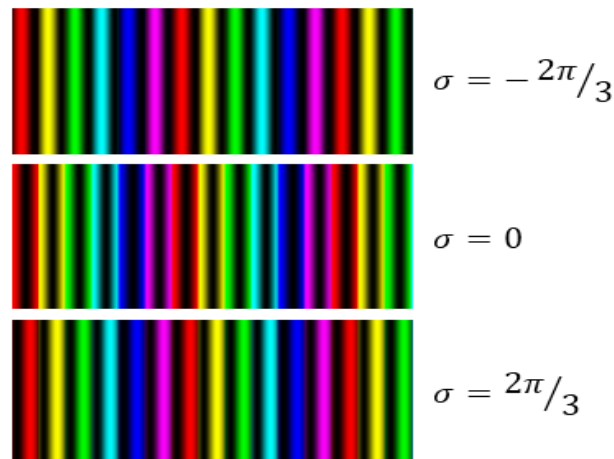


Figura 1.16 Corrimiento de fase codificado en color.

Cheng *et al.* [37] combinan un patrón de franjas discretas en seis colores y tres patrones sinusoidales con un desfaseamiento de $2\pi/3$. Se realiza la proyección sobre un objeto de forma secuencial y después se lleva a cabo el análisis. Las franjas proyectadas se subdividen en grupos, en los que a partir del color se determina el orden o ubicación de cada franja dentro de su subgrupo. Se obtiene la fase con el análisis tradicional y dependiendo del grupo se extiende la fase envuelta, para así llevar a cabo el desenvolvimiento. Li *et al.* [38] utilizan corrimiento de fase de cuatro pasos, en el que la fase envuelta se extrae de los planos de intensidad y la fase absoluta de las franjas discretas, la corrección de fase se obtiene según el orden del grupo. Da *et al.* [39] implementan el análisis de Fourier.

También se puede realizar la captura múltiple de dos o más patrones de franjas binarias o discretas en color con un desfaseamiento entre ellos de forma secuencial como se muestra en la Figura 1.17. Anguiano *et al.* [40] proyectan secuencialmente tres patrones de franjas binarias con desfaseamiento de $2\pi/4$, utilizando los colores cian, magenta y amarillo. A través de la técnica de corrimiento de fase se obtiene la topografía del objeto. Chen *et al.* [41] realizan una variante de la técnica, en donde en el canal rojo de la imagen codifican franjas sinusoidales y en los canales verde y azul franjas binarias. Se capturan múltiples imágenes haciendo un corrimiento del patrón sinusoidal del cual adquieren la fase envuelta del objeto y a partir de las franjas binarias se lleva a cabo el desenvolvimiento y corrección de fase aún en superficies de color.

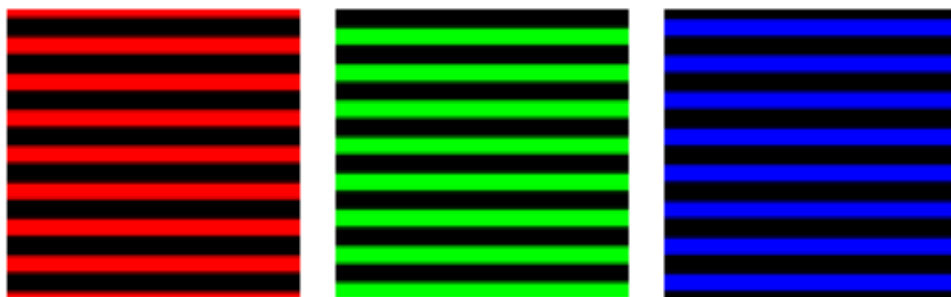


Figura 1.17 Franjas binarias en color con desfaseamiento (captura múltiple).

1.3.3 Variación continua

Como se mencionó anteriormente este tipo de patrones se basan en la proyección de luz con una longitud de onda que varía gradualmente, pueden o no seguir el mismo orden de los colores del arcoíris. Una de las ventajas de estas técnicas es su rapidez ya que solo requieren la captura de una imagen, pero una de las desventajas es que se presentan problemas de gamma y de solapamiento de color al tener pequeñas variaciones de longitud de onda tan cercanas unas a otras [8], [43]–[45].

1.3.3.1 Código de color con variación continua

Geng [8] describe un patrón en el que la longitud de onda varía gradualmente y se puede repetir a lo largo de la secuencia, ver Figura 1.18. La secuencia de color se puede repetir sin la necesidad de seguir el mismo orden de los colores en el arcoíris.



Figura 1.18 Técnica de color con variación continua.

1.3.3.2 Cámara arcoíris 3D

Tajima *et al.* [43], Geng *et al.* [44] y Yingming *et al.* [45] proyectan sobre el objeto un patrón de iluminación con longitud de onda variante (tipo arcoíris) y establecen una relación entre las diferentes longitudes de onda y el ángulo de proyección, ver Figura 1.19. Esta técnica utiliza el principio de triangulación, permite la digitalización de objetos a alta velocidad y es fácil de implementar. A diferencia del patrón de código de color de variación continua, en esta técnica se respeta el orden de los colores del arcoíris y solo se proyecta una secuencia del patrón.

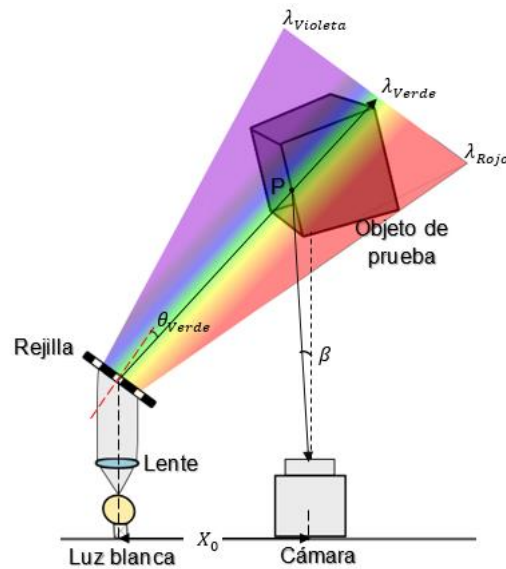


Figura 1.19 Principio de cámara arcoíris.

1.3.4 Franjas indexadas

En esta técnica las franjas en color son codificadas con una secuencia específica, en la que cada color o grupo en la secuencia es asociado a una palabra o código que determina la ubicación individual. Normalmente se captura una sola imagen, aunque puede ser adaptada para múltiple captura. Esta técnica es útil cuando se tienen discontinuidades pronunciadas en profundidad y superficies con color o sombras. Frecuentemente se utiliza la indexación de franjas con alguna técnica adicional como corrimiento de fase, transformada de Fourier o identificación de color para obtener el mapa de fase. La secuencia puede extenderse al utilizar más colores en el patrón de luz estructurada [32], [33], [45]–[56].

Las franjas se codifican con un orden único, usualmente basado en la secuencia de De Bruijn, creando franjas en las que existen transiciones únicas que no se repiten en todo el patrón, lo cual permite la identificación de cada grupo, ver Figura 1.20.



Figura 1.20 Franjas en color codificadas con la secuencia de De Bruijn.

Esta técnica puede utilizar un patrón de franjas en color codificadas con la secuencia de De Bruijn junto a un patrón sinusoidal como se muestra en la Figura 1.14. Identificando la secuencia codificada a través del color se determina el orden o localización de las franjas, mientras que del patrón sinusoidal se extrae la fase absoluta y se puede realizar la corrección de fase [33], [46]. Barone *et al.* [47] utilizan además espacios en negro entre cada una de las franjas en color, mejorando así la identificación de cada franja. Otros autores [32], [34], [35], [55]–[57] utilizan una secuencia diferente a la de De Bruijn.

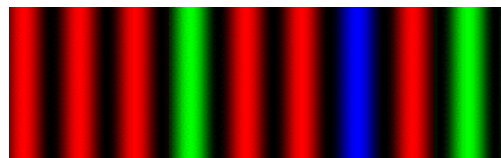


Figura 1.21 Franjas sinusoidales codificadas en color con la secuencia de De Bruijn.

1.3.5 Arreglos indexados

Las técnicas de arreglos indexados son similares a las franjas indexadas. Cada elemento en el patrón es asociado a un código o palabra que determina la ubicación individual. Para estas técnicas se adquiere una sola imagen. Dependiendo del patrón proyectado pueden ser clasificados como rejilla [58]–[61] o mosaico [61]–[72].

En un patrón se codifica un arreglo bidimensional de rejillas, mosaico de puntos o cualquier figura geométrica utilizando información en color. Cada elemento se puede identificar para obtener la palabra codificada y después implementar una técnica de análisis para obtener la topografía. Existe una gran variedad de patrones que se utilizan, codificando información a través del color, ubicación o forma de los elementos. Con esta técnica se puede obtener la imagen tridimensional de áreas extensas y con mayor resolución dependiendo del tamaño de los elementos.

Sin embargo, puede ser difícil identificar cada elemento proyectado, el solapamiento de color se presenta en píxeles cercanos complicando la decodificación.

Todas las técnicas de arreglos indexados presentan un problema de correspondencia entre el proyector y la cámara, el cual se presenta al buscar la relación de un punto entre ellos. Debido al espacio que existe entre cada elemento se puede perder información tridimensional en algunas regiones.

1.4 Configuraciones para proyección de franjas

A continuación, se describen las tres configuraciones más utilizadas para la proyección de franjas según Ribbens *et al.* [6], una configuración en línea que se ha encontrado en trabajos recientes [73], [74] y para múltiples proyectores y/o cámaras se encontró una configuración adicional [22], [75].

1.4.1 Proyector perpendicular y cámara con ángulo

El eje óptico del proyector es perpendicular al plano de referencia y la cámara colocada con un ángulo α como se muestra en la Figura 1.22. Con esta configuración es difícil encontrar la relación entre píxeles de la imagen y coordenadas del mundo real. Se necesita una calibración muy precisa de la cámara y es indispensable conocer la posición de la cámara para calcular las coordenadas correctas, no es muy utilizada ya que puede presentar errores.

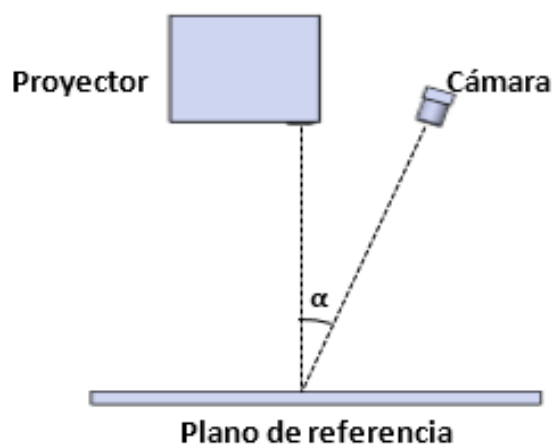


Figura 1.22 Configuración con proyector perpendicular y cámara con ángulo.

1.4.2 Proyector con ángulo y cámara perpendicular

El eje óptico de la cámara es perpendicular al plano de referencia y el proyector con un ángulo α como se muestra en la Figura 1.23. Las coordenadas del mundo real y píxeles de la cámara tienen una relación directa, por lo cual se presentan menos errores de medición que en la configuración anterior.

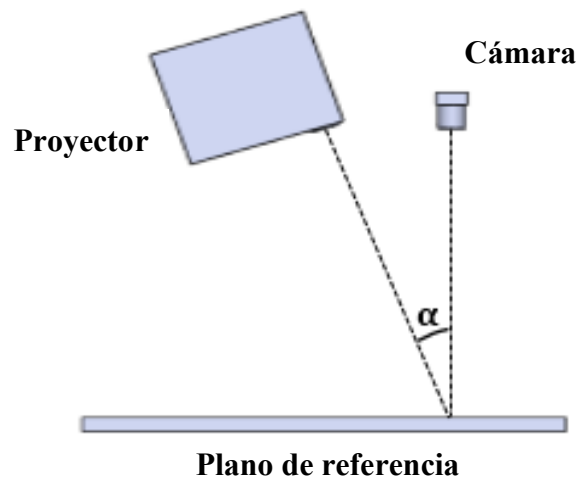


Figura 1.23 Configuración con cámara perpendicular y proyector con ángulo.

1.4.3 Proyector y cámara con ángulo

Configuración de medición fuera de eje. El proyector y la cámara se colocan con un ángulo $\alpha/2$ con respecto al eje de referencia, y en la mayoría de los casos se colocan a la misma distancia del plano de referencia como se muestra en la Figura 1.24. No es muy recomendado ya que es difícil encontrar la relación entre los píxeles de la imagen y las coordenadas reales, además se presentan errores por la diferente perspectiva de la cámara y del proyector, por lo que es necesario calibrar tanto la cámara como el patrón proyectado.

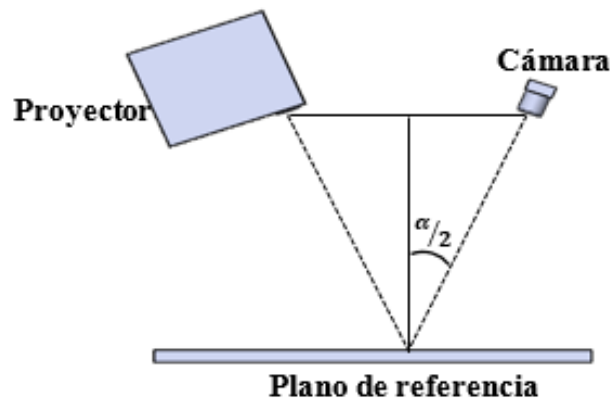


Figura 1.24 Configuración con proyector y cámara con ángulos $\alpha/2$.

1.4.4 Proyector y cámara perpendiculares

Se encontró en trabajos recientes una cuarta configuración en la cual el proyector y la cámara se encuentran ortogonales al plano de referencia sin ningún ángulo entre ellos como se muestra en la Figura 1.25. Algunas de las ventajas es que se pueden reducir las sombras que se forman en el patrón proyectado sobre la superficie del objeto y además se puede tener una relación 1:1 entre el campo de visión y el área de proyección [73], [74].

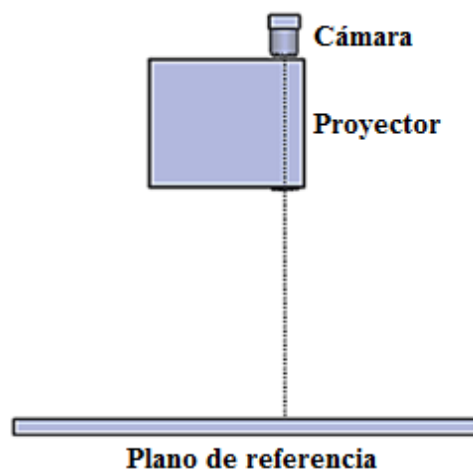


Figura 1.25 Configuración con proyector y cámara ortogonales al plano de referencia.

1.4.5 Múltiples proyectores y cámaras

Existen sistemas donde se utilizan múltiples cámaras y proyectores por lo que se tienen configuraciones diferentes, pero aún en estos casos la configuración está basada en alguna variación de las mencionadas anteriormente [22], [75].

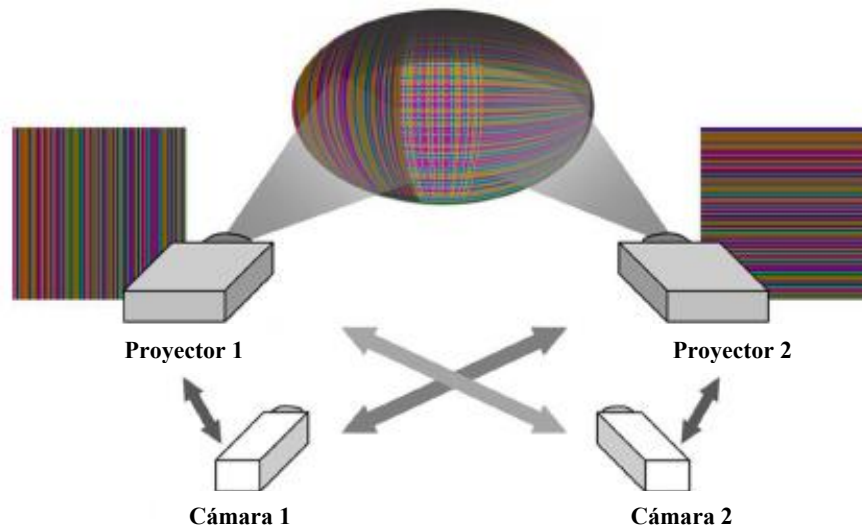


Figura 1.26 Configuración con múltiples proyectores y cámaras.

1.5 Parámetros importantes

En cualquier sistema de reconstrucción tridimensional se deben evaluar principalmente tres parámetros: precisión, resolución y velocidad.

1. La precisión define la variación máxima del valor obtenido por el sistema y las dimensiones reales.
2. La resolución óptica es la capacidad del sistema de diferenciar puntos individuales o líneas en una imagen.
3. La velocidad es la habilidad del sistema de repetir la adquisición del cuadro completo en un corto intervalo de tiempo y es importante para objetos en movimiento.

1.6 Trabajos realizados

Existe una gran cantidad de investigaciones enfocadas en las técnicas de perfilometría tridimensional utilizando luz estructurada, principalmente proyección de franjas. La mayor parte de estas técnicas se enfocan en obtener el perfil 3-D del objeto mejorando la precisión, velocidad de digitalización, métodos de análisis y calibración. Una de las técnicas más utilizadas es la de corrimiento de fase por su efectividad, en trabajos más recientes se ha encontrado que el uso de franjas de color permite mejorar algunas de las limitantes que se tienen con las técnicas tradicionales. Como se describió anteriormente, el uso de la identificación de color se utiliza con algunas técnicas pero solamente como apoyo a algún otro método y no se utiliza para realizar el análisis principal que permita obtener la reconstrucción tridimensional. A continuación, se hace una breve descripción de algunos trabajos desarrollados por otros autores, relacionados con el tema de esta tesis.

Tajima e Iwakawa [43] hacen una descripción de la técnica de arcoíris la cual utiliza el principio de triangulación. Describen un sistema experimental que utiliza una lámpara de Xenón y un espejo frío que elimina la componente infrarroja. Después se usa una lente colimadora de luz blanca y el haz de luz blanca colimado incide sobre una apertura. El haz que emerge de la apertura llega a una rejilla de difracción y ésta genera un patrón de difracción de tipo arcoíris que es proyectado sobre el objeto. Una cámara monocromática ubicada estratégicamente captura dos imágenes del objeto iluminado utilizando un filtro de color diferente en cada captura. Finalmente se obtiene la información de los píxeles iluminados. Una de las ventajas de este método es que se puede obtener toda la información del objeto en un solo cuadro. Los autores, también proponen un nuevo método de calibración que permite tomar mediciones de todos los píxeles visibles.

Geng [44] describe un sistema de reconstrucción tridimensional novedoso utilizando una nueva técnica de proyección de luz estructurada a la que llama cámara arcoíris. Esta técnica de proyección de luz es de longitud de onda con variación espacial

continua. El sistema utiliza un proyector, una lente cilíndrica, un filtro de longitud de onda variable lineal LVWF (*Linear Variable Wavelength Filter*) y una cámara CCD de color. El proyector y la cámara se encuentran en una misma línea base. Primero se proyecta luz blanca sobre la lente cilíndrica y el haz de luz emergente pasa a través del filtro LVWF formando un abanico de luz con longitud de onda variante (arcoíris) que es proyectado sobre la superficie del objeto. El sensor de la cámara registra una imagen bidimensional del objeto iluminado con el patrón arcoíris y después se calculan las coordenadas geométricas de cada punto del objeto, usando la técnica de triangulación. Algunas ventajas del sistema son: no tiene partes mecánicas en movimiento, es fácil de implementar, no implica riesgo para la vista, usa componentes de fácil adquisición, resulta de bajo costo y no existe un problema de correspondencia como en la fotogrametría.

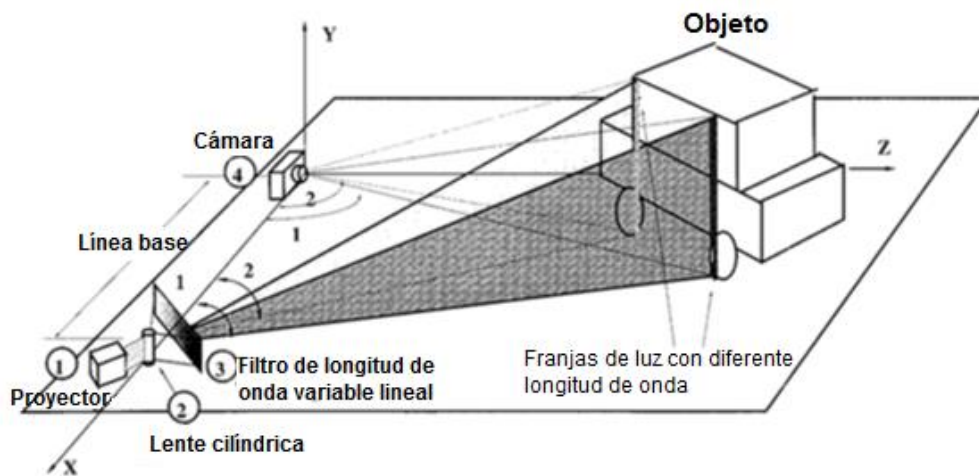


Figura 1.27 Técnica de cámara arcoíris de Geng.

En el modelo de Geng se utiliza el principio de triangulación y para encontrar el ángulo de proyección θ y las coordenadas 3-D de los puntos en la superficie de un objeto, se utilizan las siguientes ecuaciones.

$$\theta = \beta - \tan^{-1} \frac{L/2 - d}{g} \quad (1.3)$$

$$x = \frac{b}{f \operatorname{ctg} \theta - u} u \quad (1.4)$$

$$y = \frac{b}{f \operatorname{ctg} \theta - u} v \quad (1.5)$$

$$z = \frac{b}{f \operatorname{ctg} \theta - u} f \quad (1.6)$$

Donde β es el ángulo entre la línea base y la superficie del filtro, g es la distancia entre el filtro y el centro de la lente cilíndrica, L es la longitud efectiva del filtro y d es la distancia entre la posición de una longitud de onda y la orilla azul del filtro.

Feipeng, Wang y Hu [39] presentan un método para la reconstrucción de objetos tridimensionales con superficies coloridas. Primero se proyecta un primer patrón de franjas sinusoidales de color sobre el objeto y se evalúa con la transformada de Fourier. Después se proyecta un segundo patrón de franjas de color complementario (inverso) que ayuda a eliminar perturbaciones que se puedan generar por el color de la superficie del objeto. En este trabajo se describe el método de obtención y desenvolvimiento de fase utilizado. Se presentan los resultados experimentales y se observa que se puede reconstruir la superficie de un objeto aun cuando tiene colores.

Feipeng y Gai [76] presentan un modelo de medición utilizando un proyector tipo DLP (*Digital Light Processing*), una cámara CCD y una computadora. Se describe un método de calibración para este modelo el cual utiliza una placa de calibración para obtener los parámetros del modelo. Esta placa se debe colocar al menos en dos posiciones para poder obtener todos los parámetros. La ventaja que se tiene al utilizar este modelo es que no importa si la cámara y el proyector no se encuentran a la misma altura por lo que ofrece una mayor flexibilidad.

Anguiano *et al.* [40] describen una técnica para digitalizar un objeto y obtener su información de color al mismo tiempo. Se proyecta una serie de franjas en color cian, magenta y amarillo, desfasadas entre sí. Para obtener el color y la forma del objeto se siguen tres pasos: primero se capturan las imágenes del objeto iluminado con los

patrones de franjas proyectados en color cian, magenta y amarillo respectivamente; y luego se fusionan en una sola imagen. Posteriormente se hace un mapa de fase y se junta el mapa de fase y la textura del color. Finalmente se combinan las franjas cian y amarillas para obtener la forma del objeto. Al llevar a cabo la integración de color e información de fase se pasa de una imagen en tonos de gris a una imagen en color. En la Figura 1.28 se muestra la serie de franjas cian, magenta y amarillas proyectadas sobre el objeto.



Figura 1.28 Patrones de franjas de color de Anguiano.

Huang *et al.* [14] proponen una técnica de proyección de franjas de color RGB para definir el contorno de un objeto en 3-D. Primero se proyectan las franjas de color RGB sobre el objeto. Los parámetros de estas franjas se pueden modificar por medio de una interfaz que se desarrolló en Visual Basic®. Después se separa la imagen en cada uno de sus componentes de color. Se utiliza un algoritmo para desenvolver la fase de las tres imágenes obtenidas. Una de las ventajas de esta técnica es que puede definir rápidamente el contorno del objeto con una sola imagen. En la Figura 1.29 se muestra el sistema propuesto.

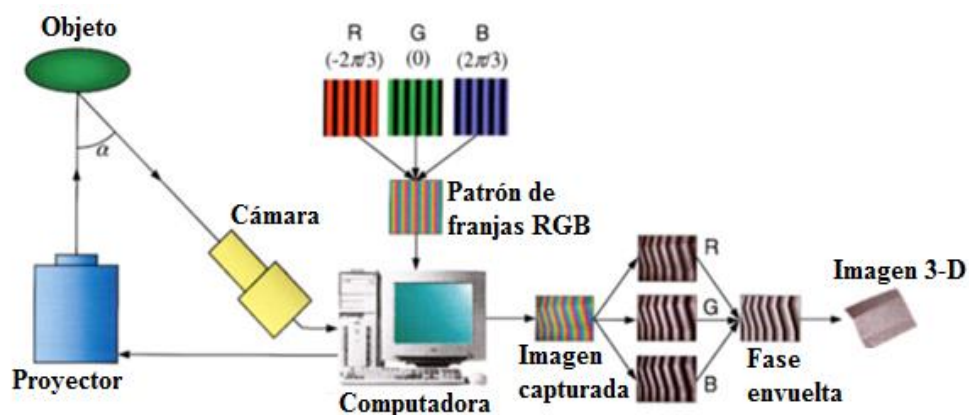


Figura 1.29 Proyección de franjas RGB de Huang.

Ribbens *et al.* [6] describen un software para simular la proyección de franjas sobre un objeto. Con este software se pueden utilizar tres configuraciones diferentes del sistema, realizar mediciones espaciales o temporales, así como variar la frecuencia y desfaseamiento. Una de sus ventajas es que considera las sombras que se presentan en modelos tridimensionales por lo que no se calcula la fase en lugares donde no llega la luz, por lo cual da resultados muy precisos.

Una gran cantidad de investigaciones se enfocan en mejorar las técnicas convencionales en escala de grises y permiten reducir algunas de las limitantes que normalmente se encuentran. Zhang *et al.* [77] describen diferentes técnicas que se enfocan en corregir problemas que normalmente se presentan con corrimiento de fase, como superficies altamente reflectoras. Estas técnicas se basan en hacer capturas múltiples modificando los parámetros como intensidad, exposición, etc. Al realizar estas modificaciones permiten realizar una fusión de las diferentes capturas para obtener un resultado óptimo. Wang *et al.* [78], [79] proponen un método en donde se utiliza la proyección adaptando la intensidad y tiempo de exposición sobre objetos brillantes. Además, proponen un método para la extracción de la textura de color de superficies, evaluando la intensidad de los píxeles en escala de grises. Guo *et al.* [80] proponen una técnica en la que se utiliza un patrón sinusoidal compuesto con diferente frecuencia para objetos dinámicos, en el cual utilizando corrimiento de fase se calcula la fase de objetos estáticos y al mismo tiempo con un patrón de alta frecuencia se localiza la región en movimiento utilizando la transformada de Fourier.

Existe una gran cantidad de trabajos enfocados a optimizar la calibración de sistemas de reconstrucción tridimensional entre los que se destacan: Li *et al.* [81] presentan un nuevo algoritmo para obtener coordenadas 3-D usando dos tipos de calibración y uniendo después los datos en coordenadas globales, Baker *et al.* [82] proponen una técnica de calibración usando una red neuronal que ayuda a reducir aberraciones no lineales que se presentan al momento de capturar la imagen, Zhang y Huang [83] proponen una nueva técnica de calibración donde se analiza el proyector como cámara y se establece un método para obtener una relación entre píxeles de

cámara y píxeles de proyector, Asundi y Wensen [84] describen una técnica de calibración donde no es necesario conocer los parámetros del sistema, basta con realizar mediciones del plano desde diferentes posiciones para calibrar el sistema.

Gran parte de las investigaciones realizadas y utilizadas en el desarrollo de escáneres tridimensionales comerciales se basan en la proyección de luz estructurada donde normalmente se implementan las técnicas más conocidas en las que el análisis puede llegar a ser muy complejo, lo cual consume tiempo y recursos. Además es necesario llevar un procedimiento de calibración para utilizar técnicas como triangulación para convertir los resultados a unidades reales, en el cual se debe tener una configuración en la que el ángulo entre la cámara y proyector esté establecido con precisión, y la imagen debe ser calibrada porque en estas configuraciones normalmente la distorsión puede afectar de forma significativa los resultados.

En el Laboratorio de Aplicaciones Láser en Industria y Medicina de la División de Estudios de Posgrado e Investigación del Instituto Tecnológico de Chihuahua se han desarrollado investigaciones y prototipos de escáneres tridimensionales usando principalmente métodos de escaneo con luz láser y diferentes técnicas de luz estructurada, contando a la fecha con una fuente sólida de información en esta área.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Colorimetría

La percepción del color es una de las características visuales más importantes para los humanos, el poder percibirlo y apreciarlo ha sido un tema de gran interés científico. De acuerdo con la teoría ondulatoria, la luz es un fenómeno óptico que puede representarse como una onda electromagnética transversal que se propaga en el tiempo y en el espacio. La sensibilidad del ojo humano responde a un rango muy pequeño del espectro electromagnético que comprende longitudes de onda que van de los 400 nm a los 700 nm. En este rango, el ojo humano puede percibir las diferentes ondas electromagnéticas gracias a que cada longitud de onda se encuentra asociada a una percepción diferente de color. En la Figura 2.1 se muestra el espectro electromagnético con la región de luz visible resaltada en color y se observa además, cómo el espectro visible tiene asociado a cada longitud de onda un color determinado [85], [86].

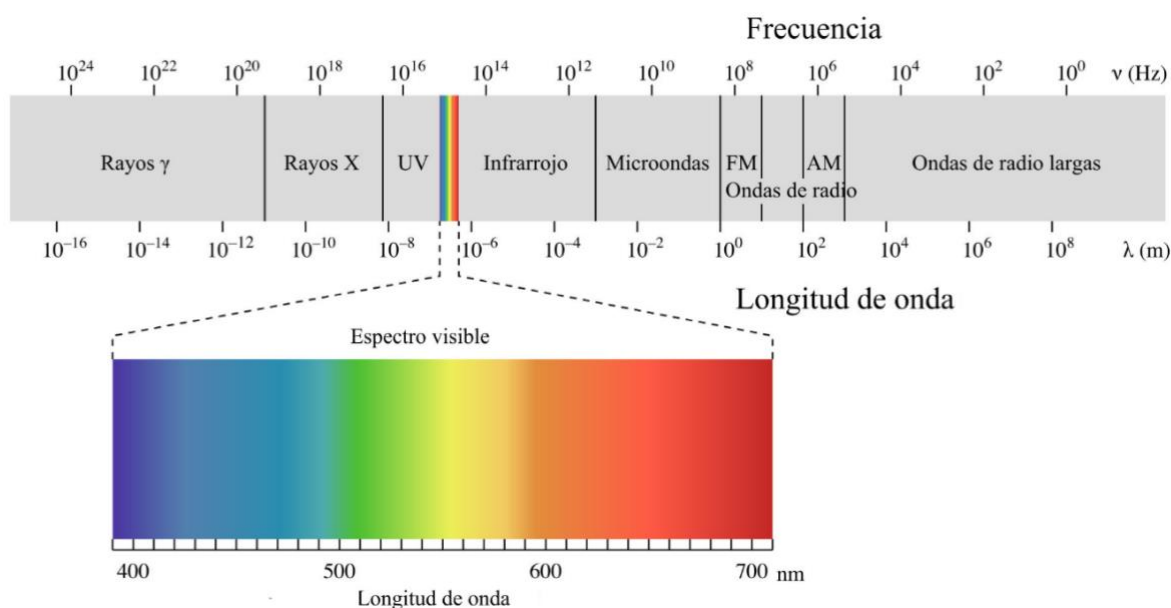


Figura 2.1 Espectro electromagnético.

La colorimetría es la ciencia que estudia la medición del color permitiendo cuantificar de manera objetiva sus características. Este campo científico estudia bajo cuáles especificaciones físicas de un estímulo de luz se produce la sensación de un color determinado, buscando representar cualquier luz incidente con un número reducido de parámetros. La medida básica del estímulo de un color es su distribución espectral como una función de longitud de onda o frecuencia. La colorimetría provee la representación de un color en términos de tres variables independientes.

2.1.1 Teoría tricromática

Una de las leyes de Grassmann establece que para especificar un color es necesario tener tres elementos: matiz (*hue*), saturación (*saturation*) y luminosidad (*luminance*).

Maxwell fue el primero en producir un diagrama de color describiendo la teoría tricromática. En un triángulo equilátero colocó los tres colores primarios en cada uno de los vértices y el color blanco se formó en el centro como se muestra en la Figura 2.2. Otros colores pueden formarse combinando los componentes *r*, *g*, *b* dependiendo de las distancias de cada uno de los lados del triángulo.

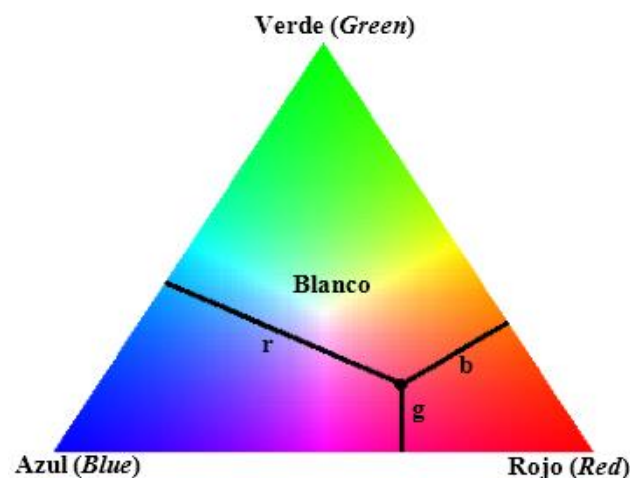


Figura 2.2 Triángulo de Maxwell.

2.1.2 Atributos del color

Al utilizar los elementos matiz, saturación y luminosidad para describir un color se puede identificar y diferenciar un color de otro de forma precisa [87].

El matiz es un atributo que define cómo percibimos principalmente el color de un objeto, es la sensación visual en la que un objeto da la apariencia de ser similar al color rojo, verde, amarillo, azul o a la combinación de dos de ellos. En la Figura 2.3 se muestran los diferentes matices o colores y cómo varían al combinarse, por lo que se observa que el matiz está relacionado con la longitud de onda.



Figura 2.3 Matiz.

La saturación define la vivacidad o palidez de un color, es decir qué tan puro es. La saturación puede variar desde menor croma o nivel de gris hasta mayor croma o matiz puro (color vivo asociado a una determinada longitud de onda) como se muestra en la Figura 2.4.

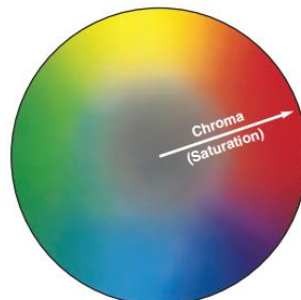


Figura 2.4 Saturación.

La luminosidad es la característica de un color que describe su intensidad luminosa definiendo qué tan claro se percibe un color. Los colores se pueden clasificar como colores claros u oscuros cuando se compara su luminosidad. En la Figura 2.5 se muestra como la luminosidad puede variar desde el negro hasta el blanco.

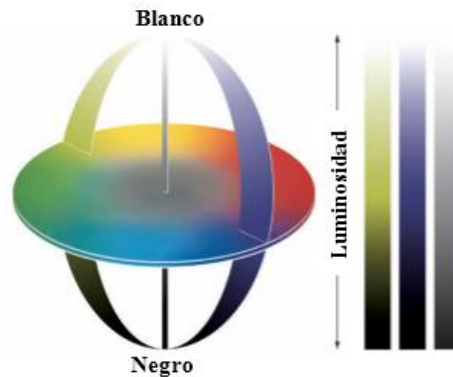


Figura 2.5 Luminosidad.

En la Figura 2.6 se puede observar cómo combinando estos atributos se pueden describir una infinidad de colores.

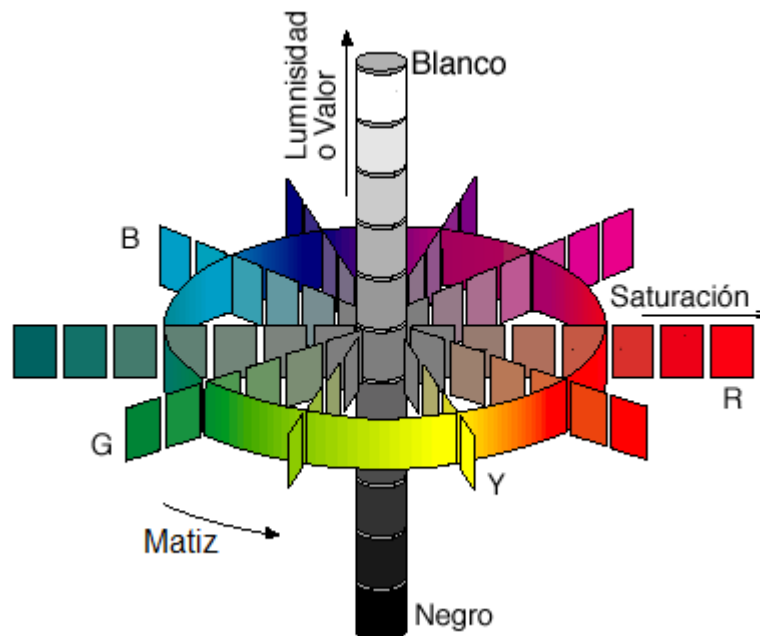


Figura 2.6 Matiz, saturación y luminosidad.

2.1.3 Espacios de color

Los espacios de color se definen como la organización específica de los colores, combinando el modelo de color con una descripción precisa de cómo son interpretados los componentes. Representan los colores en términos de intensidad y normalmente pueden definir de una a cuatro dimensiones en un espacio, normalmente se utilizan de tres a cuatro componentes del color. Mientras que el modelo de color se refiere a la descripción matemática que describe los colores representados por una secuencia numérica [85]–[92].

Estos espacios de color son importantes en diferentes áreas, principalmente para el procesamiento digital de imágenes y para comprender la visión humana. Los modelos de color se pueden dividir de forma general en tres tipos dependiendo a qué están orientados: a hardware, a usuarios y a instrumentos.

Los espacios o modelos orientados a hardware pueden detectar variaciones pequeñas en el color y se utilizan para el procesamiento, adquisición y análisis; como en la televisión, impresoras, pantallas, etc. En los cuales la salida depende de las coordenadas utilizadas. Los modelos que se utilizan más comúnmente son el RGB y CMYK.

Los espacios orientados a usuarios describen características intuitivas del color, como tinte, matiz, tono, etc. Estos se enfocan en el matiz y saturación del color, los espacios se representan con coordenadas cilíndricas. Así como la visión humana, éstos no son sensibles a variaciones pequeñas. Algunos ejemplos son el HSL, HSI y HSV.

Los espacios enfocados a instrumentos de color son estandarizados por la Comisión Internacional de Iluminación CIE (*Commission Internationale de l'Eclairage*). Las coordenadas de color son iguales para todas las salidas a diferentes medios. Algunos ejemplos son CIE XYZ, CIE L*a*b y CIE Luv.

La inspección y medición del color se puede hacer a través de instrumentos como el espectrómetro y colorímetro, los cuales permiten tener una medición cuantitativa del color de un objeto. La visión por computadora permite extraer información cuantitativa de la información de color de imágenes digitales sin estar en contacto y de forma rápida, por medio del análisis y procesamiento [90]. A continuación se describen algunos de los espacios de color más utilizados.

2.1.3.1 Modelo RGB

Utiliza los tres colores primarios aditivos (rojo, verde y azul). En los colores aditivos se combinan las intensidades de los tres colores y se puede formar el blanco como se muestra en la Figura 2.7. No es un espacio de color absoluto, porque depende de factores externos como la sensibilidad o la iluminación.

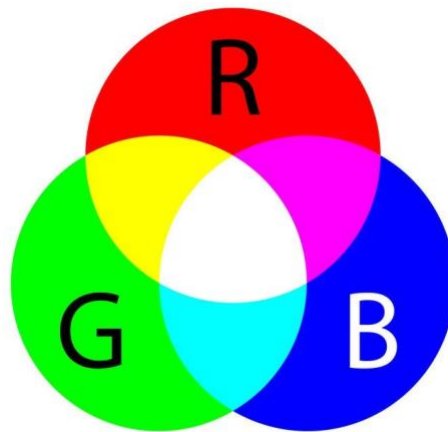


Figura 2.7 Colores aditivos RGB.

El espacio de color RGB se representa con un cubo normalizado, en el que los valores del rojo, verde y azul están en el rango de $[0, 1]$, como se muestra en la Figura 2.8. El color negro se encuentra en las coordenadas $(0, 0, 0)$ y en la esquina opuesta está el blanco $(1, 1, 1)$. En la diagonal principal entre las dos esquinas anteriores se encuentra la escala de grises.

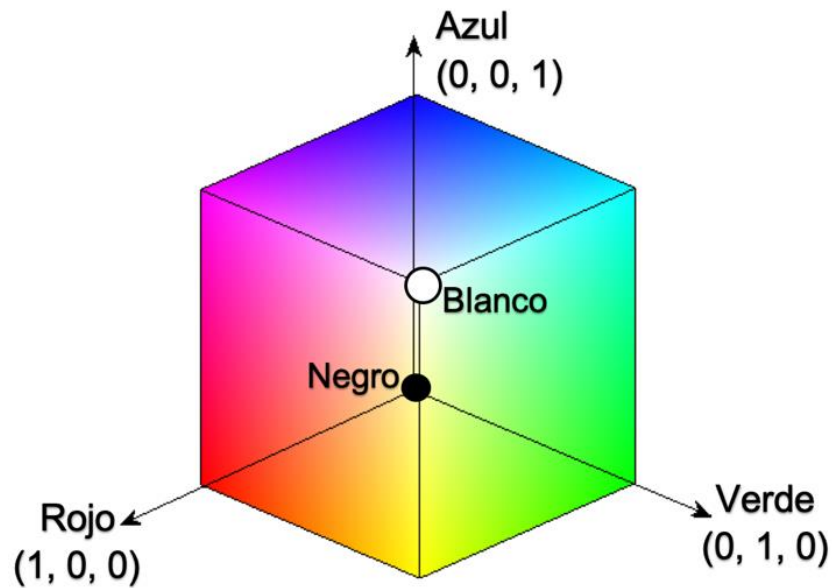


Figura 2.8 Espacio de color RGB.

Es el modelo base para las aplicaciones de visión (computadoras, televisión, cámaras, etc.) ya que no se requiere hacer alguna transformación para mostrar el color en una pantalla. A partir de la combinación de los tres colores se puede formar cualquier otro. Existe una variación conocida como RGBA en la que se agrega un canal adicional correspondiente a alfa, que permite indicar la transparencia.

2.1.3.2 Modelo CMY

Utiliza los colores sustractivos complementarios al RGB, que son el cian, magenta y amarillo. El proceso de sustracción remueve partes del espectro visible, creando el color negro cuando se tienen los tres valores como se muestra en la Figura 2.9. Normalmente se utiliza en las impresoras, incluyendo un cuarto valor (K) que corresponde al negro (CMYK).

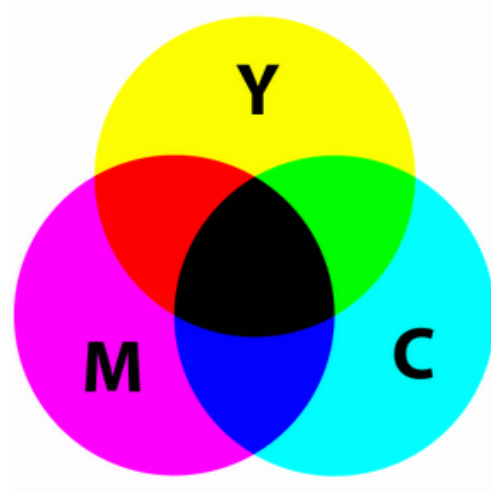


Figura 2.9 Colores sustractivos CMY.

El espacio de color CMY se representa con un cubo normalizado, en el que los valores del cian, magenta y amarillo están en el rango de $[0, 1]$, como se muestra en la Figura 2.10. El color negro se encuentra en las coordenadas $(1, 1, 1)$ y en la esquina opuesta está el blanco $(0, 0, 0)$.

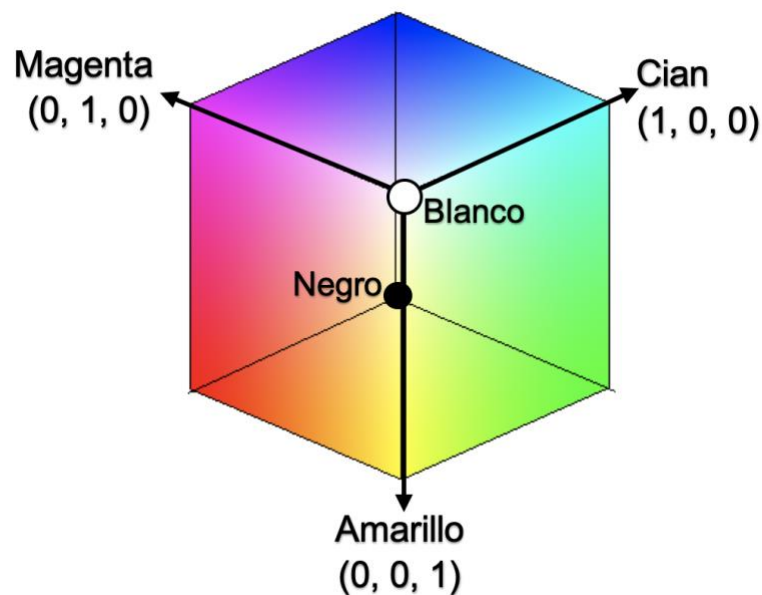


Figura 2.10 Espacio de color CMY.

2.1.3.3 Modelos HSI

Los modelos de color HSI, HSL, HSV y HSB están basados en un sistema de visión humana porque utilizan características intuitivas del color (tono, tinte, sombra, etc.). Se utilizan coordenadas de color cilíndricas para la representación de los puntos RGB.

Los diferentes modelos pueden ser HSI (matiz, saturación, intensidad), HSV (matiz, saturación, valor), HSL (matiz, saturación, luminosidad) y HSB (matiz, saturación, brillo). En todos los casos el valor de matiz se refiere al atributo con el que se identifica el color principal, el rango es de 0° - 360° (0° – rojo, 120° – verde y 240° – azul). La saturación indica la pureza del color, con el rango de 0 – 1.

Los diferentes modelos son muy similares, pero HSL y HSI se representan con un doble cono que puede llegar al brillo del blanco. En donde L representa la luminosidad y la I intensidad, que se refieren a la luz que puede tener el color. El espacio de color se puede ver en la Figura 2.11.

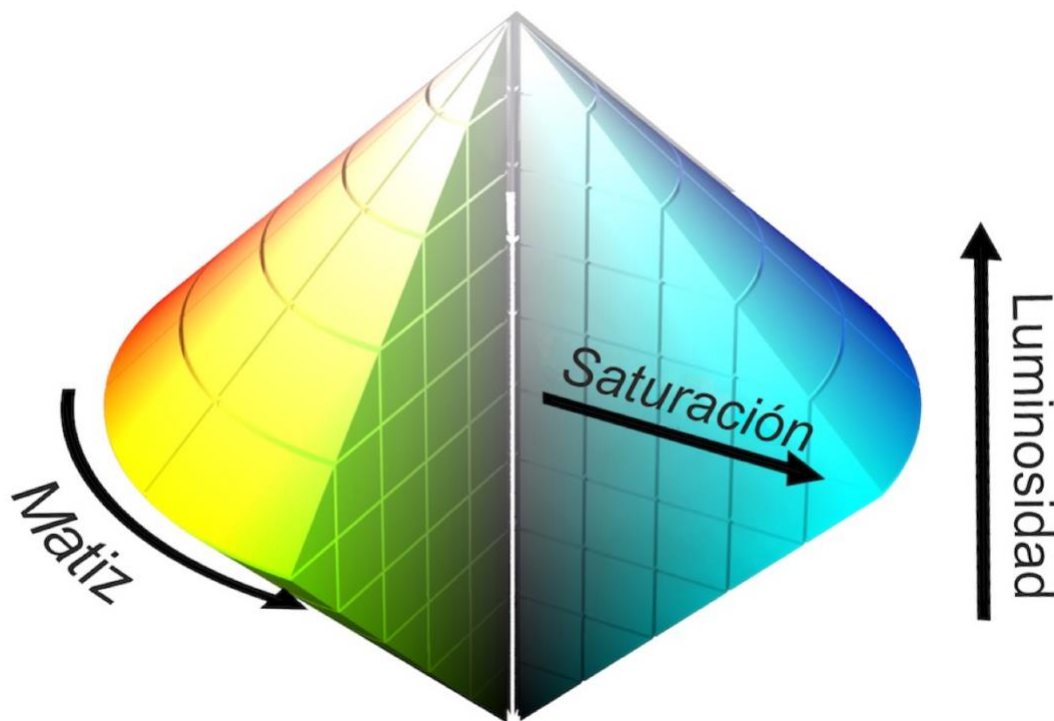


Figura 2.11 Espacio de color HSL.

Mientras que HSV y HSB se representan con un cono simple (ver Figura 2.12) en el que el tono puro puede llegar a un gris medio. El valor o brillo representan qué tan claro u oscuro es un color, si este valor es cero el color siempre será negro. Ya que estos modelos están basados en la percepción visual humana, tienen mayor relación con la evaluación del color de superficies, pero variaciones pequeñas del color no se pueden percibir con estos modelos.

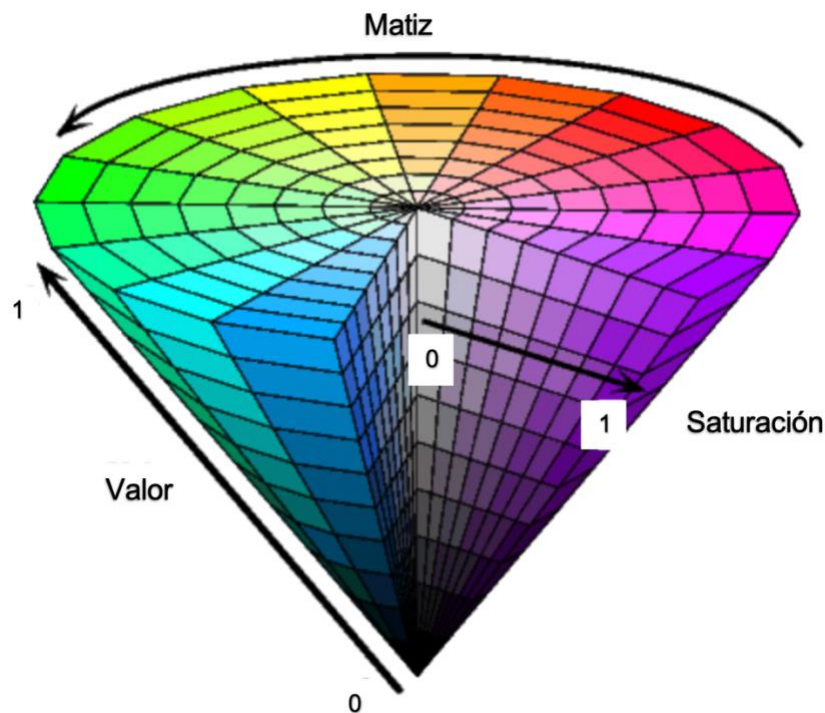


Figura 2.12 Espacio de color HSV.

2.1.3.4 Sistema de Munsell

Este sistema se basa en la percepción humana y se desarrolló antes de que la medición y especificación del color estuvieran disponibles. El sistema de Munsell hace una representación cilíndrica en la que se asigna valores numéricos a las tres propiedades o atributos del color: matiz, valor y saturación o croma, ver Figura 2.13.

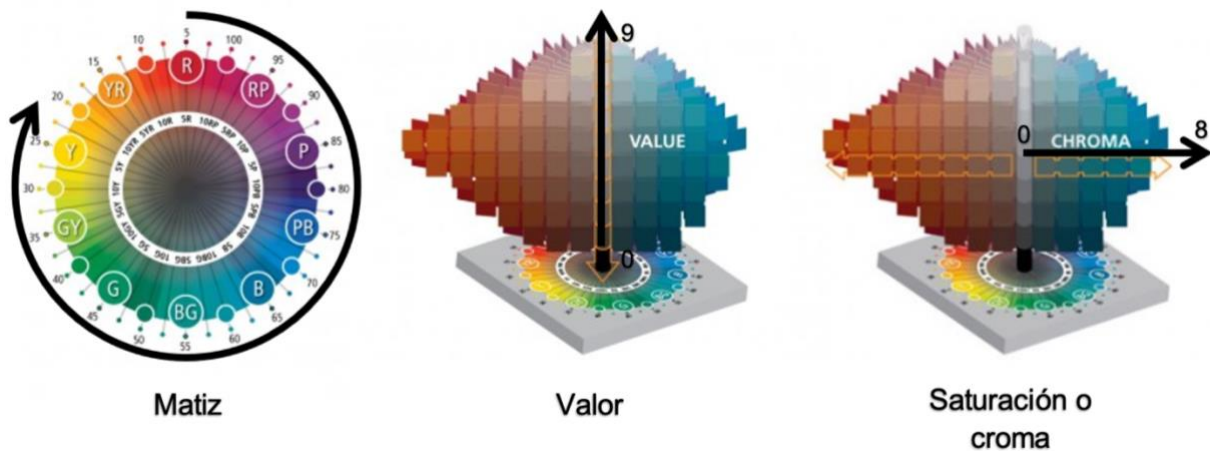


Figura 2.13 Sistema de Munsell.

El matiz se representa por un ángulo, en donde el círculo está dividido en 10 diferentes sectores angulares para los tonos: amarillo (Y), rojo (R), púrpura (P), azul (B), verde (G) y las diferentes combinaciones de éstos.

La saturación o croma se incrementa en dirección perpendicular al eje de valor conforme se aleja, con valores de cero a ocho, colocando los colores más saturados (puros) en el extremo más alejado.

El valor representado en el eje vertical del sistema Munsell asume valores que van de cero (negro) a nueve (blanco) pasando por diferentes niveles de tonos de gris, representando la luminosidad o luz percibida.

2.1.3.5 CIE XYZ

La Comisión Internacional de Iluminación CIE (*Commission Internationale de l'Eclairage*) es responsable de la estandarización de los métricos y la terminología en el área de fotometría y colorimetría. En 1931 se definió un sistema de color estandarizado al especificar la fuente de iluminación, el observador y la metrología; utilizados para derivar los valores que describen el color utilizando tres coordenadas para localizar el color en un espacio de color.

El sistema CIE XYZ permite convertir cualquier curva espectral en tres números o valores conocidos como valores triestímulos XYZ para poder identificar cualquier color. Desafortunadamente los valores triestímulos no se pueden utilizar como especificaciones de un color ya que tienen muy poca relación con los atributos visuales. Aun cuando la Y se relaciona con la luminosidad, X y Z no están relacionadas con el matiz y la saturación. En la Figura 2.14 se muestra el espacio de color CIE XYZ y se observa que el matiz (longitudes de onda de 380-700 nm) queda representado en el perímetro del diagrama de color. La saturación se representa como un movimiento que va del blanco interior hacia cualquier punto en el perímetro del diagrama.

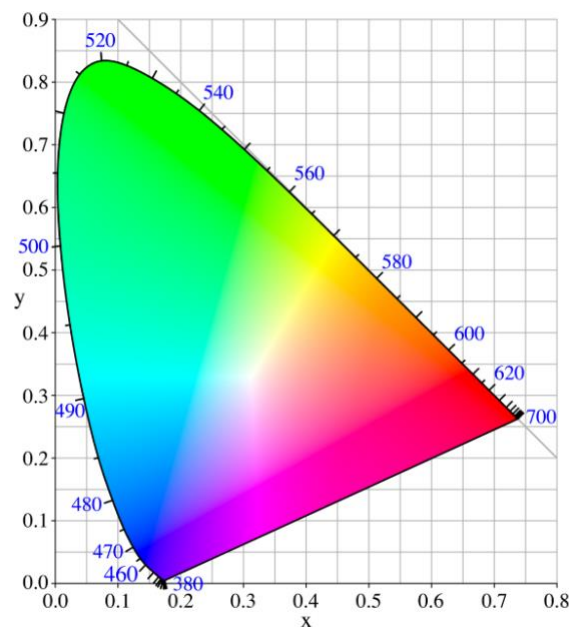


Figura 2.14 Espacio de color CIE XYZ.

2.1.3.6 CIE L*a*b* 1976

Para evitar las limitaciones de saturación del sistema XYZ, se desarrollaron otras alternativas de escalas de color uniformes, una de ellas es el CIE L*a*b* 1976 o CIELAB. Esta escala de color se basa en la teoría de colores opuestos, donde se establece que un color no puede ser verde y rojo al mismo tiempo, ni azul y amarillo,

por lo que se utiliza un solo valor para describir los atributos del rojo/verde y amarillo/azul.

En CIE $L^*a^*b^*$ cuando se expresa un color el valor L^* define la luminosidad, a^* define el valor rojo/verde y b^* el valor amarillo/azul. En la Figura 2.15 se muestra el diagrama del espacio de color CIE $L^*a^*b^*$ donde se observa que al valor a^* y b^* se encuentran en el plano horizontal de la esfera y el valor de L^* se encuentra en el eje central o vertical. Al desplazar los valores de a^* se puede variar de verde a rojo, al desplazar los valores de b^* se puede variar de azul a amarillo y al variar los valores de L^* se puede variar de negro a blanco.

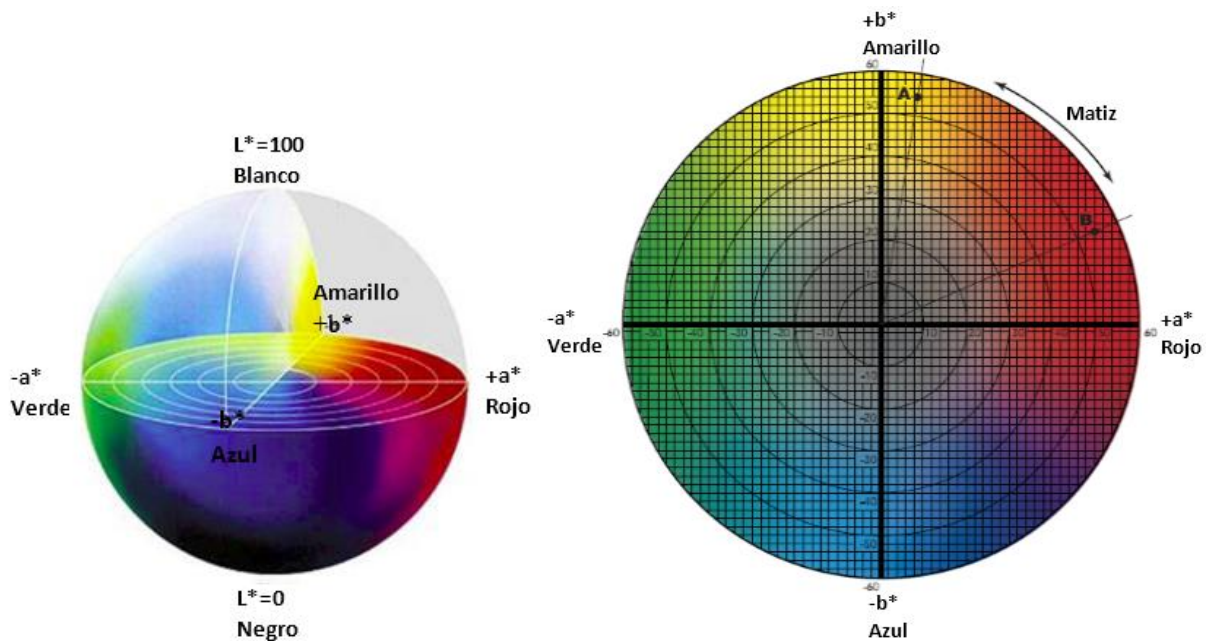


Figura 2.15 Espacio de color CIE $L^*a^*b^*$.

2.1.4 Conversión de modelos de color

Al tener diferentes sistemas de color es importante que se puedan convertir los valores que se tienen entre uno y otro para realizar la conversión según sea necesario, considerando que la mayoría de los sistemas de visión utilizan RGB. A continuación se describe cómo se lleva a cabo la conversión de los modelos de color [80 - 92].

2.1.4.1 RGB a CMY

Para convertir los valores de RGB a CMY se deben de utilizar las ecuaciones (2.1) para obtener el valor del cian, (2.2) para el magenta y (2.3) para el amarillo.

$$C = 255 - R \quad (2.1)$$

$$M = 255 - G \quad (2.2)$$

$$Y = 255 - B \quad (2.3)$$

Cuando se quiere hacer la conversión al modelo CMYK se utilizan las mismas ecuaciones para cian, magenta y amarillo. Para el plano K (negro) se toma el valor mínimo que se obtenga de los resultados, como se expresa en la ecuación (2.4).

$$K = \text{Mínimo}(C, M, Y) \quad (2.4)$$

Si se utilizan los valores normalizados (rango entre 0 y 1) es necesario dividir los valores del RGB o CMY entre 255.

2.1.4.2 RGB a HSL

Para convertir los valores RGB al modelo HSL es necesario primero realizar la normalización para que estén en el rango entre 0 y 1, como se muestra en la ecuación (2.5) para cada color. En donde R' , G' y B' son los valores normalizados.

$$R' = \frac{R}{255} \quad G' = \frac{G}{255} \quad B' = \frac{B}{255} \quad (2.5)$$

Se deben definir los valores mínimo y máximo de RGB, ecuaciones (2.6) y (2.7). En el caso de que sean iguales, indica que no hay saturación, por lo que $H = 0$ y $S = 0$.

$$\min = \text{Mínimo}(R', G', B') \quad (2.6)$$

$$\max = \text{Máximo}(R', G', B') \quad (2.7)$$

En seguida se puede calcular la luminosidad con la ecuación (2.8). Se utilizan los valores calculados anteriormente.

$$L = \frac{\min + \max}{2} \quad (2.8)$$

Para obtener la saturación se debe evaluar la luminosidad calculada, dependiendo si el valor es menor o mayor a 0.5, como se muestra en la ecuación (2.9).

$$S = \begin{cases} \frac{\max - \min}{\max + \min} & \text{Cuando } L \leq 0.5 \\ \frac{\max - \min}{2 - \max - \min} & \text{Cuando } L \geq 0.5 \end{cases} \quad (2.9)$$

El valor del matiz depende de cual de los tres valores normalizados es el mayor y se pueden tener tres expresiones diferentes según se muestra a continuación en la ecuación (2.10). En el caso de que $H < 0$ se le deben de sumar 360° .

$$H = \begin{cases} \left(\frac{G' - B'}{\max - \min} \right) \times 60^\circ & \text{Cuando } R' = \max \\ \left(2 + \frac{B' - R'}{\max - \min} \right) \times 60^\circ & \text{Cuando } G' = \max \\ \left(4 + \frac{R' - G'}{\max - \min} \right) \times 60^\circ & \text{Cuando } B' = \max \end{cases} \quad (2.10)$$

2.1.4.3 RGB a HSV

Para convertir al modelo HSV el proceso es muy similar a la conversión a HSL, la única diferencia es en la saturación y en el valor. Primero es necesario realizar la normalización para que estén en el rango entre 0 y 1, como se mostró en la ecuación

(2.5). Después se determinan los valores mínimo y máximo de RGB, ver ecuaciones (2.6) y (2.7). Al igual que el caso anterior, el matiz depende de cuál de los tres valores normalizados es el mayor y se tienen tres expresiones diferentes según el caso, ver ecuación (2.10). En el caso de que $H < 0$ se le deben de sumar 300° . Con los valores mínimo y máximo se calcula el valor Δ con la ecuación (2.11). El cual se utiliza posteriormente para el cálculo de saturación.

$$\Delta = \max - \min \quad (2.11)$$

Para obtener la saturación se pueden tener dos posibilidades dependiendo del valor obtenido en Δ , como se muestra en la ecuación (2.12). El valor es igual al máximo que se obtiene del RGB normalizado, ecuación (2.13).

$$S = \begin{cases} 0 & \text{Cuando } \Delta = 0 \\ \frac{\Delta}{\max} & \text{Cuando } \Delta \neq 0 \end{cases} \quad (2.12)$$

$$V = \max \quad (2.13)$$

2.1.4.4 RGB a HSI

Para realizar la conversión al modelo HSI existen diferencias en el procedimiento, pero el primer paso es el mismo en donde es necesario realizar la normalización de los valores RGB, ver ecuación (2.5). Para el cálculo de la intensidad se utilizan los valores normalizados, como se muestra en la ecuación (2.14).

$$I = \frac{1}{3}(R' + G' + B') \quad (2.14)$$

La saturación se puede obtener con la ecuación (2.15), en donde se utilizan los valores normalizados y el mínimo del RGB.

$$S = 1 - \frac{3}{(R' + G' + B')} [\min(R', G', B')] \quad (2.15)$$

Para obtener el valor de matiz es necesario obtener primero el ángulo θ con la ecuación (2.16). Para determinar el ángulo correspondiente al plano de matiz se consideran los valores del color verde (G) y azul (B), como se ve en la ecuación (2.17).

$$\theta = \cos^{-1} \left[\frac{\frac{1}{2} [(R' - G') + (R' - B')]}{\sqrt{(R' - G')^2 + (R' - B')(G' - B')}} \right] \quad (2.16)$$

$$H = \begin{cases} \theta & \text{Cuando } B' \leq G' \\ 360 - \theta & \text{Cuando } B' > G' \end{cases} \quad (2.17)$$

2.1.4.5 Representación digital

Los colores normalmente se representan de forma digital con 24 bits de profundidad, utilizando 8 bits para cada plano de color. Para el modelo RGB los valores normalizados de 0 a 1, se representan en la escala de 0 a 255.

Los modelos HSI tienen una representación distinta, la saturación y la intensidad o valor se pueden representar con la escala de 0 a 240. El matiz en teoría se representa con un ángulo entre 0° y 360° , este rango se divide en 12 secciones para tener una mejor representación, ya que cada cambio de matiz importante ocurre cada 30° . El mayor múltiplo de 12 que se encuentra por debajo de 256 es 252, sin embargo, al utilizar el 240 se tienen valores cerrados que permiten tener una representación más simple. Para hacer la conversión de los valores obtenidos con las ecuaciones anteriores se puede utilizar la ecuación (2.18) para hacer la conversión del ángulo de matiz a la representación digital, la ecuación (2.19) para la saturación y la ecuación

(2.20) para la luminosidad o valor. En la Tabla 2.1 se muestran seis colores diferentes y sus equivalentes en RGB normalizado, CMY, HSL, HSV y representación digital.

$$H_{digital} = H \times \frac{2}{3} \quad (2.18)$$

$$S_{digital} = S \times 240 \quad (2.19)$$

$$L_{digital} = L \times 240 \quad (2.20)$$

Tabla 2.1 Representación de color en diferentes modelos de color.

Color	RGB	CMY	HSL	HSV	Representación digital
Rojo	(1, 0, 0)	(0, 1, 1)	(0, 1, 0.5)	(0°, 1, 1)	0
Amarillo	(1, 1, 0)	(0, 0, 1)	(60, 1, 0.5)	(60°, 1, 1)	40
Verde	(0, 1, 0)	(1, 0, 1)	(120, 1, 0.5)	(120°, 1, 1)	80
Cian	(0, 1, 1)	(1, 0, 0)	(180, 1, 0.5)	(180°, 1, 1)	120
Azul	(0, 0, 1)	(1, 1, 0)	(240, 1, 0.5)	(240°, 1, 1)	160
Magenta	(1, 0, 1)	(0, 1, 0)	(300, 1, 0.5)	(300°, 1, 1)	200

2.2 Parámetros de una cámara

Existen algunos parámetros en una cámara que son muy importantes para el procesamiento y análisis de imágenes digitales, por lo cual se deben considerar para configurar el sistema y convertir adecuadamente las unidades de píxel en unidades reales. A continuación se hace una breve descripción de algunos de los conceptos y parámetros más importantes [98], [99].

2.2.1 Sensor de imagen y tamaño de sensor

Un sensor de imagen convierte una imagen en un número discreto de píxeles, el sensor asigna a cada píxel de la imagen una ubicación numérica y un valor de nivel gris o de color que especifica el brillo o el color del píxel. Es importante considerar el

tamaño del sensor de la cámara para poder determinar el campo de visión, el tamaño del área activa del sensor está asociado a la dimensión horizontal del sensor. Existen varios tamaños de sensor estándar como: 1/4", 1/3", 1/2", 2/3" y 1". Es importante notar que no existe una relación directa entre el tamaño del sensor y sus dimensiones reales, solo es la nomenclatura convencional para representar el tamaño.

2.2.2 Distancia focal

Seleccionar una lente para una cámara es una tarea muy importante que permite determinar parámetros como el campo de visión y la distancia de trabajo. Una lente se define principalmente por su distancia focal (f) que consiste en la distancia comprendida entre el plano principal de la lente y el foco (F) de la misma. El foco es el punto donde se intersectan los rayos refractados por la lente, provenientes de un objeto situado en infinito. En la Figura 2.16 se observa como los rayos provenientes de un objeto lejano que inciden en la lente paralelos al eje óptico, son refractados intersectando el eje óptico en un punto común denominado el foco (F) de la lente.

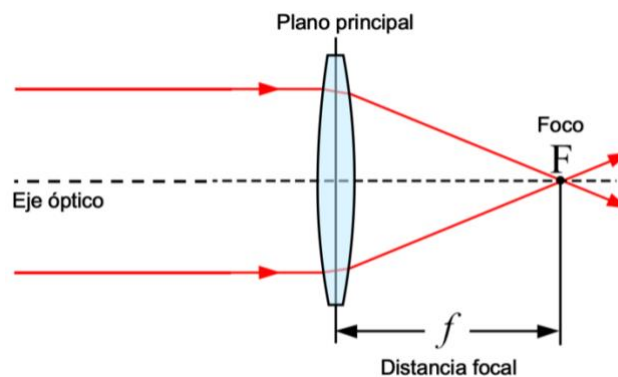


Figura 2.16 Distancia focal de una lente.

2.2.3 Campo de visión

El campo de visión (FOV) es el área de una superficie que una cámara puede observar, el cual está relacionado con la distancia focal (f), la distancia de trabajo (WD) y el tamaño de sensor. La distancia de trabajo (WD) es la distancia que hay

desde el frente de la lente de la cámara hasta la superficie bajo inspección. A partir de la ecuación (2.21) de distancia focal (f), se puede obtener el campo de visión (FOV) de la cámara (ecuación 2.22), conociendo la distancia de trabajo (WD), la distancia focal (f), y el tamaño del sensor (dimensión horizontal o vertical).

$$f = \frac{\text{Tamaño del sensor} \times WD}{FOV + \text{Tamaño de sensor}} \quad (2.21)$$

$$FOV = \frac{\text{Tamaño de sensor} \times WD}{f} - \text{Tamaño de sensor} \quad (2.22)$$

También se puede calcular el ángulo de visión ($AFOV$) con la ecuación (2.23), el cual representa una medida angular del área que la superficie puede observar.

$$AFOV(^{\circ}) = 2 \times \tan^{-1} \left(\frac{FOV \text{ horizontal}}{2 \times WD} \right) \quad (2.23)$$

En la Figura 2.17 se puede observar la representación gráfica de la distancia de trabajo, campo de visión y ángulo de visión.

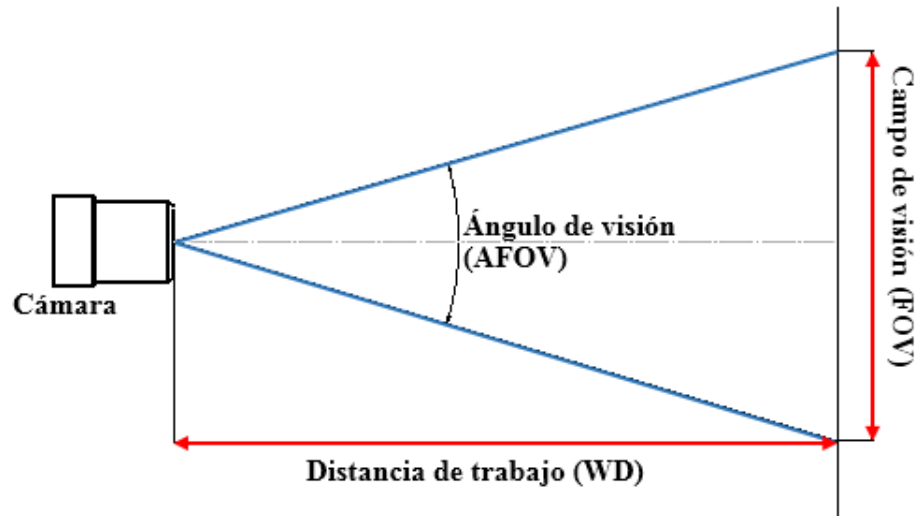


Figura 2.17 Parámetros de la cámara.

2.2.4 Profundidad de campo

Otro concepto que se debe mencionar es la profundidad de campo de una lente, que consiste en la capacidad de mantener enfocada adecuadamente la imagen de objetos ubicados en diferentes planos. En la Figura 2.18 se muestra un ejemplo gráfico de una reducida profundidad de campo. La profundidad de campo corresponde a las diferentes distancias en las que la lente de la cámara logra enfocar de manera nítida un objeto.

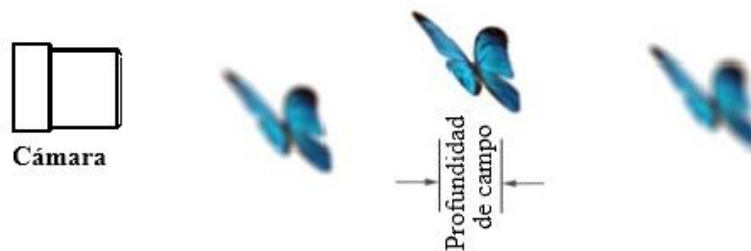


Figura 2.18 Profundidad de campo reducida.

2.2.5 Resolución

La resolución es la capacidad de una cámara para observar los detalles o características de un objeto, es decir es el tamaño mínimo que la cámara puede reproducir de los detalles de un objeto. Para poder distinguir detalles pequeños de un objeto en una imagen es necesario que estos detalles tengan una distancia o espacio de al menos un píxel entre ellos en el sensor de imagen, esta distancia mínima es la resolución del sistema. Si una cámara tiene baja resolución es imposible observar todos los detalles y la imagen pierde nitidez, pero si cuenta con una alta resolución puede observar una imagen con una mayor cantidad de detalles y por lo tanto, con una mayor nitidez.

La resolución del sensor de la cámara está asociada con el tamaño de sus píxeles y con el número de ellos. Normalmente la resolución se expresa con el término de líneas por milímetro (lp/mm) y se puede calcular con la ecuación (2.24).

$$\text{Resolución del sensor} = \frac{1000 \text{ lp/mm}}{2 \times \text{Tamaño del pixel}(\mu\text{m})} \quad (2.24)$$

2.3 Procesamiento de imágenes

En este trabajo de tesis el procesamiento y análisis de imágenes fue una tarea de gran importancia. El procesamiento de imágenes se enfoca en aplicar diferentes tipos de operaciones o funciones a una imagen digital de entrada y transformarla en una imagen de salida mediante medios electrónicos, mientras que el análisis de imágenes se enfoca en estudiar o inspeccionar las características de una imagen digital de entrada y obtener diferentes mediciones de las propiedades de la imagen.

A continuación se presentan algunos de los conceptos más importantes en el procesamiento de imágenes [100]–[102].

2.3.1 Imagen digital

Una imagen es un arreglo bidimensional (2-D) de valores reales que representan la intensidad o brillo en una determinada posición de coordenadas espaciales (x, y) . En el procesamiento de imágenes, una imagen digital se representa como una función de la intensidad de la luz $f(x, y)$, donde f representa la intensidad de un punto (x, y) y a las coordenadas espaciales x y y se les llama píxeles.

Por convención el píxel con coordenadas espaciales $(0,0)$ se encuentra colocado en la esquina superior izquierda de una imagen como se muestra en la Figura 2.19, el valor de las coordenadas en x se incrementa de izquierda a derecha y el valor de las coordenadas de y se incrementa de arriba hacia abajo. Una imagen digital tiene tres propiedades básicas: resolución espacial, definición y número de planos.

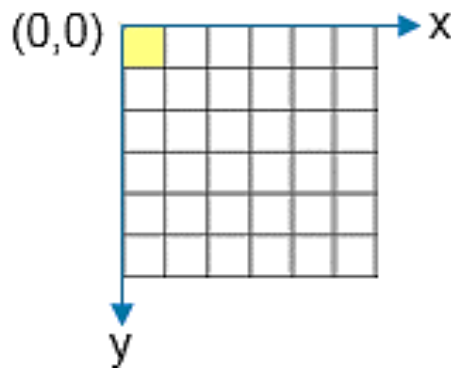


Figura 2.19 Imagen digital.

La resolución espacial de una imagen se define como el número de columnas de píxeles (x) y de renglones de píxeles (y) que se tienen en la imagen. Si una imagen tiene M columnas de píxeles y tiene N renglones de píxeles, se tiene una imagen con resolución $M \times N$. En la Tabla 2.2 se muestran los valores que se observan usualmente en la resolución de una imagen.

Tabla 2.2 Valores típicos en la resolución espacial.

Parámetro	Símbolo	Valores típicos
Columnas	M	256, 320, 512, 640, 768, 1024, 1920
Renglones	N	240, 256, 480, 512, 525, 625, 1024, 1080

La definición de una imagen indica el número de sombras o niveles de gris que se pueden observar en una imagen como se muestra en la Figura 2.20, también se puede definir como el brillo de un píxel. La profundidad de bit de una imagen es el número de bits que se utilizan para codificar el valor de un píxel, en una imagen con profundidad de bit n se tiene una definición de 2^n , lo cual quiere decir que un píxel puede tener 2^n valores diferentes. En la Tabla 2.3 se muestran los valores que se observan usualmente en la definición de una imagen, sin embargo una imagen puede ser codificada de diferente manera dependiendo de la naturaleza del instrumento de adquisición, el tipo de procesamiento o análisis requerido.



Figura 2.20 Diferentes niveles de gris en una imagen.

Tabla 2.3 Valores típicos en la definición de una imagen.

Profundidad de bit (n)	Definición de imagen (2^n)
1 bit	2
8 bits	256
10 bits	1,024
12 bits	4,096
14 bits	16,384
16 bits	65,536
24 bits	16,777,216

El número de planos de una imagen se refiere a la cantidad de arreglos de píxeles que conforman una imagen. En las imágenes en escala de grises se compone por un solo plano (un solo arreglo de píxeles) y una imagen de color está compuesta por tres planos (tres arreglos de píxeles). En las imágenes de color el valor de intensidad de un píxel se codifica con tres valores diferentes que corresponden a las componentes roja, verde y azul en una imagen RGB o a las componentes de matiz (*Hue*), saturación (*Saturation*) y luminosidad (*Luminosity*) en una imagen HSL.

2.3.1.1 Tipos de imágenes

Existen diferentes tipos de imágenes como: binaria, escala de grises, color y compleja. El tipo de imagen está relacionado con el número de planos de la misma y esto depende de la cámara que se utilice para la adquisición, así como del procesamiento necesario. A continuación, se hace una descripción general de los diferentes tipos de imágenes.

Una imagen binaria está compuesta por un solo plano, por lo que en este tipo de imágenes cada píxel tiene asociados 2 valores posibles (0 y 1), por lo que la imagen se observa en blanco y negro.

Una imagen a escala de grises también está compuesta por un solo plano, por lo tanto, cada píxel tiene asociado un solo valor dependiendo de la profundidad de bit de la imagen. Por ejemplo, una imagen de 8 bits puede tener 256 tonos de grises diferentes. En el software LabVIEW® se puede trabajar con imágenes a escala de grises de 8 bits, 16 bits y de punto flotante con precisión sencilla (32 bits), pero las imágenes binarias no son soportadas convirtiéndolas a imágenes en escala de grises de 8 bits.

Una imagen de color está compuesta por tres planos y puede ser codificada como RGB o HSL. Los píxeles de la imagen están asociados a tres valores diferentes correspondientes a cada plano de color y al combinar estos tres valores se puede obtener la imagen de color. En el software LabVIEW® se puede almacenar la información de color de una imagen utilizando 8 bits para cada uno de los planos RGB o HSL, también se tiene la opción de almacenar la información de color utilizando 16 bits para cada plano de color.

Una imagen compleja contiene la información de frecuencia de una escala de grises, este tipo de imágenes se pueden obtener aplicando la transformada rápida de Fourier a una imagen a escala de grises. Este tipo de imágenes se codifican utilizando dos valores de punto flotante con precisión sencilla, que representan la componente real e imaginaria de cada píxel.

2.3.2 Funciones para procesamiento de imágenes

Como se mencionó anteriormente el procesamiento de imágenes transforma electrónicamente una imagen de entrada en una imagen de salida manipulando los píxeles de la imagen con el fin de mejorar su calidad para una aplicación específica. A continuación se hace una breve descripción de algunas de las herramientas más importantes, utilizadas en este trabajo [102].

2.3.2.1 Funciones básicas

Algunos de los conceptos básicos y herramientas que se utilizan frecuentemente en el procesamiento o análisis de imágenes se describen a continuación.

Una máscara es una imagen binaria que permite aislar regiones de una imagen para el procesamiento o análisis de la misma. Con una máscara se determina cuáles píxeles de la imagen serán procesados. Si un píxel en la máscara tiene un valor de 1 entonces el píxel correspondiente de la imagen bajo inspección será procesado, y si tiene un valor de 0 el píxel no será procesado. La máscara debe ser del mismo tamaño o más pequeña que la imagen que se está procesando. El utilizar una máscara puede simplificar y acelerar el procesamiento o análisis de una imagen. En la Figura 2.21 se muestra un ejemplo de una máscara, la cual al aplicarse a una imagen permitirá que se procese solo la región de la imagen que se encuentre dentro del círculo.

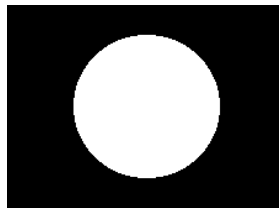


Figura 2.21 Máscara.

Una región de interés o ROI se puede describir como una sub imagen ya que es un área o región determinada de una imagen en donde se desea realizar el procesamiento o análisis. Es posible seleccionar múltiples regiones de interés en una misma imagen y de esta forma realizar diferente procesamiento o análisis en estas regiones. En la Figura 2.22 se muestra un ejemplo de la ROI de una imagen.

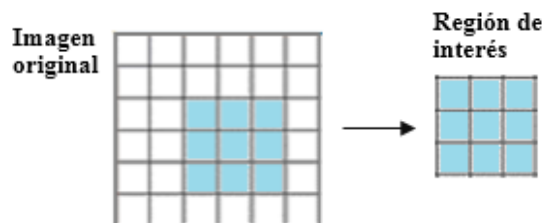


Figura 2.22 Región de interés.

Vecindario o píxeles vecinos es un término importante en el procesamiento de imágenes. Un píxel vecino es aquel cuyo valor afecta a otro píxel cercano durante el procesamiento de una imagen, los píxeles vecinos son los píxeles adyacentes al píxel que se esté procesando.

La extracción de planos de color de una imagen permite obtener cada uno de los planos de color de una imagen (RGB o HSL), obteniendo tres imágenes diferentes en escala de grises. Al extraer los planos de color se puede facilitar el procesamiento de una imagen ya que se pueden utilizar funciones o filtros que solo se pueden aplicar a imágenes en escala de grises. En la Figura 2.23 se muestra un ejemplo de la extracción de los planos de color de una imagen RGB.

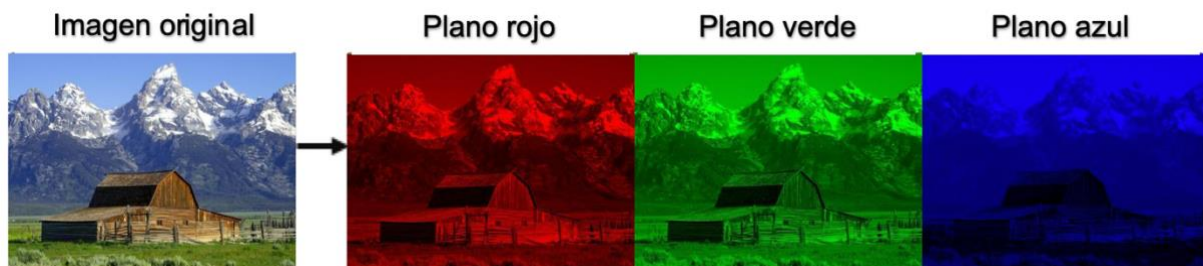


Figura 2.23 Extracción de planos de color.

La función de ecualización modifica los valores de la escala de grises de los píxeles de una imagen, para que se distribuyan uniformemente los valores en un rango determinado (dependiendo de la profundidad de bit). Esta función se utiliza para tener un mayor contraste en una imagen donde no se utilizan todos los niveles de gris y extender la información del histograma de una imagen que pueda estar contenida solo en algunas regiones.

2.3.2.2 Funciones de morfología

Las funciones morfológicas extraen y alteran la estructura de partículas presentes en una imagen, con ellas se compara un píxel con los píxeles que lo rodean. Estas funciones se utilizan para filtrar o suavizar la imagen, reducir el ruido y eliminar variaciones presentes.

La función de erosión reduce la intensidad de los píxeles que se encuentran rodeados por píxeles vecinos con menor intensidad.

La función de dilatación incrementa la intensidad de los píxeles que se encuentran rodeados por vecinos con mayor intensidad. Estas funciones pueden alterar de manera importante la imagen. La función de dilatación y erosión tienen el efecto opuesto en una imagen, ya que al dilatar las regiones brillantes las regiones oscuras de la imagen son erosionadas.

La función de apertura consiste en una erosión seguida por una dilatación, la cual elimina puntos brillantes aislados en zonas oscuras y suaviza los límites sin alterar significativamente la imagen.

La función de clausura consiste en una dilatación seguida por una erosión, la cual elimina puntos oscuros aislados en zonas brillantes y suaviza los límites sin alterar el área de la imagen de forma significativa.

La función de apertura apropiada realiza una apertura y después una clausura, al igual que la apertura elimina puntos brillantes aislados pero el suavizado se hace en los límites de las regiones brillantes.

La función de clausura apropiada realiza una clausura y una apertura, al igual que la clausura elimina puntos oscuros aislados pero el suavizado se hace en los límites de las regiones oscuras.

La función de mediana automática genera partículas más simples que tengan menos detalles utilizando una combinación de aperturas y clausuras.

2.3.2.3 Filtros espaciales

Filtrar una imagen en escala de grises permite mejorar la calidad de la imagen para que cumpla con los requerimientos de la aplicación. Se pueden utilizar filtros para

suavizar la imagen, eliminar ruido, mejorar la información de borde, etc. A continuación se describen brevemente los filtros relevantes para este trabajo [102].

Filtro de suavizado de convolución es un filtro de promediado que atenúa las variaciones de intensidad en los píxeles vecinos. Este filtro suaviza la forma de los objetos, difumina los bordes y elimina detalles de la imagen.

El filtro de orden N asigna a cada píxel el enésimo valor del vecindario (cuando se sortean de orden ascendente). El valor N especifica el orden del filtro, el cual se usa para moderar el efecto del filtro en la intensidad de la imagen. Un orden más bajo corresponde a una imagen transformada más oscura, un orden más alto corresponde a una imagen transformada más brillante.

El filtro pasa bajo calcula la variación entre el píxel que se está procesando y los píxeles que lo rodean. Si el píxel que se está procesando tiene una variación mayor a un porcentaje determinado, se cambia el valor del píxel a un promedio calculado de los píxeles vecinos. Para este filtro se selecciona un porcentaje de variación máxima y se debe aplicar una máscara de la imagen original en caso de que no se vaya a procesar la imagen completa.

Existen algunos otros filtros que permiten realizar efectos similares como el promediado y el Gaussiano que se conoce también como de suavizado, los cuales permiten eliminar o reducir el ruido de las imágenes entre los píxeles. El Laplaciano permite detectar áreas en donde ocurren cambios rápidos entre los píxeles. Prewitt y Sobel permiten detectar bordes.

2.3.3 Análisis de imágenes

El análisis de imágenes se basa en utilizar diferentes técnicas de medición y estadística por computadora considerando los valores de intensidad de los píxeles. El análisis se realiza para estudiar detalladamente la información o contenido de la

imagen y así determinar qué herramientas se utilizarán en la aplicación que se desarrolle.

2.4 Fusión de imágenes

El objetivo principal de la fusión es combinar información de múltiples imágenes, ya sea complementaria o redundante, con el fin de crear una imagen combinada que proporcione una descripción más completa. Existen algunos requerimientos para realizar la fusión: es necesario que preserve la información relevante de la imagen de referencia, que no introduzca o genere inconsistencias en la imagen y que las características irrelevantes o ruido sean reducidas lo mayormente posible [103]–[107].

La fusión facilita la observación y análisis de las imágenes, mejorando también el procesamiento por computadora. Algunas de las ventajas de utilizar estas técnicas son que permite mejorar la calidad de la imagen, eliminar el ruido, resaltar características importantes, optimizar la clasificación de atributos, fusionar imágenes de múltiple enfoque y otras.

En general las técnicas de fusión se pueden clasificar en tres grupos diferentes, dependiendo del nivel al que se realiza el procedimiento, pueden ser a nivel píxel, característica y bloque o región.

Las técnicas a nivel píxel son las más sencillas, ya que la fusión se realiza en el nivel más bajo. Aquí se pueden combinar los valores e intensidades de dos imágenes de entrada y basándose en sus promedios obtener una imagen resultante. El proceso se realiza en los píxeles de la imagen, reteniendo la mayor cantidad de información de la imagen original posible. Comparado con los otros métodos puede dar resultados más exactos.

A nivel característica se realiza la fusión tomando en cuenta propiedades que en una de las imágenes originales pueden estar distorsionadas y en otras no. En estas técnicas se pueden extraer fácilmente características individuales de dos imágenes

similares y los algoritmos de fusión pueden generar una imagen mejorada con la extracción de las características. Al tener menos información son fáciles de comprimir y transmitir, además de que permite seleccionar los mejores atributos de diferentes imágenes.

Las técnicas de bloque son el nivel más alto de fusión que se puede realizar. La fusión se realiza de acuerdo a los bloques de píxeles en la imagen, de los que se puede extraer información a nivel píxel o característica para alcanzar un resultado óptimo, dando como resultado información menos redundante [104].

Existen diferentes métodos de fusión de imágenes, que además del nivel al que realizan la fusión, normalmente se pueden dividir en dos grupos principales: espaciales y dominio de frecuencia. Los métodos espaciales trabajan directamente con los valores de los píxeles de la imagen sin necesitar una conversión de los datos, algunos de los algoritmos más conocidos son el método del máximo simple, mínimo simple, promediado simple y promediado con pesos. En los métodos en el dominio de la frecuencia es necesario transformar la imagen al dominio de frecuencia y después llevar a cabo la fusión, el algoritmo más conocido es la transformada discreta de Wavelet (DWT) y piramidal. A continuación se hace una descripción de algunas de las técnicas de fusión más utilizadas [98]–[108].

2.4.1 Métodos espaciales

Estos algoritmos de fusión consideran los valores individuales de los píxeles y utilizan algún método para combinar directamente cada uno. A continuación se hace una descripción de estas técnicas de fusión y se describen sus características.

El método del máximo simple selecciona el valor de intensidad más elevado entre los píxeles correspondientes de las dos imágenes y lo asigna a la imagen fusionada. Es un método muy simple, pero puede generar imágenes resultantes que estén

difuminadas. La ecuación (2.25) describe este algoritmo, en donde $A(i, j)$ y $B(i, j)$ son las imágenes iniciales y $F(i, j)$ es la imagen fusionada.

$$F(i, j) = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n \max \{A(i, j), B(i, j)\} \quad (2.25)$$

El método del mínimo simple selecciona el valor de intensidad más bajo entre los píxeles correspondientes de las dos imágenes y lo asigna a la imagen fusionada. La ecuación (2.26) describe este algoritmo, en donde $A(i, j)$ y $B(i, j)$ son las imágenes iniciales y $F(i, j)$ es la imagen fusionada.

$$F(i, j) = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n \min \{A(i, j), B(i, j)\} \quad (2.26)$$

El método del promediado simple obtiene el valor de intensidad promediado entre los píxeles correspondientes de las dos imágenes y lo asigna a la imagen fusionada. La ecuación (2.27) describe este algoritmo, en donde $A(i, j)$ y $B(i, j)$ son las imágenes iniciales y $F(i, j)$ es la imagen fusionada. Al igual que en los casos anteriores es un algoritmo muy sencillo sin embargo, el resultado frecuentemente no tiene buena definición.

$$F(i, j) = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n \frac{A(i, j) + B(i, j)}{2} \quad (2.27)$$

El método del promediado con pesos obtiene el valor de intensidad promediado entre los píxeles correspondientes de las dos imágenes según el factor de peso asignado a cada imagen para obtener la imagen fusionada. El peso determina la cantidad de información que se tomará de cada una de las imágenes de entrada. La ecuación (2.28) describe este algoritmo, en donde $A(i, j)$ y $B(i, j)$ son las imágenes iniciales, $F(i, j)$ es la imagen fusionada y w es el factor de peso.

$$F(i, j) = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n wA(i, j) + (1 - w)B(i, j) \quad (2.28)$$

2.4.2 Métodos en dominio de frecuencia

En estos algoritmos la imagen se descompone en un conjunto de imágenes componentes en diferentes bandas de frecuencia. Las muestras individuales de la imagen componente representan patrones de información que han sido apropiadamente localizados, mientras que los diferentes conjuntos de bandas filtradas representan información fina o a escala de la imagen. La importancia de poder analizar las imágenes en diferentes niveles es porque se tienen objetos de diferentes tamaños que contienen diferentes características y que se pueden encontrar a diferentes distancias del observador, por lo que si el análisis se hace en una sola escala se pueden perder detalles que se encuentren en una escala distinta

La técnica piramidal crea una estructura de pirámide en la que la imagen se descompone en diferentes niveles para realizar la convolución en una representación reducida de la imagen. La estructura consiste en una secuencia de copias de la imagen original en las que la densidad de muestreo y resolución se reducen en pasos discretos, como se ve en la Figura 2.24. Cada imagen es descompuesta en diferentes niveles y se aplica la transformada inversa piramidal, la fusión se realiza en cada nivel.

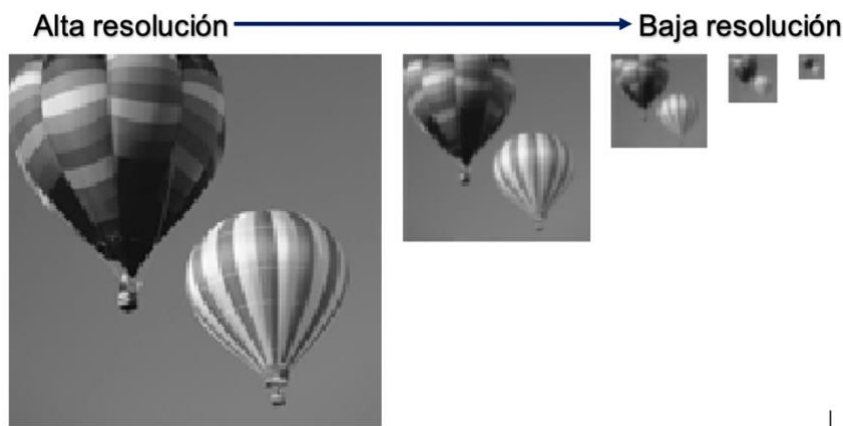


Figura 2.24 Descomposición piramidal.

La transformada discreta de wavelet (DWT) convierte la imagen del dominio espacial al dominio de frecuencia, se utiliza en lugar de la transformada de Fourier ya que permite obtener alta resolución tanto en el dominio de la frecuencia como en el dominio del tiempo. Esta herramienta permite descomponer la imagen en diferentes niveles con bandas de diferentes frecuencias para representar las características de la imagen, como se ve en la Figura 2.25. Al hacer la descomposición se pueden separar los detalles dependiendo de los niveles utilizados.

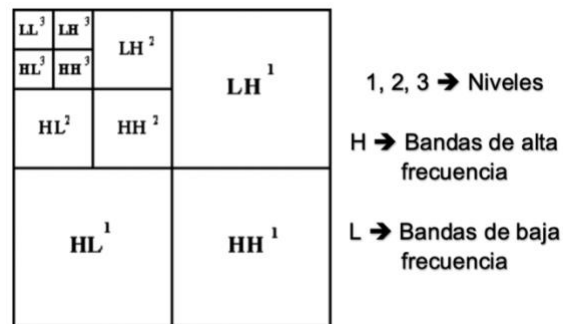


Figura 2.25 Descomposición wavelet.

Las imágenes de entrada se descomponen en coeficientes informativos utilizando DWT en un nivel específico y se utiliza un algoritmo de fusión para combinar los coeficientes, el más utilizado es el método máximo ya que es el más simple. Por último, la imagen fusionada se obtiene por medio de la transformada inversa de wavelet, en la Figura 2.26 se muestra la fusión de imagen con DWT. Aunque con este algoritmo se tiene menos ruido al realizar la fusión y permite obtener más detalles, también se tiene menor resolución espacial que con otros.

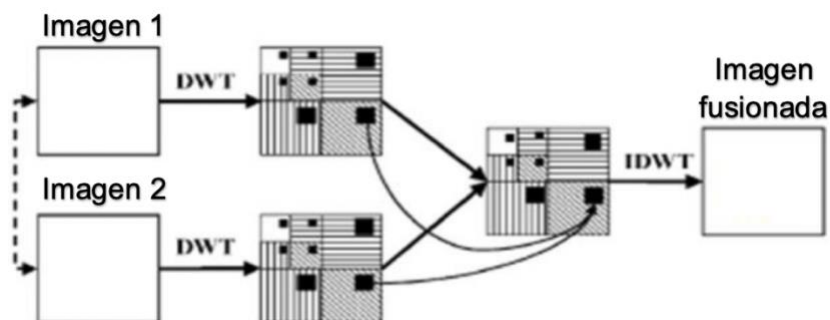


Figura 2.26 Fusión con transformada de wavelet.

Existen otros algoritmos de fusión que pueden utilizar otras transformadas, sin embargo, estos dos son los más utilizados. Como se puede observar ambos son muy similares al utilizar la descomposición en niveles de la imagen por medio de una transformada, se realiza la fusión con las técnicas del dominio espacial y para obtener la imagen fusionada se utiliza una transformada inversa.

Al utilizar las técnicas de proyección de franjas para obtener la reconstrucción tridimensional de un objeto suelen presentarse sombras en la adquisición de imágenes, lo cual impide la obtención de información de la superficie en estas regiones. Algunos autores han buscado como reducir este error que se presenta y mejorar los resultados finales. Uno de los métodos utilizados es la fusión de imágenes, capturando una imagen de diferentes regiones del objeto y combinando estos resultados en uno solo que contenga una mejor representación de la superficie [114].

Este capítulo presenta información relevante para el desarrollo de la tesis y que se menciona en las diferentes etapas descritas a lo largo del trabajo. En el siguiente capítulo se describe la técnica de reconstrucción que se propuso utilizando una configuración ortogonal y el análisis de franjas de color, también se presentan las etapas en las que se desarrolló el trabajo.

CAPÍTULO III

TÉCNICA PROPUESTA

En este capítulo se hace una descripción de la técnica de reconstrucción desarrollada, se muestra la configuración del sistema y las etapas en las que se trabajó durante el diseño. En las diferentes etapas se hace una descripción de las actividades realizadas y del procedimiento para obtener la reconstrucción tridimensional.

3.1 Descripción de la técnica de reconstrucción

En este trabajo de investigación se desarrolló una técnica para la reconstrucción tridimensional de objetos basada en la proyección ortogonal de franjas de color, diferente a lo que se encontró en la literatura, utilizando una configuración en la que la cámara y proyector están en dirección ortogonal y el análisis esta basado en la identificación directa del color proyectado para obtener la topografía.

Al estudiar las diferentes técnicas de proyección de luz estructurada utilizadas para la reconstrucción tridimensional se observó que la mayoría utilizan configuraciones similares en las que el ángulo entre la cámara y proyector tiende a ser pequeño como se mencionó anteriormente. En estos sistemas se requieren técnicas de análisis que pueden ser difíciles de implementar en un software de reconstrucción y en los que además es necesario utilizar métodos de análisis de la configuración para convertir los resultados a unidades reales de la superficie, los cuales requieren de una calibración estricta en el ángulo que existe entre la cámara y proyector. En este capítulo se presenta el desarrollo de una nueva técnica de reconstrucción tridimensional de objetos, más sencilla y fácil de implementar.

De manera general, la técnica de reconstrucción propuesta funciona de la siguiente manera: Se genera un patrón de franjas de color en el que cada color está codificado

o asociado a un valor de altura predeterminado, se proyecta este patrón de franjas sobre el objeto y se captura la imagen de la proyección con una cámara de color. Para obtener la superficie completa se implementó el uso de una montura rotatoria que gira el objeto según sea necesario para obtener más información de la topografía. Después se procesan las imágenes adquiridas y se analiza el color de cada píxel para determinar la franja que se detectó, asociar el valor de altura correspondiente y así obtener las alturas reales de toda la superficie del objeto. El análisis es muy sencillo ya que se establece una relación directa entre cada franja de color proyectado con un valor de altura real que fue predeterminado durante el proceso de calibración del sistema.

En la Figura 3.1 se observa el diseño de la técnica de reconstrucción tridimensional propuesta con la configuración ortogonal y proyección de franjas de color.

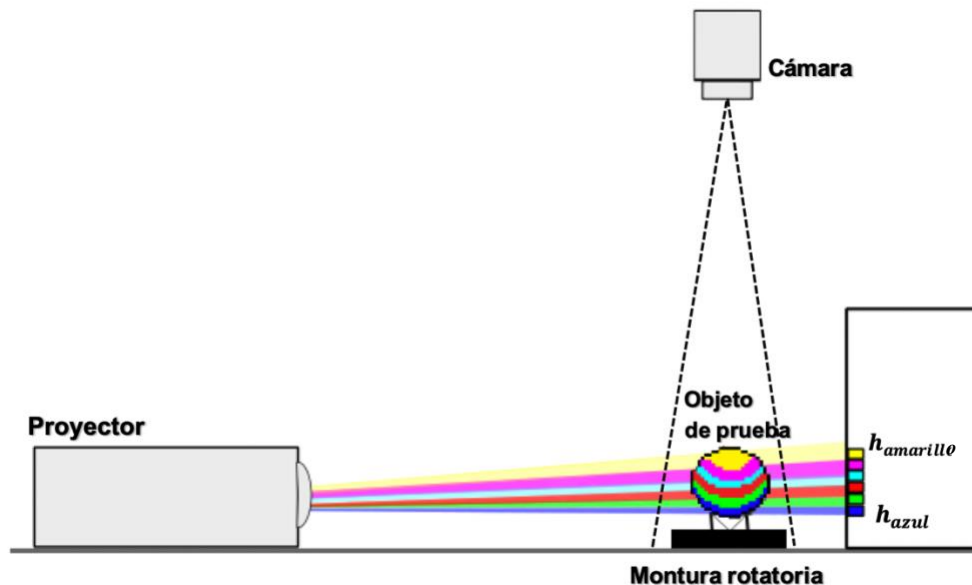


Figura 3.1 Sistema de reconstrucción tridimensional propuesto.

Primero se estableció la configuración, en la que el eje óptico del proyector se coloca en dirección ortogonal al eje de la cámara, la cual se ubica arriba del objeto. En el software de programación LabVIEW® se proyectan franjas de color sobre el objeto, con la cámara se capturan imágenes del patrón proyectado y se gira el objeto para

repetir el procedimiento. El número de giros depende del tamaño del objeto y de su forma, permitiendo reducir oclusiones que pueden presentarse por la misma configuración. Después se realiza el procesamiento de las imágenes adquiridas para mejorar su calidad y tener un mejor desempeño en la etapa de identificación. Durante el análisis se identifica el color en cada píxel de la imagen y se establece una relación directa con el valor de altura determinado. Una vez que se tiene un valor de altura en cada píxel se obtiene un mapa de altura para cada región del objeto obtenida durante los giros realizados con la montura. Al tener múltiples resultados es necesario llevar a cabo una etapa de fusión que permite unir los mapas obtenidos durante los giros y obtener uno solo que contenga toda la información de la superficie. Al tener los valores de altura reales para cada punto del objeto se logró obtener la reconstrucción tridimensional de la superficie completa.

A continuación se describen las etapas que se siguieron para llevar a cabo la reconstrucción del objeto y las actividades que se realizaron en cada paso de forma general. En capítulos posteriores se tiene una descripción más detallada.

3.1.2 Proceso para la reconstrucción tridimensional

En la Figura 3.2 se muestra un diagrama del proceso para obtener la reconstrucción tridimensional del objeto.

En la primera etapa se estableció la configuración adecuada, considerando los parámetros de la cámara, proyector, montura rotatoria, controlador y objeto a reconstruir. También se consideró el área de trabajo y limitantes del sistema propuesto. Durante esta etapa se probaron diferentes variantes de la configuración que permitieran obtener la reconstrucción completa de la superficie y se identificó la más adecuada. El número de giros del objeto realizados con la montura rotatoria puede ser modificado por el usuario del sistema, sin embargo, de forma óptima se utilizan seis giros que permitan observar la superficie completa de diferentes objetos.

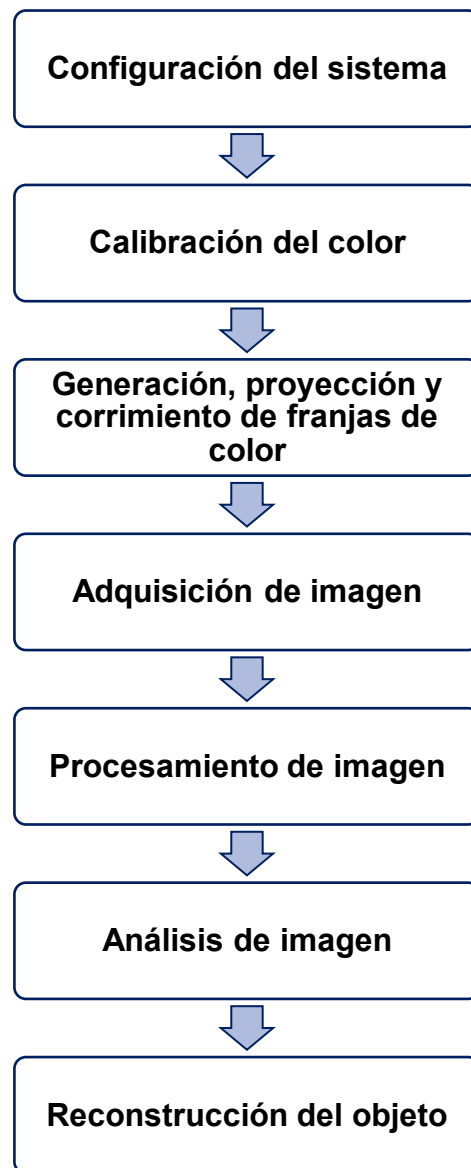


Figura 3.2 Proceso para la reconstrucción tridimensional.

En la segunda etapa se llevó a cabo una calibración del color para realizar correcciones en el matiz que se genera, proyecta y captura. Durante esta etapa fue necesario caracterizar el proyector utilizado para poder observar su respuesta a diferentes colores y después implementar una calibración de las imágenes capturadas. Esta etapa es muy importante para tener una buena identificación del color, ya que las características del proyector, sensibilidad de la cámara y cruce de color pueden alterar los resultados.

En la tercera etapa se desarrolló un software para la generación del patrón de franjas de color. Después se lleva a cabo la proyección sobre la superficie y el barrido del patrón de luz estructurada sobre el objeto. Se realizaron proyecciones de franjas de color sobre superficies con diferentes geometrías para observar las limitantes del sistema.

En la cuarta etapa se realizó la adquisición de imágenes del patrón proyectado sobre diferentes objetos. Esta etapa y la anterior se deben de repetir en cada giro que se haga con la montura. Durante estas etapas fue importante establecer la comunicación con el controlador para llevar a cabo la rotación del objeto.

En la quinta etapa se realizó un procesamiento a la imagen adquirida para reducir su tamaño, eliminar variaciones presentes y mejorar la calidad del color en los píxeles de la imagen correspondientes a las franjas proyectadas sobre el objeto. Al tener todas las imágenes se implementa la corrección del color, considerando los resultados obtenidos durante la etapa de calibración. Es muy importante llevar a cabo un procesamiento de las imágenes para tener una mejor identificación del color.

En la sexta etapa se analizaron los píxeles de las imágenes procesadas determinando el color en cada uno de ellos. Se compararon diferentes métodos para la identificación de color y se seleccionó el más eficiente. Después se estableció un valor de altura para cada franja y se asignó a cada píxel de la imagen, según el matiz que haya sido identificado, creando un mapa de altura. Durante esta etapa se realizó una calibración que permitiera asociar una pendiente de valores a cada color por la divergencia del proyector y así modificar la altura asociada dependiendo de la distancia a la que se encuentra el proyector del píxel que se analiza.

En la séptima etapa se realizó un filtrado del mapa de altura para eliminar errores presentes al tener variaciones en la identificación de color de los píxeles. Al tener múltiples mapas de altura por la montura rotatoria, fue necesario trabajar en un algoritmo de fusión que permitiera unir todos los mapas resultantes en uno solo que contenga toda la información de la superficie. Se probaron diferentes algoritmos,

proponiendo uno que permitió obtener mejores resultados y que disminuyó el ruido que se formaba con otros algoritmos. Después se convirtió el mapa de altura fusionado en una gráfica tridimensional del objeto.

Cada una de estas etapas fue indispensable para el desarrollo de la técnica propuesta, se realizaron diferentes pruebas durante cada una de ellas y se obtuvieron los resultados finales para llevar a cabo la evaluación del desempeño del sistema desarrollado. A continuación se hace una descripción más detallada del trabajo realizado en cada una de las etapas, iniciando con la configuración del sistema que se describe en el siguiente capítulo.

CAPÍTULO IV

CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA

En este capítulo se hace una descripción de la configuración del sistema, de las especificaciones del equipo utilizado y de los parámetros calculados que son relevantes para el desarrollo de la técnica.

4.1 Equipo

Para el desarrollo de la técnica es necesario contar con al menos un proyector digital que tenga un rango amplio de color para que se pueda hacer una reproducción cercana al matiz que idealmente se debe proyectar, una cámara digital de color para la etapa de captura y una lente para enfocar la imagen en el sensor de la cámara. A continuación, se hace una descripción de las especificaciones del equipo utilizado en el sistema desarrollado.

4.1.1 Proyector

Para la proyección de los patrones de luz estructurada se utilizó un proyector Acer K335, mostrado en la Figura 4.1. Algunas de las ventajas de este proyector es que utiliza una fuente de iluminación LED, cuenta con mayor fidelidad y rendimiento del color, tiene una resolución máxima de 1920 x 1080 y admite colores de 30 bits.



Figura 4.1 Proyector Acer K335.

Dentro de las especificaciones del proyector se sugiere que éste se debe colocar a una distancia mínima de 91 cm de la pantalla de proyección garantizando un área de proyección de 64 x 40 cm. Dado el interés en desarrollar un sistema lo más compacto posible, el proyector se colocó a una distancia de 42.5 cm del eje óptico de la cámara e incluso se observó que es capaz de enfocar nítidamente una imagen a una distancia mínima de 23 cm.

En Figura 4.2 se muestra la distancia a la cual se colocó el proyector y su área de proyección respectiva en una pantalla de referencia. Se colocó una pantalla de proyección a una distancia de 44 cm del proyector y en ella se observó un área de proyección de 20 x 32 cm, 5 cm por encima de la base del montaje. El enfoque del proyector se ajustó a 42.5 cm que corresponde a la posición del objeto por reconstruir.

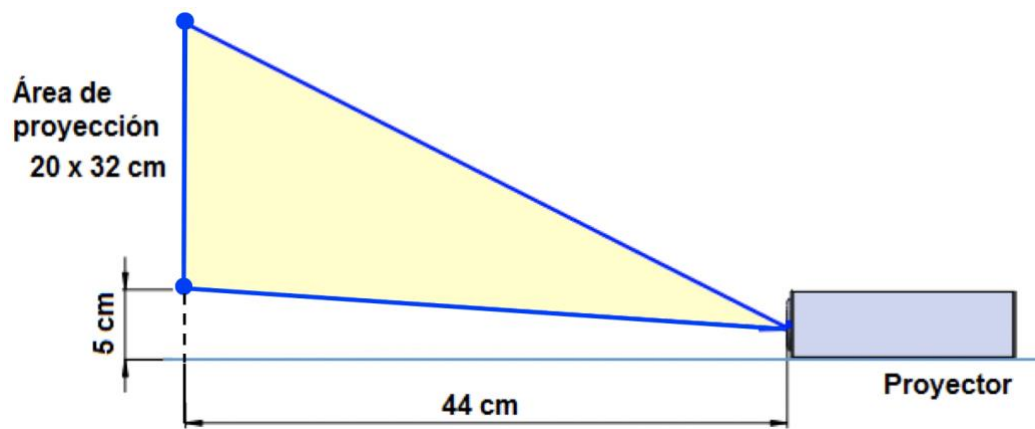


Figura 4.2 Distancia y área de proyección respectiva.

4.1.2 Cámara

Para la captura de las imágenes se utilizó una cámara Point Grey Chameleon modelo CMLN-13S2C-CS que se muestra en la Figura 4.3. De acuerdo con las especificaciones de fabricación mostradas en el Anexo 1 cuenta con una resolución de 1296 x 964, el tamaño de píxel es de 3.75 μm y tiene una montura tipo CS. La cámara utiliza el sensor Sony ICX445 tipo CCD de 1/3". La Tabla 4.1 muestra otros datos de este sensor [115], [116].



Figura 4.3 Cámara Point Grey Chameleon CMLN-13S2C-CS.

Tabla 4.1 Datos del sensor Sony ICX445.

Sensor Sony ICX445		
Tamaño de sensor		1/3"
Dimensiones	Ancho (mm)	4.8
	Alto (mm)	3.6
	Diagonal (mm)	6

Uno de los parámetros importantes que se encontró para el sensor ICX445 es la curva de eficiencia en el espectro electromagnético. La Figura 4.4 muestra las curvas de eficiencia pico para las longitudes de onda del rojo, verde y azul. El sensor tiene una eficiencia pico de 46% para la longitud de onda de 470 nm (azul), 55% para 540 nm (verde) y 49% para 610 nm (rojo). Su mayor sensibilidad es para el color verde.

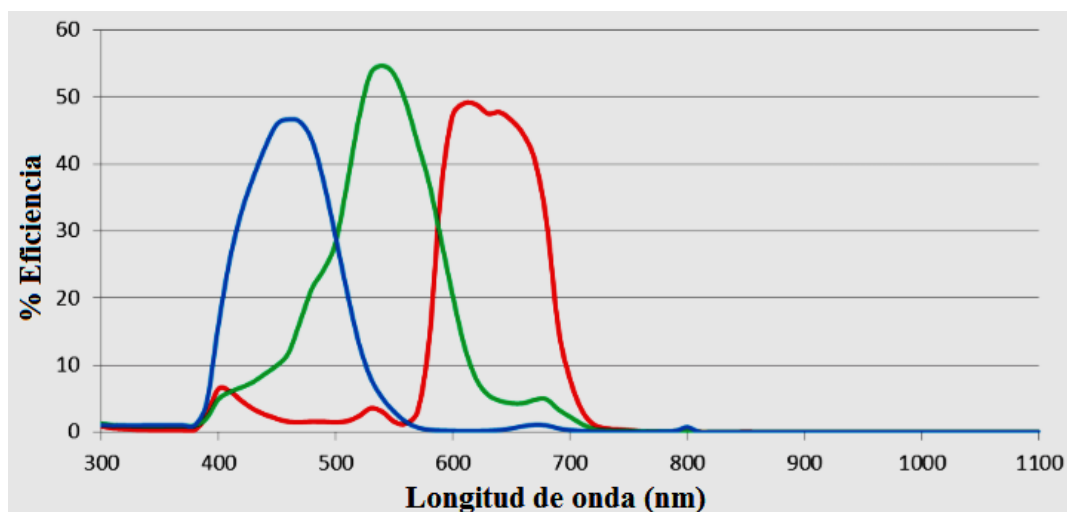


Figura 4.4 Curvas de eficiencia.

4.1.3 Lente

Se utilizó una lente doble Gauss [117], la cual se muestra en la Figura 4.5. La lente es de montura tipo C por lo que fue necesario agregar un espaciador C a la cámara para tener el enfoque correcto ya que su montura es tipo CS. Los datos de la lente que se consideraron para el montaje se muestran en la Tabla 4.2, en el Anexo 2 se muestran las especificaciones y características de la lente utilizada.



Figura 4.5 Lente doble Gauss.

Tabla 4.2 Datos de la lente.

Lente doble Gauss	
Distancia focal (mm)	18
Distancia de trabajo (mm)	210 - ∞

A partir de los datos de la lente y del sensor de la cámara se establecieron los parámetros del montaje de la cámara, la cual se colocó a 50 cm de la superficie de la mesa de trabajo.

Con los datos de la cámara y del sensor, y habiendo definido la configuración del sistema se procedió a calcular el tamaño del campo de visión a partir de la ecuación (4.1) [99].

$$\text{Campo de visión} = \frac{\text{Tamaño de sensor} \times \text{Dist. de trabajo}}{\text{Dist. focal}} - \text{Tamaño de sensor} \quad (4.1)$$

Se obtuvo un campo de visión de 12.853 cm en el montaje de laboratorio lo que limitó al sistema a la reconstrucción de objetos de pequeño y mediano tamaño. En la Figura 4.6 se muestra el esquema del montaje experimental desarrollado.

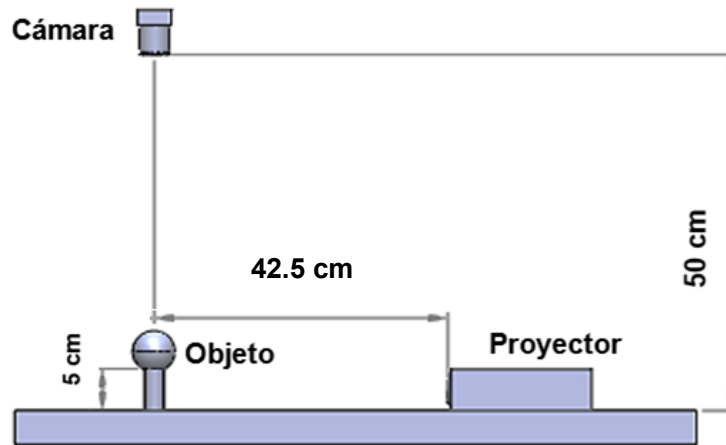


Figura 4.6 Diagrama de configuración ortogonal.

4.2 Configuraciones de montaje

Con la técnica desarrollada se propuso utilizar una nueva configuración, en la cual la cámara y el proyector se encontraban en dirección ortogonal. Una de las ventajas principales de este montaje es que no se requiere de una calibración estricta ya que la distorsión causada por la cámara no afecta a la técnica de reconstrucción y además no se requiere tomar imágenes de referencia para obtener la topografía de la superficie, ya que no se cuenta con un mismo plano de referencia entre el proyector y la cámara. Una de las mayores desventajas de esta configuración ortogonal es que se presentan oclusiones sobre los objetos de prueba en los cuales es imposible llevar a cabo la proyección y por lo tanto obtener la reconstrucción.

Se hicieron evaluaciones de tres configuraciones diferentes, buscando reducir las oclusiones que se presentaban en el sistema y comparar los resultados. A continuación, se hace una descripción de las diferentes configuraciones, sus ventajas y desventajas.

4.2.1 Configuración ortogonal simple

Se utiliza un solo proyector y la cámara se coloca en dirección ortogonal, el objeto de prueba es colocado debajo de la cámara, frente al proyector. Aun cuando el montaje es muy sencillo y las reconstrucciones se pueden obtener rápidamente, su mayor desventaja es que se presentan oclusiones en donde no se puede llevar a cabo la proyección y además por la misma configuración se forman sombras sobre la superficie que afectan en la etapa de identificación de color. En la Figura 4.7 se puede observar el montaje experimental.

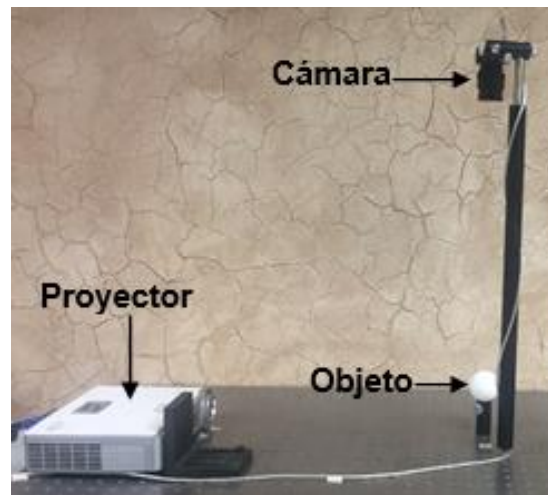


Figura 4.7 Configuración ortogonal simple.

4.2.2 Configuración ortogonal con múltiple proyección

Con esta configuración se utiliza una sola cámara, pero se implementan dos proyectores con las mismas características ortogonales a la unidad de captura. La mayor ventaja de esta configuración es que permite realizar la proyección sobre un área mayor de la superficie de prueba y así reduce significativamente las sombras y oclusiones que se presentan en la configuración simple.

Algunas de las mayores desventajas es que se siguen presentando regiones donde no se puede llevar a cabo la proyección y por lo tanto las reconstrucciones que se

obtienen no son completas. El tamaño del sistema se duplica, ya que ambos proyectores deben ser colocados a la misma distancia del centro de la cámara. Además, se deben utilizar dos proyectores con características idénticas para llevar a cabo la proyección simultánea y al realizar el montaje es necesario asegurar que ambos proyectores tienen el mismo ángulo de apertura para que las franjas de color sean proyectadas a la misma altura. En la Figura 4.8 se puede observar el montaje experimental haciendo uso de dos proyectores.

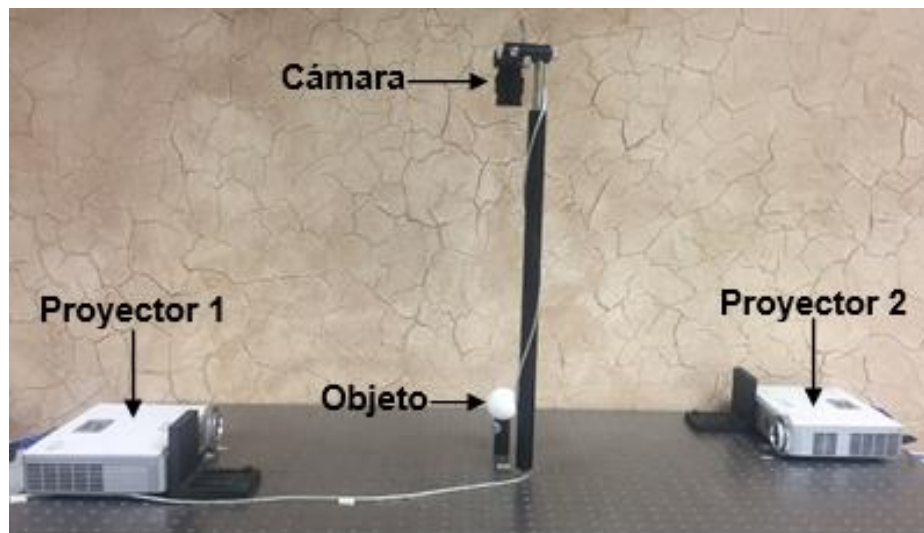


Figura 4.8 Configuración ortogonal con múltiple proyección.

4.2.3 Configuración ortogonal con montura rotatoria

Para reducir el espacio que se requiere al utilizar dos proyectores y reducir las oclusiones que se presentan con cualquiera de las configuraciones anteriores, se implementó el uso de una montura rotatoria. De esta manera se utiliza una sola cámara y un proyector, reduciendo el tamaño del montaje. Mientras que la montura provee un grado de libertad para poder girar el objeto a diferentes posiciones permitiendo obtener las reconstrucciones de diferentes secciones del objeto.

La mayor ventaja de la configuración es que reduce significativamente las oclusiones que se presentan en objetos simétricos y complejos, mejorando las

reconstrucciones al obtener más información de las superficies. Una de las desventajas de la configuración es que aun cuando se reducen las oclusiones, siguen existiendo regiones en las cuales no es posible llevar a cabo la reconstrucción completa de las superficies. Además, se tiene que llevar a cabo la proyección, procesamiento y análisis para obtener los mapas de altura con cada uno de los giros del objeto, incrementando el tiempo de reconstrucción. El tiempo de la reconstrucción depende del número de giros que sean requeridos. En la Figura 4.9 se muestra el montaje experimental utilizando una montura rotatoria y su controlador.

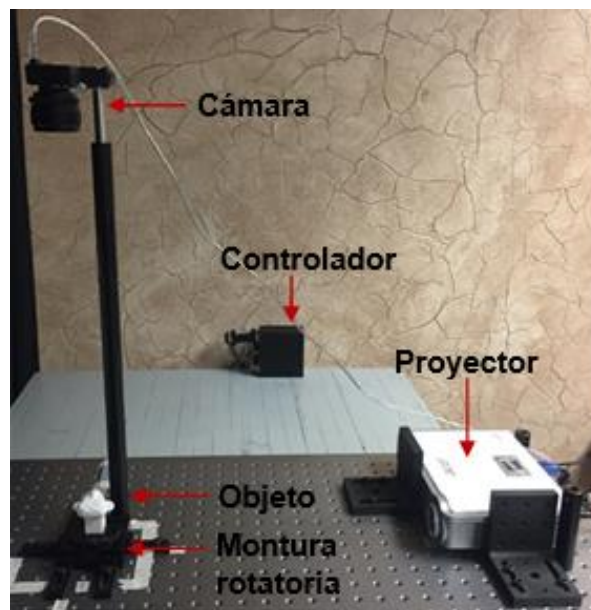


Figura 4.9 Configuración ortogonal con montura rotatoria.

La montura rotatoria reduce significativamente las oclusiones en el sistema, aumentando el número de giros que se darán el objeto se puede obtener más información de las zonas ocluidas pero el tiempo de reconstrucción aumenta. Debido a las ventajas que se observaron, las pruebas del sistema se realizaron con la última configuración, girando el objeto a diferentes posiciones y llevando a cabo el proceso de reconstrucción con cada uno de los giros. El diagrama de la configuración ortogonal con montura rotatoria se muestra en la Figura 4.10, donde se pueden percibir las ubicaciones del objeto, la cámara y el proyector.

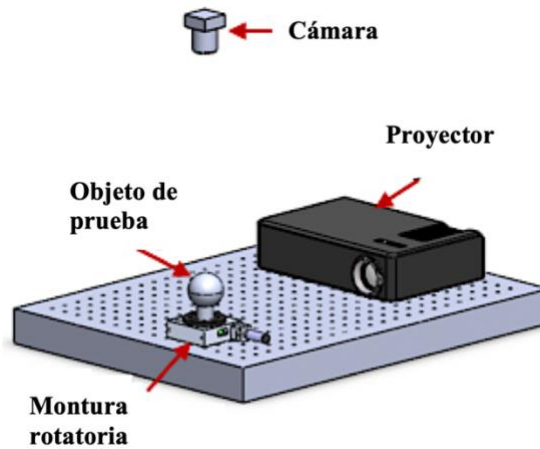


Figura 4.10 Diagrama de configuración ortogonal con montura rotatoria.

4.2.3.1 Alineación de la montura rotatoria

Al utilizar la montura rotatoria fue necesario centrarla dentro del campo de visión del sistema, para que se pudieran colocar los objetos de prueba en el eje óptico de la cámara y que se pudiera observar completamente la superficie. El realizar el centrado de la montura ayudó posteriormente a realizar la fusión de las imágenes adquiridas de diferentes regiones del objeto, simplificando la etapa de fusión. En la Figura 4.11 se muestra la montura centrada en el campo de visión.

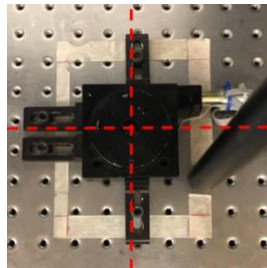


Figura 4.11 Montura rotatoria centrada.

4.3 Montura rotatoria y controlador

Para la configuración seleccionada se implementó una montura rotatoria para llevar a cabo la rotación de los objetos y un controlador para comunicar las instrucciones por medio del software desarrollado en LabVIEW®. La montura utilizada es el modelo MM-

4M-R y el controlador MicroMini serie MVP, ambos de National Aperture®. A continuación, se hace una descripción de las características más importantes, de la configuración inicial y comunicación con el software de reconstrucción.

4.3.1 Montura rotatoria MM-4M-R

La montura utilizada se muestra en la Figura 4.12. De acuerdo a los manuales proporcionados por el fabricante, en la Tabla 4.3 se muestran algunos de los parámetros importantes [118], [119]. Para utilizar la montura fue necesario configurar de inicio, los parámetros básicos de operación de la montura: corriente, velocidad, aceleración y desaceleración. A continuación, se hace una descripción de cómo se llevó a cabo la configuración.



Figura 4.12 Montura rotatoria.

Tabla 4.3 Parámetros de montura rotatoria MM-4M-R.

Características principales	
Carga máxima	4.5 Kg
Rotación	360° / revolución
Pasos	79464
Resolución angular	0.004530° / paso
Velocidad máxima	16 rpm
Servomotor	13 mm de diámetro 6-12 Vdc
Dimensiones	136.4 mm (L) x 73.2 mm (W) x 28.6 mm (H)

4.3.2 Controlador MicroMini

Para poder manejar el movimiento de la montura se utiliza el controlador MicroMini de National Aperture®. En la Figura 4.13 se muestra el controlador y se observan algunos conectores que deben ser configurados para manipular los parámetros con los que opera.



Figura 4.13 Controlador MicroMini de National Aperture®.

4.3.3 Configuración de operación

Para el funcionamiento correcto del controlador es necesario llevar la configuración de diferentes interruptores y por medio de comandos, para manipular las condiciones de operación y comunicación [120]. En cuanto a la configuración general es necesario que inicialmente el controlador esté completamente desconectado de la fuente de alimentación. Después se deben configurar los interruptores en el panel frontal para establecer la dirección de comunicación, la tasa de datos y establecer el modo de

corriente límite. Por medio del panel posterior se llevan a cabo las conexiones. En la Figura 4.14 se muestran los interruptores y conectores que se tienen en el a) panel frontal y en el b) panel posterior. El controlador es usado en modo remoto ya que una computadora externa corre los programas de movimiento, esto se hace colocando el interruptor 1 del panel frontal hacia la derecha.

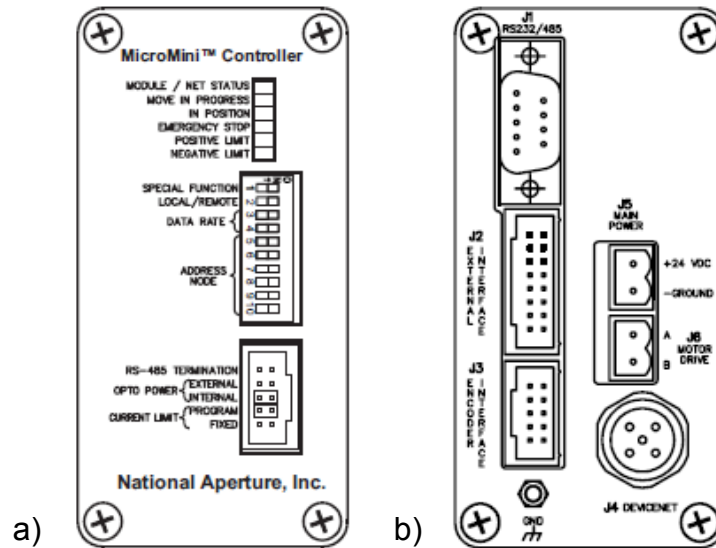


Figura 4.14 Interruptores y conectores de microcontrolador, a) panel frontal, b) panel posterior.

4.3.3.1 Comunicación

A través de los interruptores 5-10, como se muestra en la Figura 4.15. Es necesario establecer una dirección binaria (de preferencia diferente a 0) a través de la cual se establece la comunicación, la dirección seleccionada fue la 1. Por lo tanto, la dirección de comunicación debe ser ingresada antes de cualquier instrucción.

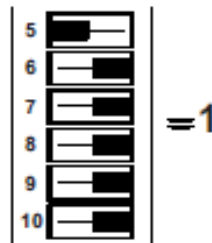


Figura 4.15 Configuración de dirección.

Por medio de los interruptores 3 y 4 se establece la tasa de baudios, la cual indica el número de unidades de señal por segundo. El fabricante recomienda utilizar 38,400 baudios, esta configuración se muestra en la Figura 4.13. En la Tabla 4.4 se muestra la posición de cada interruptor para la configuración de diferentes tasas de datos, utilizando 38,400 baudios el interruptor 3 debe ir a la izquierda y el 4 a la derecha.

Tabla 4.4 Configuración de tasa de datos.

Tasa de baudios	Interruptor 3	Interruptor 4
57,600	Izquierda	Izquierda
38,400	Izquierda	Derecha
19,200	Derecha	Izquierda
9,600	Derecha	Derecha

4.3.3.2 Corriente programable

Para establecer el límite de corriente de forma programable los interruptores deben ser colocados como se muestra en la Figura 4.16.



Figura 4.16 Interruptores para corriente programable.

El controlador permite tener una salida de corriente programable para protección. Esto permite proteger al motor de posibles picos de corriente que pueden ocurrir mientras el motor está en condiciones de bloqueo. Según los parámetros de fabricante, para los motores de 13 mm es recomendado utilizar una corriente de 0.6 amperes.

Para la configuración de la montura es necesario utilizar el comando "ANO" el cual permite determinar la máxima corriente que se le proporciona al motor. En la Tabla 4.5 se muestran algunos de los valores con los que se pueden utilizar para la configuración

de la corriente. El comando utilizado para establecer la corriente máxima de 0.6 amperes fue “1 ANO 2700”.

Tabla 4.5 Configuración de corriente utilizada en montura.

Corriente (amperes)	Configuración (ANO)
0.0	2048
0.3	2346
0.6	2700
1.0	2969
1.5	3402
2.0	3835
2.3	4095

4.3.3.3 Conexiones

En el panel posterior mostrado en la Figura 4.17, el conector J-5 es encargado de la alimentación del controlador, J-6 es el driver del motor, J-3 es un codificador de interface y J-2 un codificador de eventos. Es necesario utilizar un adaptador de RS-485 a RS-232 y un adaptador serial (RS-232) a USB para poder comunicar la computadora con el controlador.

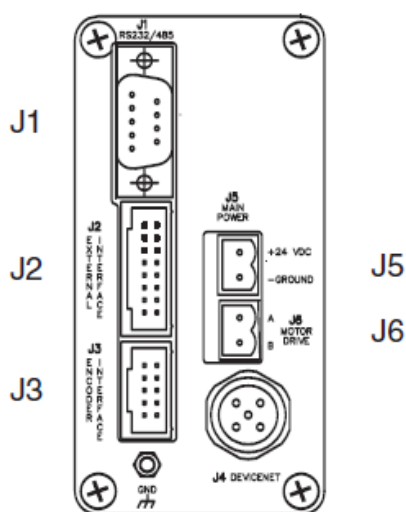


Figura 4.17 Conexiones del controlador.

4.3.4 Programación e instrucciones básicas

Para el control de la montura es necesario utilizar algunos comandos que permiten al controlador llevar a cabo las tareas necesarias. En todas las instrucciones es necesario indicar primero la dirección de comunicación (1) seguido por el comando. A continuación, se mencionan las instrucciones básicas que se utilizaron.

El comando HO establece que la posición mecánica en la que se encuentra actualmente la montura será la posición origen.

El comando EN habilita el amplificador que provee corriente al motor. Es necesario habilitarlo para que se puedan ejecutar las instrucciones.

Para la programación de corriente de salida se utiliza el comando ANO, el cual determina la corriente máxima del servomotor. Esto protege al motor de altas corrientes que pueden ocurrir durante la rotación.

El comando AC indica la aceleración y desaceleración máxima para que el motor alcance la velocidad programada. Ésta se puede calcular con la ecuación 4.2, en donde (*SP*) se refiere a la velocidad máxima, (*SR*) muestreo (500 µseg) y *T* es el tiempo de aceleración. Aunque la aceleración que alcanza el motor no afecta significativamente en nuestra aplicación.

$$Aceleración = \frac{16 \times SP \times SR}{T} \quad (4.2)$$

La velocidad máxima de movimiento del motor se indica con la instrucción SP, se debe considerar que entre más elevada sea la velocidad el motor consumirá más corriente y esto puede dañarlo. La velocidad no debe exceder la capacidad mecánica del sistema. Con la ecuación 4.3 se puede obtener una aproximación del valor que debe seguir la instrucción, en donde (*X*) representa el número de revoluciones por minuto. Teóricamente la velocidad máxima que permite el motor es de 16 rev/min, aunque prácticamente se encontró que la velocidad máxima es de 15 rev/min [121].

$$SP = \frac{1024(X)}{12} \quad (4.3)$$

Para determinar la posición de destino se debe utilizar el comando LR o LA, los cuales indican la posición a la cual debe llegar el motor. LA mueve el motor el número determinado de pasos después de la posición cargada como origen, mientras que LR realiza el movimiento en relación a la posición actual del motor. Cambiando el número de pasos que dará el motor, se puede controlar el ángulo de giro del objeto, para una revolución completa el motor debe dar 79,464 pasos. Para realizar una revolución de los objetos en seis etapas se divide el número de pasos entre seis y se utiliza la instrucción LR 13244.

El comando M se debe utilizar para que arranque el motor. Es importante agregar esta instrucción para que la montura inicie el movimiento, si no se utiliza no se realizará ninguna de las instrucciones de movimiento. En la Figura 4.18 se muestran las instrucciones utilizadas.

```

1 HO 0      % Establece la posición actual como el origen.
1 EN        % Habilita al amplificador que provee corriente al motor.
1 ANO 2700  % Establece 0.6 amperes como la corriente máxima.
1 AC 160    % Determina la aceleración máxima.
1 SP 856    % Selecciona la velocidad de 10 rev/min.
1 LR 13244  % Gira a la derecha 13244 pasos (60°).
1 M         % Inicia el movimiento del motor.

```

Figura 4.18 Programa para realizar un giro de 60°.

El mismo código fue implementado en LabVIEW® (Apéndice D) para llevar a cabo la comunicación con el controlador y realizar el movimiento de la montura. Girando los objetos el número de veces que indique el usuario, de esta forma se puede repetir el proceso de reconstrucción para cada uno de los giros realizados. En la Figura 4.19 se muestra la programación realizada y cómo se sigue cada una de las instrucciones previas. Se implementó un retardo de 50 milisegundos entre cada instrucción para que se logrará mandar el comando al controlador, si no se utiliza no se puede mandar efectivamente cada instrucción.

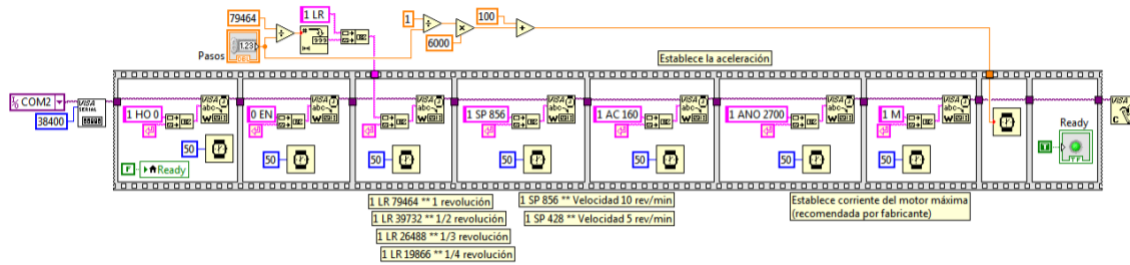


Figura 4.19 Programa para realizar un giro de 60° en LabVIEW®.

4.4 Ángulos mínimo y máximo de observación

Después de determinar que la configuración con la montura rotatoria era la ideal para el sistema de reconstrucción, se realizó un estudio para determinar los ángulos mínimo y máximo que se pueden tener en una placa plano-paralela inclinada y que se pueden seguir percibiendo por la cámara con la configuración ortogonal. En la Figura 4.20 (a) se muestra la placa colocada con el ángulo mínimo α_{min} que se puede tener entre el eje óptico de la cámara y la placa, y en la Figura 4.20 (b) el ángulo máximo α_{max} .

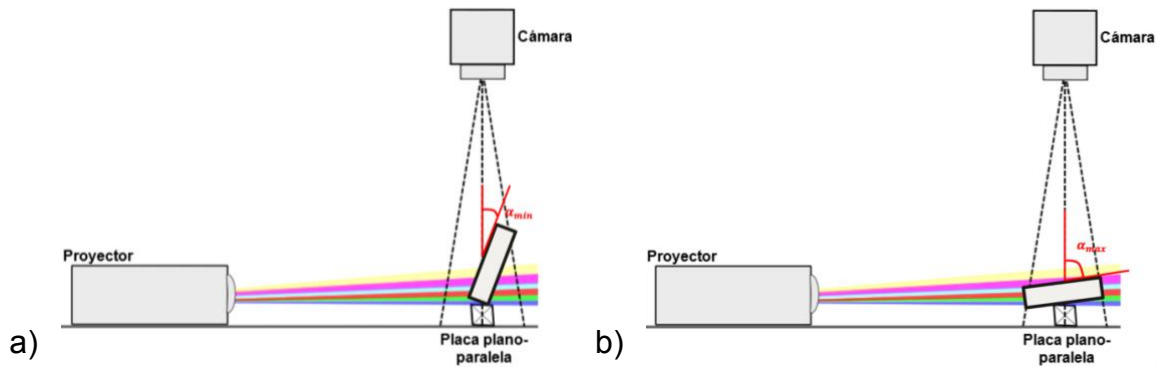


Figura 4.20 Placa plano-paralela para medición de, a) ángulo mínimo y b) ángulo máximo de observación.

Al colocar la placa en diferentes ángulos se determinaron los ángulos mínimo y máximo en los cuales la cámara podía observar el patrón de franjas proyectado. Para α_{min} se encontró que era de 20°, como se puede ver en la Figura 4.21 (a) en donde se puede observar cada una de las franjas. Para α_{max} se encontró que era de 80°, como se puede ver en la Figura 4.21 (b).

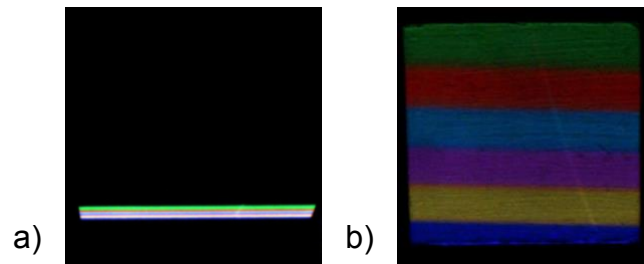


Figura 4.21 Franjas de color capturadas con, a) ángulo mínimo y b) ángulo máximo de observación.

Cuando el plano inclinado se colocó en un ángulo más pequeño era imposible observar cada una de las franjas de color, por lo que se recomienda tener siempre un ángulo mayor a 20° para que se pueda realizar la proyección y observar franjas en la captura. Cuando se tiene un ángulo mayor a 80° se observó que la cantidad de franjas de color que se logran proyectar sobre la superficie es menor y por lo tanto no se logra tener mucha información de la superficie, por lo que se recomienda no rebasar este límite.

Una vez establecida la configuración ortogonal y los ajustes necesarios, fue indispensable realizar una calibración del color proyectado y capturado con la cámara para que fueran lo más cercano posible al valor ideal. En el siguiente capítulo se describe como se realizó la caracterización del proyector y la calibración del color.

CAPÍTULO V

CARACTERIZACIÓN Y CALIBRACIÓN

Durante esta etapa fue importante realizar ajustes para corregir el color que se genera en la computadora, el que se proyecta y el que se captura. Idealmente estos deberían de ser muy similares entre sí, sin embargo, por las diferentes características de los elementos que se utilizan existe una diferencia en los colores. Para poder calibrar el color fue necesario trabajar en diferentes etapas, primero se hizo la caracterización del proyector para poder observar la respuesta que tiene con cada longitud de onda y a partir de ahí hacer la corrección en el color capturado. Después se comparó el color ideal que se genera y proyecta, con el que logra capturar la cámara para realizar el ajuste. A continuación, se hace una descripción del proceso de calibración.

5.1 Caracterización del proyector

Para poder comparar el color que idealmente se genera con el que se proyecta se hicieron pruebas con tres colores de referencia: rojo, verde y azul. Con estos colores se pudo comparar la respuesta de una manera sencilla entre el valor ideal generado y el que se proyecta en realidad. Para estudiar el color que el proyector está generando se utilizó un espectroradiómetro conectado a una esfera integradora, dentro de la cual se proyectó cada uno de los colores de referencia como se muestra en la Figura 5.1.

Los colores fueron generados en RGB por lo que sus valores normalizados ideales son: rojo (1, 0, 0), verde (0, 1, 0) y azul (0, 0, 1). Por lo tanto, se pueden comparar los valores que se detectan dentro de la esfera con un espectrómetro y analizar qué tanta diferencia existe con el valor ideal. En la Figura 5.2 se muestra un ejemplo del reporte que se obtuvo por medio del espectroradiómetro para el color rojo, en el reporte se pueden observar diferentes valores que son importantes: las coordenadas de

cromaticidad, la longitud de onda pico y dominante, el radio y la pureza del color. También se pueden observar algunos gráficos de las longitudes de onda en las que está emitiendo el proyector y el diagrama de cromaticidad CIE1931. Con los valores del radio de color podemos observar los contenidos de rojo, verde y azul que se presentan en la proyección del color rojo y compararlos con los valores ideales.

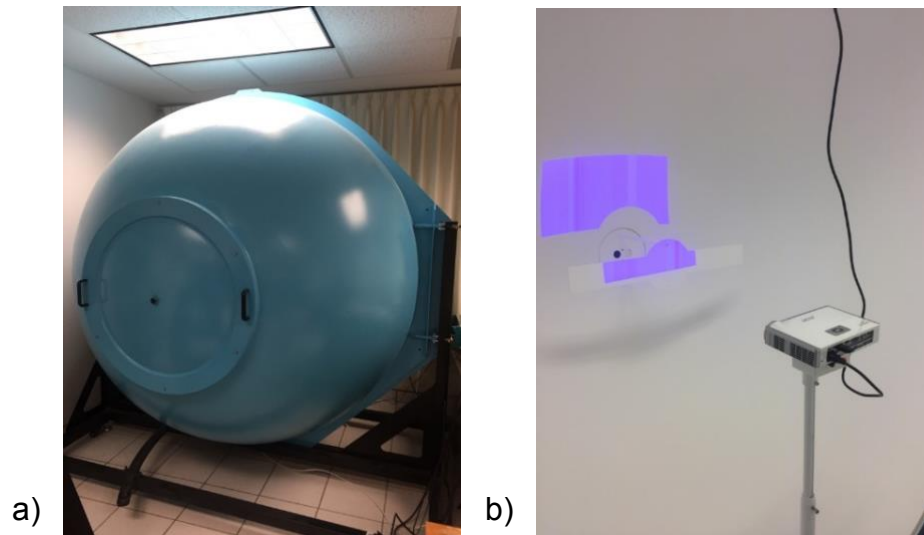


Figura 5.1 Caracterización del proyector Acer K335, a) esfera integradora, b) proyección de color de referencia.

CIE Colorimetric Parameters

Chromaticity coordinates: $x=0.6776$ $y=0.3107$ $u(u')=0.5044$ $v=0.3469$ $v'=0.5204$
 CCT: $T_c=1000K$ ($duv=-0.05679$) Color Ratio: $R=0.917$ $G=0.081$ $B=0.002$
 Peak Wavelength: 630nm Half Bandwidth: 19.1nm
 Dominant Wavelength: 619.3nm Color Purity: 0.965
 Color Render Index: $R_a=48.9$, $CRI=49.5$

$R1=47$	$R2=94$	$R3=56$	$R4=42$	$R5=59$	$R6=72$	$R7=21$	$R8=0$
$R9=0$	$R10=97$	$R11=75$	$R12=30$	$R13=66$	$R14=78$	$R15=6$	

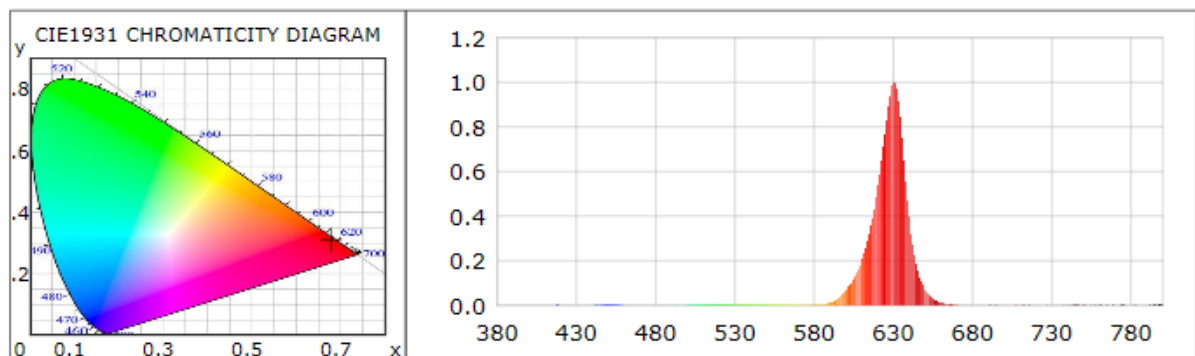


Figura 5.2 Reporte para la proyección del color rojo.

En la Tabla 5.1 se muestra un resumen de los resultados que se obtuvieron con cada color proyectado. En los reportes se observó que el color verde tiene una menor pureza al tener un alto contenido de otras componentes y el color azul es el que más se separa del color ideal. En la Figura 5.3 se observan las gráficas del espectro emitido con cada uno de los colores y se puede observar como el verde tiene un alto contenido de otras longitudes de onda.

Tabla 5.1 Resumen de resultados obtenidos con el espectroradiómetro.

Proyección color rojo	
Longitud de onda pico	630 nm
Longitud de onda dominante	619.3 nm
Radio de color	$R = 0.917, G = 0.081, B = 0.002$
Pureza del color	0.965
Proyección color verde	
Longitud de onda pico	530 nm
Longitud de onda dominante	547.9 nm
Radio de color	$R = 0.022, G = 0.960, B = 0.018$
Pureza del color	0.831
Proyección color azul	
Longitud de onda pico	450 nm
Longitud de onda dominante	458.4 nm
Radio de color	$R = 0.018, G = 0.532, B = 0.450$
Pureza del color	0.930

A partir de los reportes obtenidos se consideraron los radios de color, ya que estos se pueden comparar directamente con el color generado idealmente. Para simplificar el proceso de calibración se convirtieron los valores RGB al modelo HSL ya que lo importante es poder ajustar el matiz del color que se está proyectando, ignorando la saturación y luminosidad. Utilizando las ecuaciones descritas en el Capítulo II para

convertir del modelo RGB a HSL se convirtieron los valores del radio de color generado y proyectado, obteniendo los resultados que se muestran en la Tabla 5.2.

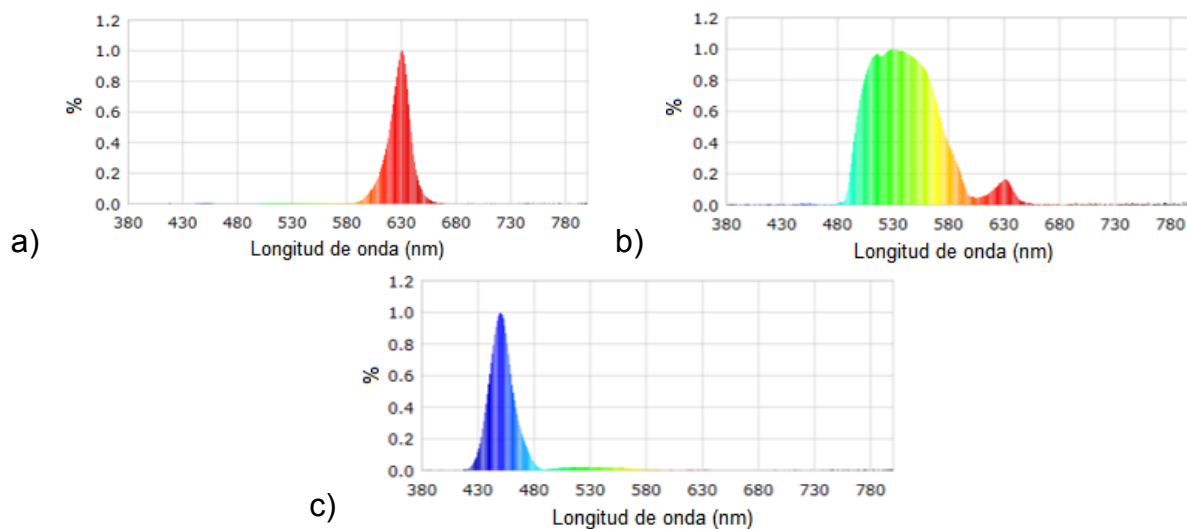


Figura 5.3 Espectro emitido por proyector Acer K335, a) color rojo, b) color verde, c) color azul.

Tabla 5.2 Conversión de radios de color a modelo HSL.

Color generado					
	Radio de color (RGB)			Matiz	Matiz (Digital)
Rojo	$R = 1$	$G = 0$	$B = 0$	$H_R = 0^\circ$	$H_R = 0$
Verde	$R = 0$	$G = 1$	$B = 0$	$H_G = 120^\circ$	$H_G = 80$
Azul	$R = 0$	$G = 0$	$B = 1$	$H_B = 240^\circ$	$H_B = 160$
Color proyectado					
	Radio de color (RGB)			Matiz	Matiz (Digital)
Rojo	$R = 0.917$	$G = 0.081$	$B = 0.002$	$H_{R-p} = 5.18^\circ$	$H_{R-p} = 3.45$
Verde	$R = 0.022$	$G = 0.960$	$B = 0.018$	$H_{G-p} = 119.75^\circ$	$H_{G-p} = 79.83$
Azul	$R = 0.018$	$G = 0.532$	$B = 0.450$	$H_{B-p} = 170.43^\circ$	$H_{B-p} = 113.62$

A partir de los valores de matiz se puede obtener una aproximación de la corrección necesaria para el ajuste del color que se proyecta dependiendo de qué tanta diferencia existe entre el valor ideal y el proyectado en realidad. Obteniendo la diferencia entre el

matiz generado y el detectado en la esfera integradora para cada color de referencia se obtienen los valores de corrección de las ecuaciones 5.1, 5.2 y 5.3, esta corrección debe ser agregada a cada una de las imágenes adquiridas para que se consideren las desviaciones que se presentan. Utilizando de esta forma la caracterización del proyector para calibrar los valores proyectados.

$$Y_R = H_R - H_{R-P} = -3.45 \quad (5.1)$$

$$Y_G = H_G - H_{G-P} = 0.17 \quad (5.2)$$

$$Y_B = H_B - H_{B-P} = 46.38 \quad (5.3)$$

En la Figura 5.4 se muestran las curvas de eficiencia del espectro emitido con cada color proyectado, observando la respuesta que tiene el proyector Acer K335 con cada longitud de onda. Después de realizar la caracterización del proyector y calibrar el color proyectado en el sistema de reconstrucción, fue necesario realizar el ajuste para el color que se captura con la cámara y estudiar la diferencia que existe entre el matiz ideal y el capturado en cada píxel.

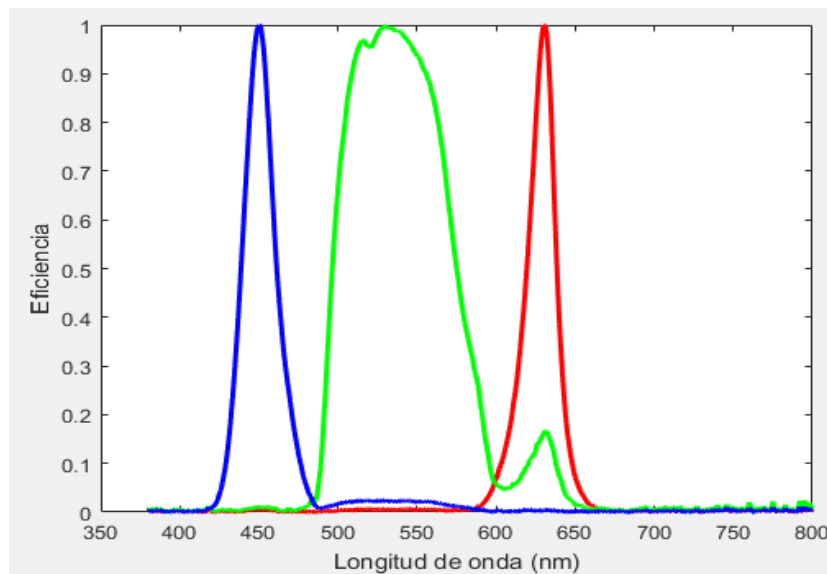


Figura 5.4 Curva de eficiencia en cada longitud de onda para proyector Acer K335.

5.2 Caracterización de la cámara

Para poder llevar a cabo el ajuste de la cámara fue necesario caracterizar su respuesta con cada uno de los colores de referencia al igual que en el proyector. Según los parámetros que se obtuvieron de la cámara en la Figura 5.5 se muestra la respuesta de cada uno de los canales de color, se puede observar que existe un cruce de color entre estos canales. Debido al cruce que existe en la cámara, siempre que se capturan imágenes se encontrarán señales no deseadas en todos los canales de la cámara.

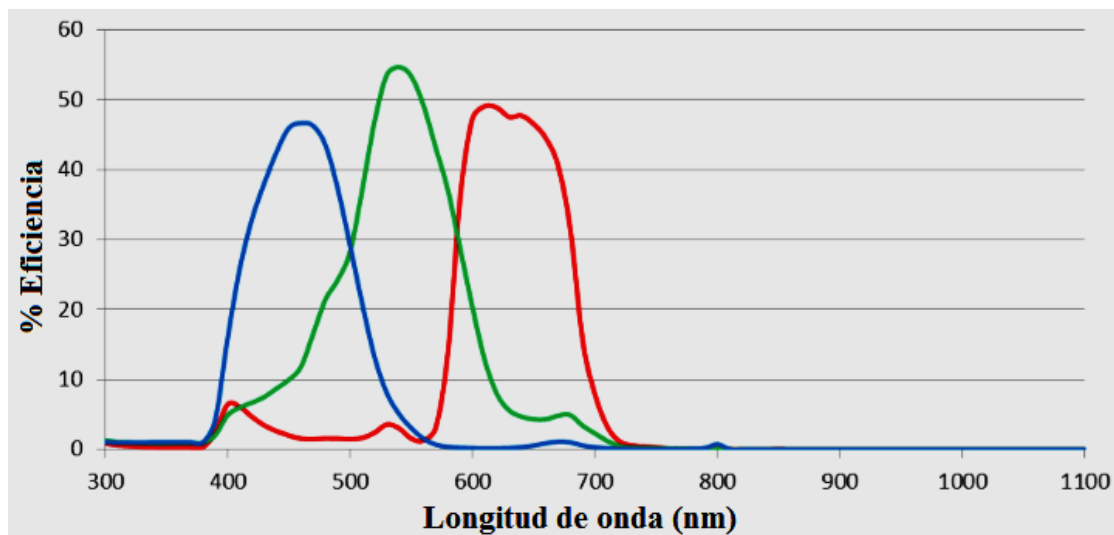


Figura 5.5 Curva de eficiencia pico en cada longitud de onda.

Para conocer la diferencia que existe entre el color ideal y el valor de referencia que se captura en realidad con la cámara para cada píxel, se desarrollaron dos métodos de caracterización, la diferencia es la configuración que se utiliza para la captura de las imágenes de referencia para cada color. A continuación, se hace una descripción de los dos métodos.

5.2.1 Método 1

Para la captura de las imágenes de referencia se utiliza la configuración en línea como se muestra en la Figura 5.6, en donde el eje óptico de la cámara se encuentra

en la misma dirección que el eje óptico del proyector. Frente a la cámara y proyector se coloca una pantalla de referencia de color blanco mate, sobre la cual se lleva a cabo la proyección de los colores de referencia (rojo, verde y azul) y después la captura de las imágenes, como se observa en la Figura 5.7.

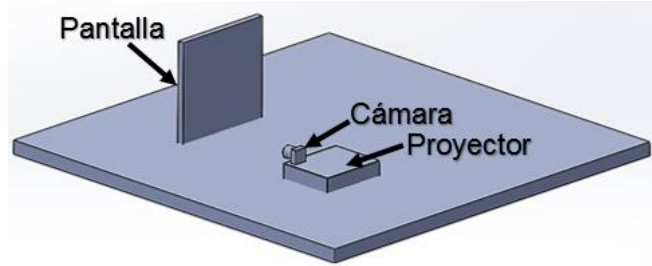


Figura 5.6 Configuración en línea para calibración de cámara (Método 1).

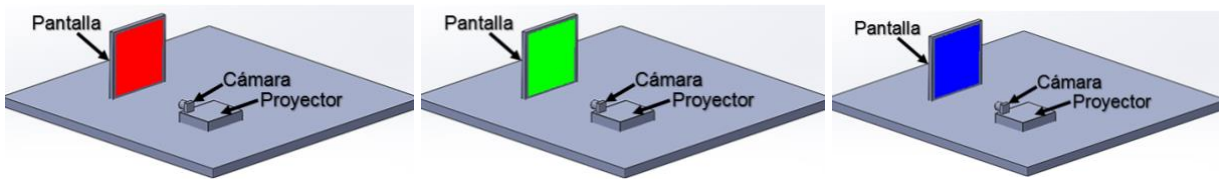


Figura 5.7 Proyección de colores de referencia (Método 1).

Al tener las tres imágenes de los colores de referencia, se hace la conversión del modelo RGB a HSL para hacer la comparación del matiz obtenido por cada píxel y el que idealmente se debería de observar sin considerar la saturación o luminosidad de la imagen, corrigiendo únicamente el color. Para cada imagen de referencia se hace la comparación entre el valor de matiz ideal para el rojo $H_R = 0$, verde $H_G = 80$ y azul $H_B = 160$ y el que se captura en realidad en cada píxel $H(x, y)$ de las imágenes de referencia. Así con las ecuaciones 5.4, 5.5 y 5.6 se pueden conocer cuáles son las correcciones necesarias para cada color de referencia en cada píxel de la imagen, obteniendo el ajuste que se debe hacer en el rojo $X_R(x, y)$, verde $X_G(x, y)$ y azul $X_B(x, y)$.

$$X_R(x, y) = H_R - H(x, y) = 0 - H(x, y) \quad (5.4)$$

$$X_G(x, y) = H_G - H(x, y) = 80 - H(x, y) \quad (5.5)$$

$$X_B(x, y) = H_B - H(x, y) = 160 - H(x, y) \quad (5.6)$$

5.2.2 Método 2

Para la captura de las imágenes de referencia en este método se utilizó una configuración en la que la cámara y proyector se encontraban en dirección ortogonal, ya que ésta es la que se utiliza en la técnica de reconstrucción propuesta. Para poder llevar a cabo la proyección y captura de los colores de referencia fue necesario colocar la pantalla con un ángulo de inclinación de 45° como se muestra en la Figura 5.8.

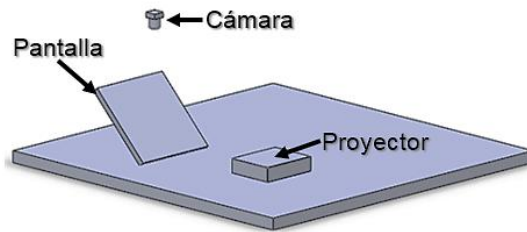


Figura 5.8 Configuración en línea para calibración de cámara (Método 2).

Para obtener los valores de calibración se lleva a cabo el mismo proceso que en el método anterior y se utilizan las mismas ecuaciones. Sin embargo, con esta configuración se puede observar una diferencia en la proyección, debido a la proyección ortogonal se puede observar que las regiones más alejadas del proyector presentan mayor atenuación y por lo tanto el color se percibe más oscuro. En la Figura 5.9 se muestra una aproximación de cómo se percibiría la variación del color con la configuración ortogonal con cada referencia.

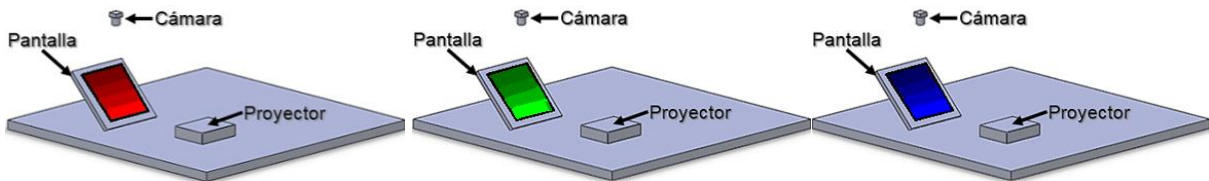


Figura 5.9 Proyección de colores de referencia (Método 2).

Con este método se puede apreciar uno de los efectos que se presentan con la técnica propuesta, ya que al divergir la luz del proyector y tener inclinación en las superficies se presentan atenuaciones de intensidad. Por lo tanto, al utilizar la configuración ortogonal se debería de tener una mejor corrección del color empleando el segundo método. En el proyector, los valores de los píxeles deben ser ajustados a un mismo valor, mientras que en la cámara es necesario obtener los valores de corrección para cada píxel ya que éstos no tienen la misma respuesta.

5.3 Calibración del color en imágenes

Después de llevar a cabo la caracterización y de haber obtenido los valores de corrección para el matiz proyectado y el capturado por cada píxel, se puede hacer la calibración de cualquiera de las imágenes obtenidas en el sistema de reconstrucción desarrollado. Al capturar cualquier imagen es necesario llevar a cabo la conversión al modelo HSL para poder hacer la calibración del color, sin considerar la saturación y luminosidad de la imagen.

Para obtener la imagen con el plano de matiz calibrado para cada píxel $H_{CAL}(x, y)$ se utiliza la ecuación 5.7. Se considera el valor de matiz que se captura con la cámara $H(x, y)$, al cual se le deben agregar los valores de corrección que se obtuvieron con la caracterización de la cámara y del proyector para los colores de referencia.

$$H_{CAL}(x, y) = H(x, y) + [X_R(x, y) + X_G(x, y) + X_B(x, y)] + [Y_R + Y_G + Y_B] \quad (5.7)$$

Con esta ecuación se puede calibrar cualquiera de las imágenes que se capture, considerando la respuesta que tienen el proyector y cada píxel de la cámara utilizado. Sin importar cuál de los dos métodos de configuración se utilicen, la ecuación de calibración es la misma. A continuación, se muestran los resultados obtenidos al calibrar las imágenes de referencia con la ecuación 5.7 para los dos métodos de caracterización.

5.3.1 Calibración de color con método 1

En la Figura 5.10 se muestran las tres imágenes de referencia obtenidas (rojo, verde y azul) utilizando el método 1. A simple vista se puede apreciar que los colores que se capturan son diferentes al que idealmente se está generando, estas variaciones se deben al cruce de color, respuesta de la cámara y el proyector utilizado. Después de implementar la calibración se puede observar que los colores son muy similares a los que se capturaron originalmente, por lo que se hizo un estudio más detallado de los resultados obtenidos para comparar el color capturado con el calibrado.

Imagen		R	G	B
Método 1	Ideal			
	Capturada			
	Calibrada			

Figura 5.10 Evaluación de calibración de color (Método 1).

En la Figura 5.11 se puede observar el perfil de línea que se obtiene de la imagen capturada y de la imagen después de la calibración realizada. En estos resultados se puede observar la respuesta de cada uno de los canales de color, y se puede percibir

el cruce de color que se presenta al tener un porcentaje de componente en los canales que, idealmente no se debería de tener. Aquí se puede observar la razón de que el color verde sea el que se percibe más diferente al valor ideal, al tener una menor sensibilidad al detectar el color y presentar más cruce de color con los canales rojo y verde. Con esta evaluación se puede observar que no hay un cambio significativo entre los valores capturados y los calibrados, sin embargo, el cruce de color se logra reducir un poco en el rojo y azul.

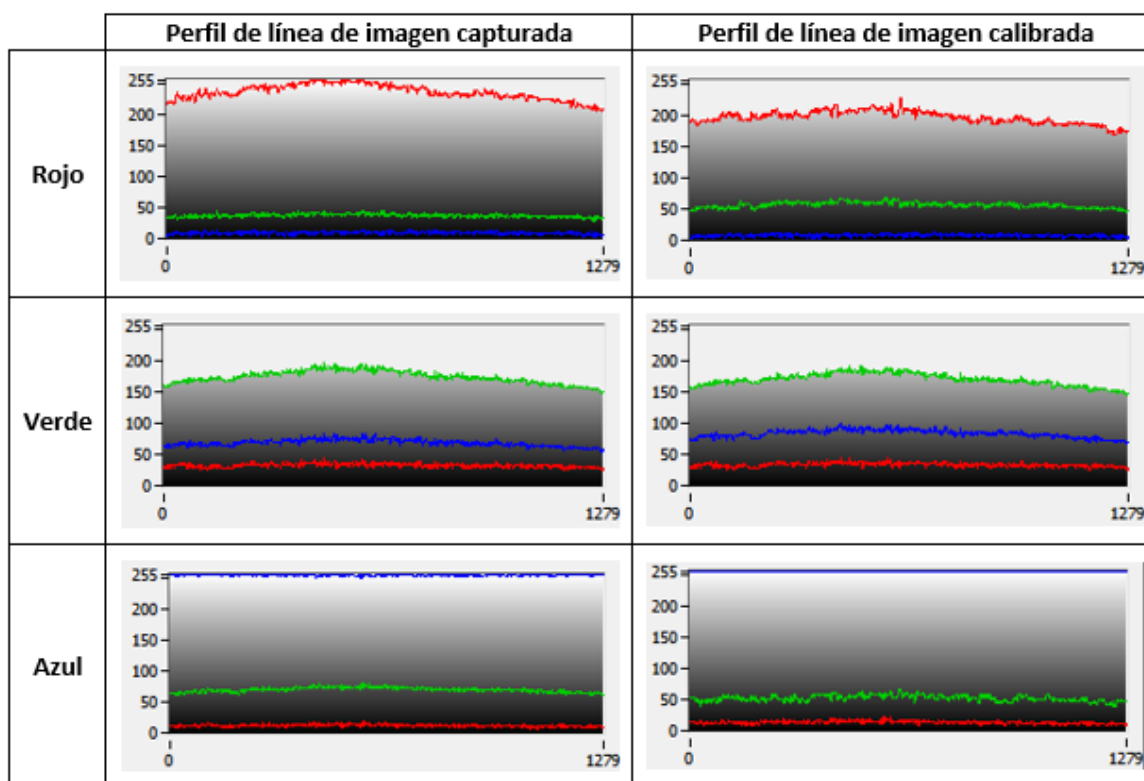


Figura 5.11 Perfil de línea (Método 1).

Para tener una calibración de la imagen que corresponda a la misma configuración utilizada y que corrija los efectos que se presentan se utiliza el método 2. Sin embargo, con este método se puede observar que se reduce el cruce de color, permitiendo separar más fácilmente cada color en la etapa de clasificación de color aun cuando a simple vista el resultado sea muy similar.

5.3.2 Calibración de color con método 2

En la Figura 5.12 se muestran las tres imágenes de referencia obtenidas (rojo, verde y azul) utilizando el método 2 y las obtenidas después de la calibración. Al igual que en el caso anterior los colores que se capturan son diferentes al que idealmente se está generando. Después de implementar la calibración se puede observar que los colores son muy similares a los que se capturaron originalmente, con este método se aprecia en la región más cercana al proyector (lado derecho de la imagen) el color es más claro y en el lado más lejano (izquierdo) el color se ve más oscuro por la atenuación de la configuración ortogonal.

Imagen		R	G	B
Método 2	Ideal			
	Capturada			
	Calibrada			

Figura 5.12 Evaluación de calibración de color (Método 2).

En la Figura 5.12 se puede observar el perfil de línea de las imágenes capturadas y calibradas, al igual que con el método anterior a simple vista puede parecer que el color o calidad de la imagen es la misma, sin embargo, al realizar pruebas en la etapa

de identificación de color se pudo apreciar cómo la calibración mejora significativamente la clasificación como se demuestra más adelante. Se puede apreciar cómo se reduce la discontinuidad del color que se presenta con esta configuración, teniendo de esta forma una imagen con una variación de color más uniforme y reduciendo el brillo que se percibe en las regiones más cercanas al proyector. También se observa que se reduce el ruido en los canales de color después de realizar la calibración.

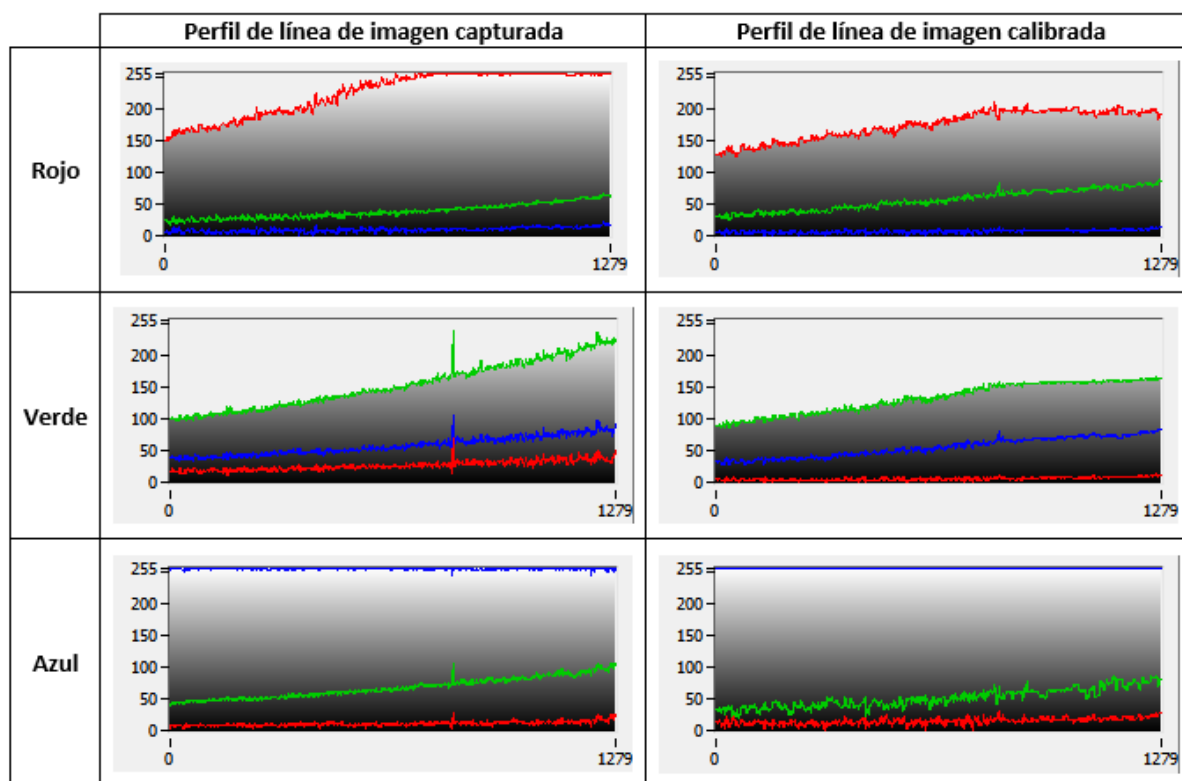


Figura 5.13 Perfil de línea (Método 2).

Como se mencionó anteriormente el segundo método fue utilizado ya que permite tener una calibración basada en la configuración ortogonal y aun cuando la señal de salida es muy similar a la original la calibración mejora la identificación de color en la etapa del análisis de la imagen, reduciendo el cruce de color.

En el siguiente capítulo se lleva a cabo la proyección del patrón de franjas de color y la captura de las imágenes implementando la calibración.

CAPÍTULO VI

PROYECCIÓN, CAPTURA Y PROCESAMIENTO

En esta sección se hace una descripción de la generación del patrón de franjas en color, la proyección sobre la superficie, la captura de múltiples imágenes y el procesamiento implementado. El sistema de reconstrucción 3-D se lleva a cabo mediante un software desarrollado en LabVIEW® en donde una vez iniciado el programa se proyectan las franjas, se capturan las imágenes del objeto, éstas son procesadas para mejorarlas y después son utilizadas en el análisis.

6.1 Franjas en color

El patrón utilizado está compuesto por seis franjas de diferente color como se muestra en la Figura 6.1, cada una tiene un grosor de 10 píxeles (2.6 mm). Anteriormente se estudiaron diferentes patrones, modificando los colores empleados y observando las ventajas y/o desventajas que presentaba cada uno de estos [122]. Los colores que se usan en las franjas proyectadas son: rojo, verde, azul, cian, magenta y amarillo. Se utiliza una combinación de los modelos de color RGB y CMY ya que permiten una mejor identificación de color porque cada uno es muy diferente, cuando se agrega el uso de otros colores la identificación es mucho menos precisa. Para el fondo del patrón de franjas se utiliza el color negro que no representa un valor de altura por lo que no altera la reconstrucción y solo se utiliza para poder eliminar regiones de no interés.



Figura 6.1 Patrón de franjas en color.

Se hicieron pruebas con otros patrones, colocando una franja negra de 2 píxeles de ancho entre cada franja de color para reducir el solapamiento de color que se observa en la unión de las franjas. Sin embargo, los resultados obtenidos no tuvieron una mejora considerable, por lo tanto, se utilizó el patrón de franjas original.

Para mejorar la resolución del sistema y obtener más información de la superficie se hace un corrimiento o barrido del patrón de franjas como se describe a continuación.

6.1.1 Corrimiento de franjas

Debido a que las franjas del patrón generado son discretas y el análisis de las mismas para la reconstrucción es basado en la identificación directa de color, la información que se obtiene de la superficie está limitada a la resolución de la franja y la reconstrucción resultante es discreta. Por lo tanto, el software de proyección y captura realiza corrimientos de las franjas y captura una imagen en cada corrimiento. Se realiza una proyección inicial y 4 corrimientos posteriores de 2 píxeles, en los que se desplaza cada franja de color sin pasar completamente a la siguiente posición como se muestra en la Figura 6.2. Colocando una pantalla a 40.5 cm del proyector se encontró que en cada corrimiento las franjas se desplazan una distancia de 0.52 mm.

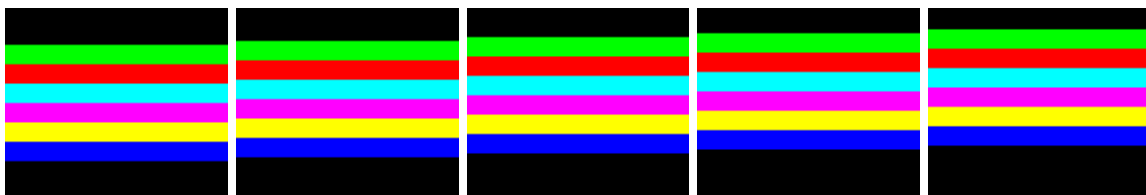


Figura 6.2 Franjas de color con corrimiento.

6.2 Adquisición de imagen

En la adquisición de la imagen se utiliza un instrumento virtual de LabVIEW®, para inicializar el asistente de adquisición de visión (*NI Vision Acquisition Wizard*) en el que se pueden editar algunas opciones del instrumento de captura. A continuación, se hace una descripción de la configuración utilizada.

Primero se eligió el dispositivo o fuente de adquisición y se seleccionó la cámara Point Grey mencionada anteriormente. En la Figura 6.3 se muestra la selección de la fuente de adquisición usando el asistente de visión.

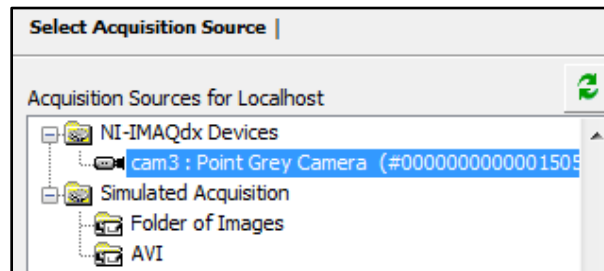


Figura 6.3 Selección de fuente de adquisición.

Después se seleccionó uno de los cuatro tipos de adquisición diferentes que existen, para el sistema de reconstrucción desarrollado se utilizó la adquisición única con procesamiento, la cual permite tomar una sola imagen y después procesarla. En la Figura 6.4 se muestra el tipo de adquisición seleccionado en el asistente de LabVIEW®.

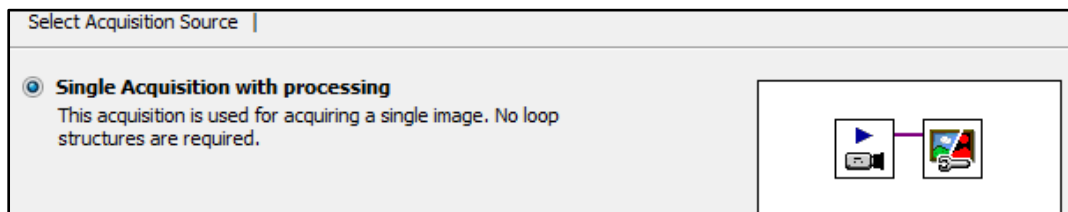


Figura 6.4 Selección de tipo de adquisición.

Se configuraron los parámetros de la cámara tales como: brillo, exposición, ganancia, tonalidad, saturación, etc. Se pueden configurar para que se ajusten automáticamente con cada imagen o manualmente con un valor determinado. Para la aplicación desarrollada se utilizó la configuración manual para que estos parámetros no afecten en la identificación del color por variaciones que se puedan tener en el autoajuste. En la Figura 6.5 se muestra la configuración de algunos de los parámetros de adquisición de la cámara utilizados.

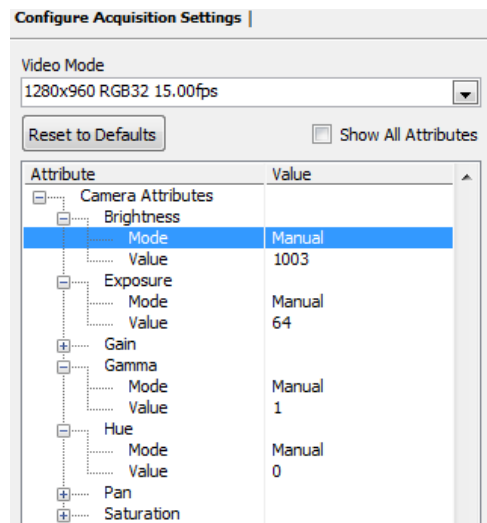


Figura 6.5 Configuración de parámetros de adquisición.

Después de la configuración de la cámara, en el software de reconstrucción desarrollado se puede seleccionar la opción de capturar imágenes o de utilizar las que han sido previamente capturadas. En el caso de utilizar archivos de imágenes existentes solo es necesario indicar la ubicación y nombre de la imagen. Para la captura es necesario realizar la proyección del patrón de franjas y después la captura, en cada uno de los corrimientos de las franjas se repite la proyección y se toma la imagen. El programa guarda los archivos para que puedan ser utilizados posteriormente. En la Figura 6.6 se muestra cómo se realiza la captura de la imagen y se guarda su archivo. Se utiliza un retardo entre cada una de las imágenes capturadas.

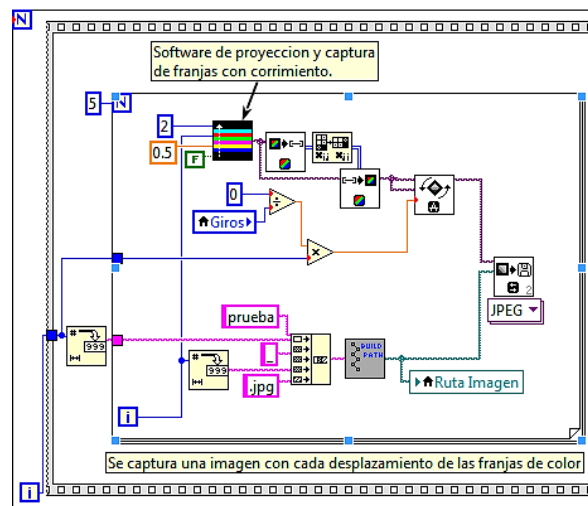


Figura 6.6 Software para captura de imágenes.

6.3 Procesamiento de imágenes

Todas las imágenes capturadas deben de pasar por una etapa de procesamiento para mejorar la calidad del color, reducir el tamaño de las imágenes y reducir las variaciones que existen en los píxeles de la imagen. En esta etapa también se implementa la ecuación de calibración desarrollada en el capítulo anterior para ajustar el color proyectado y capturado, asegurando que se aproxime más al color ideal.

6.3.1 Generación de máscara

Al capturar una imagen y aumentar el tamaño en los píxeles ubicados en las regiones oscuras, se observó que existen muchas variaciones como se muestra en la Figura 6.7. Estas variaciones no se perciben a simple vista, pero al analizar regiones pequeñas de la imagen resultan muy notorias y evitan identificar adecuadamente el color de los píxeles, por esto se decidió generar una máscara y eliminar estos errores de la imagen.

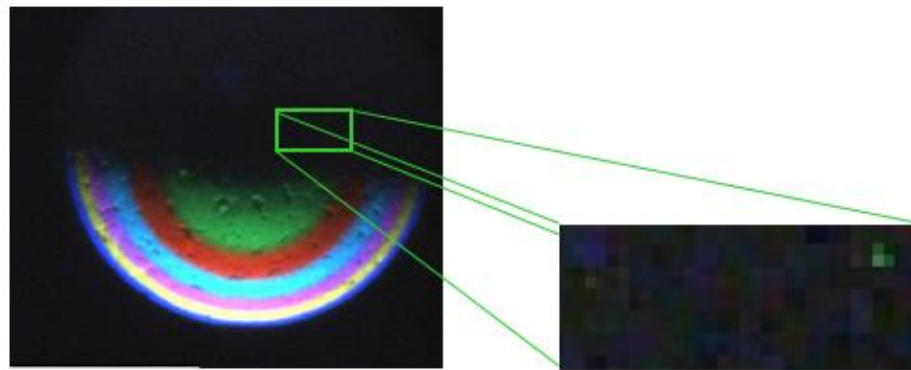


Figura 6.7 Imagen original.

Para llevar a cabo un filtrado de la imagen primero se extrae el plano de luminosidad, ya que éste contiene más información de las franjas de color proyectadas sobre el objeto. La Figura 6.8 muestra el plano de luminosidad que se extrajo de la imagen original, en donde se pueden apreciar las regiones donde el patrón fue proyectado.

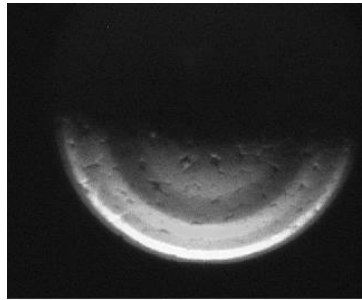


Figura 6.8 Plano de luminosidad.

Con una función de morfología llamada apertura se eliminan puntos brillantes aislados, la cual permite tener una mejor umbralización y por lo tanto una mejor máscara de la imagen. Enseguida para extraer la región donde se encuentran las franjas de color se utilizó una función de umbralización manual con un intervalo de umbral de $[0, 40]$, ya que es la región donde se encuentra más información de las franjas. Después se utilizó una función de ecualización para obtener la imagen de la máscara, como se muestra en la Figura 6.9.



Figura 6.9 Máscara de la imagen.

6.3.2 Enmascaramiento de la imagen

Para eliminar las variaciones que se observan en los píxeles del fondo se debe enmascarar la imagen con la máscara generada. Usando como ejemplo la imagen adquirida originalmente mostrada en la Figura 6.7, al aplicarle la máscara generada de la Figura 6.9 se cubren los píxeles que se encuentran en la región de fondo de la máscara. En la Figura 6.10 se muestra en azul los píxeles de la imagen original que serán enmascarados.

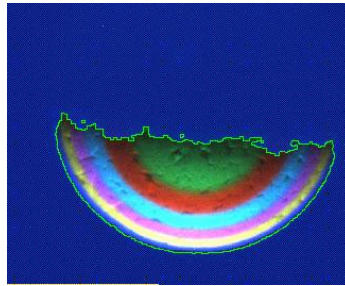


Figura 6.10 Enmascaramiento de la imagen.

En la Figura 6.11 se muestra la imagen enmascarada, en donde al aumentar una región se observan claramente los píxeles del fondo sin variaciones. Con la eliminación del fondo de la imagen se tiene una mejor identificación del color de los píxeles, sin tener errores al identificar el color de los píxeles que se encuentran en el fondo. El software desarrollado en LabVIEW® realiza el procedimiento para obtener la máscara y aplicarla a la imagen automáticamente (Apéndice E).

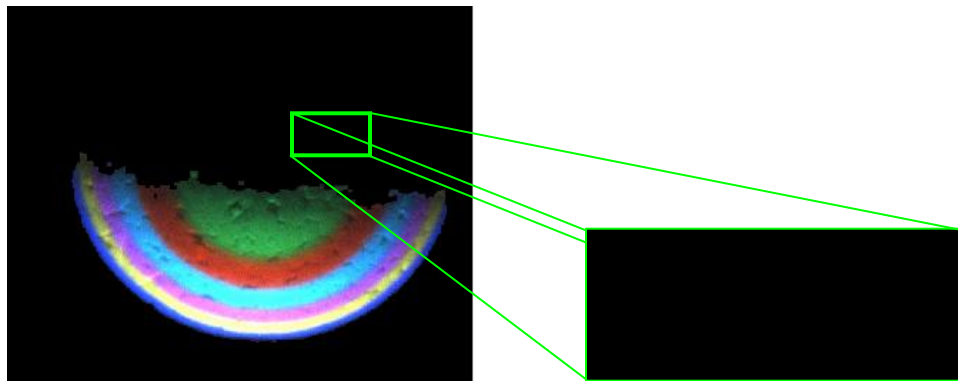


Figura 6.11 Imagen enmascarada.

6.3.3 Filtrado de planos de color

Esta etapa del procesamiento se utiliza para mejorar la calidad de la imagen y reducir variaciones en los píxeles de las franjas. Al aumentar la imagen en una zona donde se encuentran las franjas de color como se muestra en el ejemplo de la Figura 6.12, se puede observar que existen muchas variaciones en los píxeles de la zona de proyección. El software desarrollado en LabVIEW® realiza el procesamiento de la imagen, ver Apéndice F.

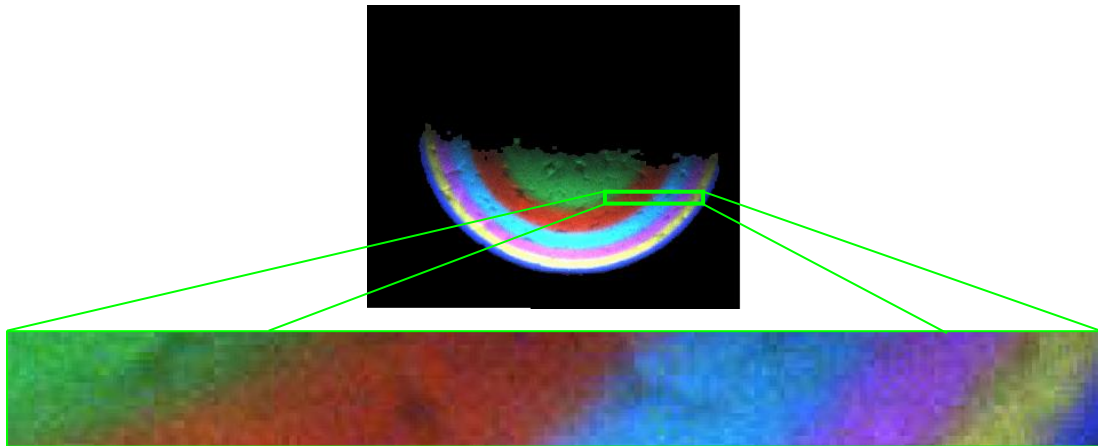


Figura 6.12 Imagen enmascarada aumentada.

Para poder reducir estas variaciones se extrajo cada uno de los planos de color RGB para poder filtrar la imagen más fácilmente. En cada uno de los planos se pueden apreciar claramente las variaciones de los píxeles, por esto se decidió filtrar cada uno de los planos utilizando filtros y funciones de morfología.

Para el filtrado de los planos de color se utilizó un filtro de suavizado de promedio local con el cual se eliminaron las variaciones de los píxeles y se obtuvo una mejor distribución de éstos en la imagen. En la Figura 6.13 se muestra el proceso de extracción de los planos de color y el filtrado de cada uno de ellos. Después de filtrar cada uno de los planos, estos se combinan de nuevo para formar la imagen de color filtrada.

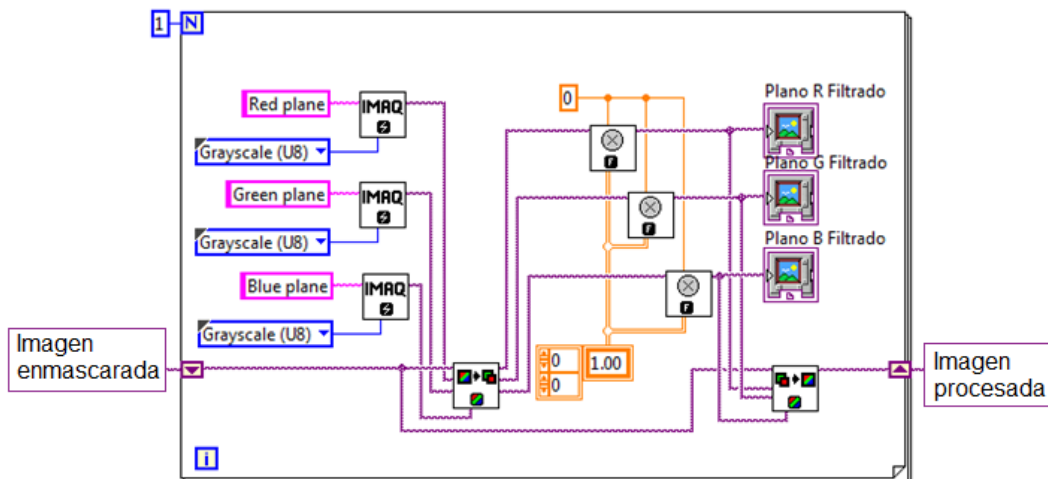


Figura 6.13 Proceso de filtrado de la imagen.

En la Figura 6.14 se muestra el resultado de la imagen filtrada y se observa claramente que se tiene una mejor calidad de la imagen en donde se aprecian mejor los colores de las franjas. Al aumentar la imagen filtrada se pueden observar los detalles, con el proceso de filtrado se obtienen franjas de color más uniformes mejorando en gran medida la identificación de color de cada uno de los píxeles.

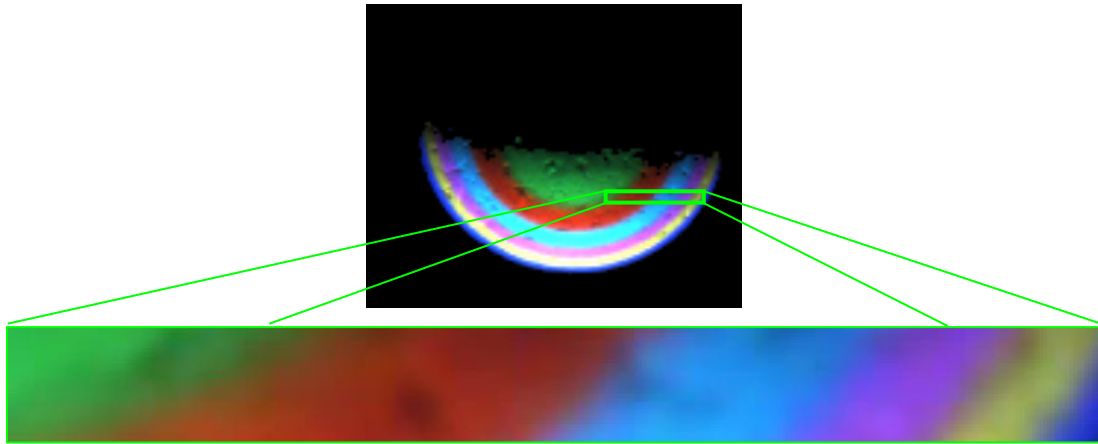


Figura 6.14 Imagen filtrada aumentada.

Después se seleccionó una región de interés para acelerar el análisis de la imagen, ya que existen muchas regiones de fondo que no son necesarias en la etapa del análisis. En la Figura 6.14 se mostró un ejemplo de una imagen filtrada en donde se puede apreciar que existe una gran parte de la imagen que no contiene información de color, al seleccionar una región de interés se obtiene una imagen más pequeña como se observa en la Figura 6.15 disminuyendo así los tiempos de análisis y reconstrucción.

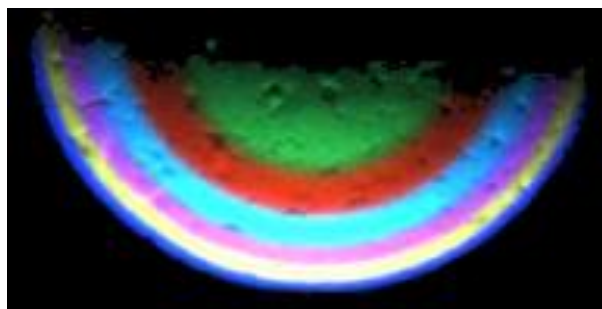


Figura 6.15 Región de interés de la imagen.

6.3.4 Calibración de color

Durante esta etapa se hizo una corrección del color capturado para tener una mejor aproximación al color ideal que fue generado, corrigiendo la distorsión generada por el proyector y el sensor de la cámara. Para poder implementar este paso de calibración se utilizó la ecuación 6.1 descrita en el capítulo anterior, para la cual fue necesario primero convertir el modelo de la imagen a HSL y compensar únicamente el plano de matiz que contiene la información del color. Para calibrar el plano de matiz para cada píxel $H_{CAL}(x, y)$ se considera el valor capturado con la cámara $H(x, y)$ y se le agregan los valores de corrección que se obtuvieron con la caracterización de la cámara en el rojo $X_R(x, y)$, verde $X_G(x, y)$ y azul $X_B(x, y)$. También se deben agregar los valores de corrección del proyector para los colores de referencia rojo Y_R , verde Y_G y azul Y_B .

$$H_{CAL}(x, y) = H(x, y) + [X_R(x, y) + X_G(x, y) + X_B(x, y)] + [Y_R + Y_G + Y_B] \quad (6.1)$$

Para cada píxel de la imagen se lleva a cabo la misma corrección a través del programa desarrollado en LabVIEW® (Apéndice G), en la cual se consideran las imágenes de referencias tomadas durante la calibración descrita en el capítulo anterior. En la Figura 6.16 (a) se muestra una sección de la imagen procesada y en la Figura 6.16 (b) la misma región después de implementar la calibración del color con la ecuación propuesta.

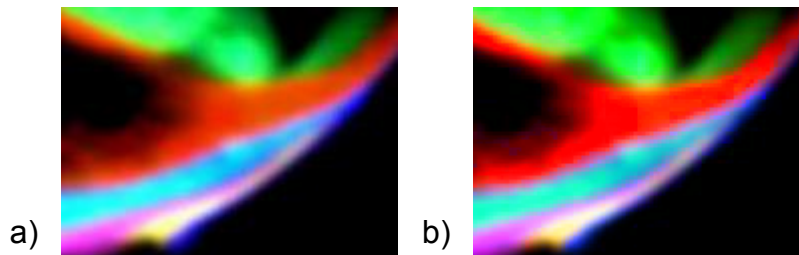


Figura 6.16 Imagen capturada, a) procesada y b) calibración de color.

El procesamiento y calibración del color de la imagen se logran hacer rápidamente, por lo que no incrementan significativamente el tiempo de reconstrucción. Esta etapa se repite con cada una de las imágenes obtenidas durante el corrimiento de las franjas

y el giro del objeto en la montura. A simple vista es fácil distinguir los cambios en algunos colores después de implementar la ecuación, sin embargo, no en todas las franjas es tan visible la diferencia. Para la etapa de identificación de matiz es muy importante realizar la calibración para mejorar la calidad del color y así lograr clasificarlos con mayor precisión.

Para comparar el color que se percibe en la imagen solo con el procesamiento, y después de implementar la calibración, se utilizó un software de colorímetro digital el cual proporciona los valores RGB de un píxel. Se compararon los valores que se obtienen en la franja verde, roja y azul, ya que fueron los colores de referencia con los que se realizó la calibración. En la Figura 6.17 (a) se puede observar la imagen capturada con el procesamiento y el valor que se obtiene con el colorímetro. En la Figura 6.17 (b) se observa la imagen procesada que utiliza la ecuación de calibración desarrollada, también se puede ver el valor RGB que detecta el colorímetro en un píxel de las imágenes. Se puede ver que el canal verde después de la calibración disminuye, pero también se reduce el cruce de color con los canales rojo y azul, lo cual lleva a una mejor identificación de color.

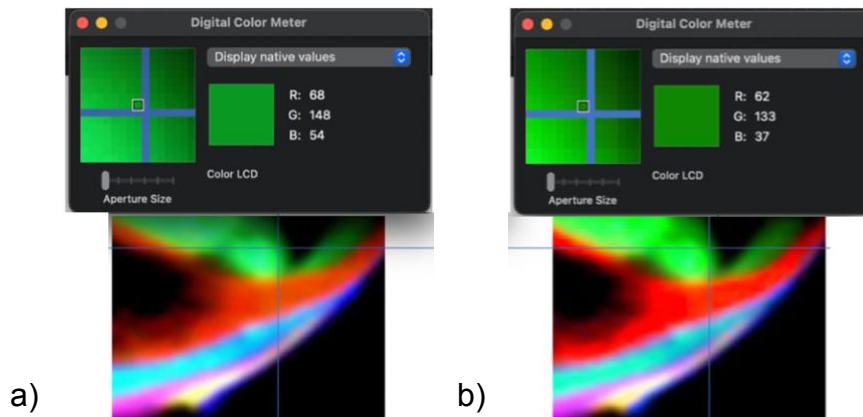


Figura 6.17 Valores RGB de la franja verde en colorímetro digital de la imagen, a) procesada y b) con calibración de color.

En la Figura 6.18 se pueden observar los resultados obtenidos para la franja de color rojo, donde se reduce levemente el cruce de color con el verde y se incrementa el valor del canal rojo.

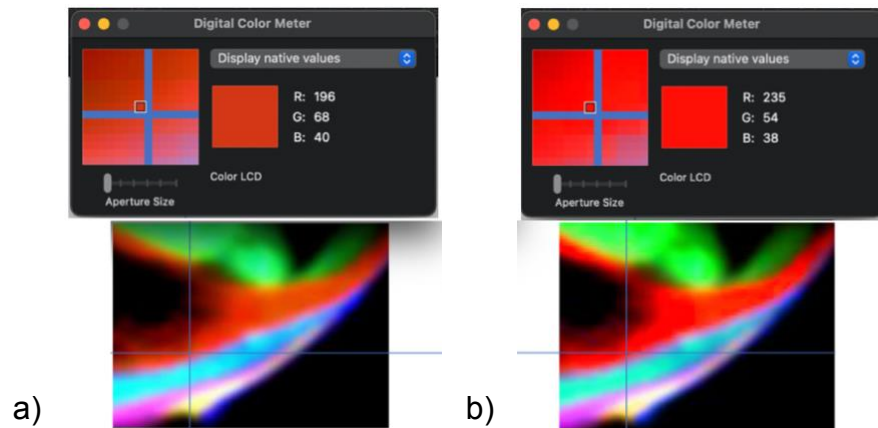


Figura 6.18 Valores RGB de la franja roja en colorímetro digital de la imagen, a) procesada y b) con calibración de color.

En la Figura 6.19 se pueden observar los resultados obtenidos con la franja de color azul, en la cual se observa que después de la calibración aumenta el valor del azul pero también el cruce de color con el rojo y verde. Sin embargo, la cámara logra captar con buena calidad este color donde el solapamiento de los otros canales es muy leve, por lo que es uno de los colores que se puede identificar con mayor facilidad con o sin calibración.

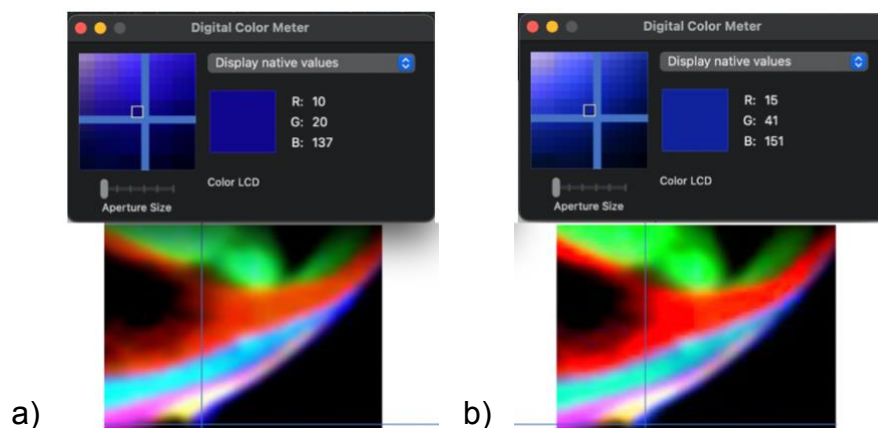


Figura 6.19 Valores RGB de la franja azul en colorímetro digital de la imagen, a) procesada y b) con calibración de color.

Después de realizar el procedimiento de calibración de color, éste se implementó durante la siguiente etapa del procesamiento y ayudó a mejorar la identificación de color. En el siguiente capítulo se describe el proceso desarrollado así como diferentes métodos para detectar el valor de matiz.

CAPÍTULO VII

IDENTIFICACIÓN DE COLOR

Como se ha mencionado anteriormente uno de los pasos más importantes para la técnica propuesta es identificar adecuadamente el color de las franjas proyectadas. Para llevar a cabo este procedimiento se evaluaron dos métodos de identificación de color en LabVIEW®, por medio de un clasificador de color y por rangos de matiz.

7.1 Clasificador de color

Con el primer método propuesto se identifica el color de las imágenes procesadas utilizando el modelo RGB. Implementando un instrumento virtual de LabVIEW® llamado clasificador de color. El cual permite analizar regiones de la imagen y determinar a qué clase o tipo de color pertenecen. El clasificador se desarrolla en dos etapas: entrenamiento y clasificación, que se describen a continuación.

7.1.1 Etapa de entrenamiento

Mediante una interfaz de usuario se realizó el entrenamiento de clasificación en IMAQ Vision, donde se determinaron las clases o tipos de color que pueden estar presentes en la imagen. Después se tomaron muestras de los diferentes tonos o tipos de color que pertenecen a una misma clase, esta información se guardó en un archivo llamado clasificador.

Se definieron 7 clases diferentes: azul, amarillo, magenta, cian, rojo, verde y negro. Después se utilizó una imagen procesada de las franjas proyectadas y se tomaron muestras de cada color en diferentes puntos de la imagen. El clasificador se puede editar para crear nuevas clases o muestras y para eliminar las ya existentes.

Esta etapa de entrenamiento se realizó una sola vez para crear el archivo clasificador. Una vez que se determinaron las clases de color y se tomaron las muestras, ya no resulta necesario crear un archivo nuevo con cada reconstrucción, solo se toman más muestras cuando sea necesario.

7.1.2 Etapa de clasificación

Durante esta etapa se clasifican regiones de píxeles de la imagen en las diferentes clases establecidas. Esta clasificación se hace obteniendo dos vectores de color: uno de la muestra conocida y otro de la región que se está analizando. Se compara el vector de la región que se está analizando con los vectores de las muestras conocidas y se clasifica en alguna clase dependiendo de qué tan similar es el vector de la región con el de alguna muestra. Este vector de color está compuesto por los histogramas de los planos de matiz (*hue*), saturación (*saturation*) luminosidad o intensidad (*luminosity or intensity*). En la interfaz de entrenamiento se pueden observar los vectores de color de la muestra conocida (Figura 7.1) y de la región analizada (Figura 7.2). En los ejemplos que se muestran a continuación se pueden observar los vectores de color que obtiene la interfaz de entrenamiento para la región conocida y la analizada, se puede ver claramente que el vector de la región de la imagen que se está analizando corresponde a la clase magenta ya que sus histogramas del vector de color son muy similares a los histogramas del vector de color de una de las muestras conocidas dentro de esta clase.

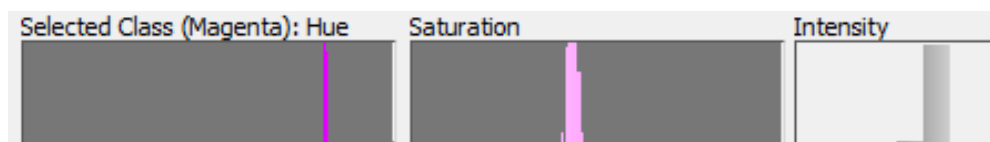


Figura 7.1 Vector de color de la muestra conocida.

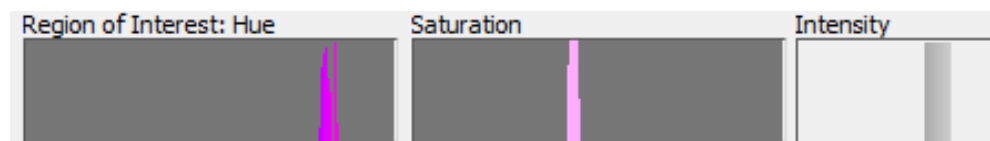


Figura 7.2 Vector de color de la región analizada.

El ejemplo de clasificación anterior se hizo manualmente en la interfaz de entrenamiento y seleccionando la región que se desea analizar. Para realizar el análisis automáticamente de la imagen completa se toman regiones de cuatro píxeles, ya que es la región más pequeña que se puede seleccionar para llevar a cabo la clasificación. Para analizar la imagen se obtiene un cuadro de cuatro píxeles, se selecciona el archivo clasificador y se determina a qué clase corresponde esa región de la imagen. El cuadro que se analiza se recorre un píxel a la derecha y se repite el proceso. Lo anterior se repite una y otra vez hasta terminar el primer renglón de píxeles de la imagen y después se recorre el cuadro un píxel hacia abajo y nuevamente se repiten estos pasos hasta clasificar cada uno de los píxeles. En la Figura 7.3 se muestra la sección del software donde se selecciona el cuadro de píxeles que se analizará, se selecciona el píxel que se está analizando y tres píxeles vecinos.

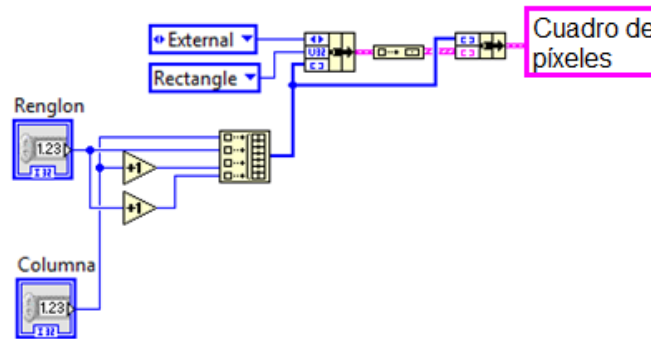


Figura 7.3 Selección de cuadro de píxeles.

En la Figura 7.4 se muestra la sección del software donde se utiliza la herramienta del clasificador de color. Los datos que se necesitan son el archivo del clasificador, la imagen original filtrada y el cuadro de píxeles que se analizará. El clasificador regresa el nombre de la clase de color a la cual pertenece la región analizada.

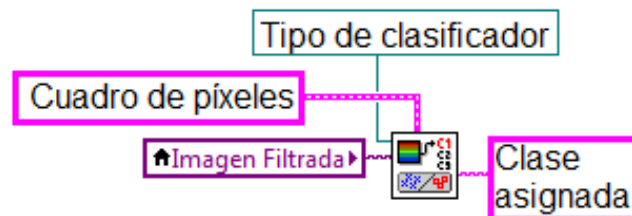


Figura 7.4 Clasificador de color.

Este método de identificación es simple de utilizar, permite definir la cantidad de colores que se van a clasificar y tomar las muestras que sean necesarias para clasificar adecuadamente todos los píxeles de la imagen. Sin embargo, una de las mayores desventajas de este método es el tiempo que consume para realizar la clasificación de la imagen completa. Como se analizan ventanas de cuatro píxeles se debe realizar el análisis en pequeñas regiones, por lo cual el tiempo de identificación depende del tamaño de la imagen y puede llevar hasta un minuto para realizar únicamente esta etapa. Otra de las desventajas es que para realizar la identificación no se analiza cada píxel individualmente, sino que se considera la información que existe en los vecinos, clasificando el color del píxel dependiendo de los colores que se tengan alrededor. Por estas desventajas se buscó un método adicional para realizar la identificación de color.

7.2 Rangos de matiz

En este método de identificación propuesto se extrae el plano de matiz de la imagen, el cual contiene la información del color y se ignoran los planos de saturación y luminosidad. Como se mencionó anteriormente el matiz es representado con diferentes ángulos y ya que el patrón de franjas generado consiste únicamente de seis franjas de color se puede dividir el plano en seis rangos diferentes de 60° , como se muestra en la Figura 7.5. Así dependiendo del valor de matiz que existe en cada píxel se puede llevar a cabo la clasificación dentro de uno de los rangos e identificar el color en cada punto de la imagen de forma simultánea. Esta clasificación se puede implementar en LabVIEW® al extraer el plano de matiz y establecer los valores para cada color establecido. Dependiendo del rango identificado se asigna una etiqueta del valor asociado a cada píxel de la imagen que se analiza (Apéndice H).

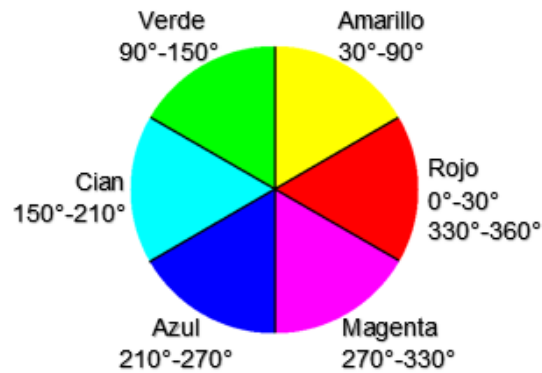


Figura 7.5 Rangos de matiz.

Para evaluar los resultados obtenidos con el método propuesto se llevó a cabo la identificación de color en una imagen capturada del patrón proyectado y al clasificar cada píxel dentro de uno de los rangos, se generó digitalmente una imagen en la que se asignó a cada píxel el valor ideal del color correspondiente al rango en el que fue clasificado como se muestra en la Figura 7.6. De esta forma es mucho más sencillo poder observar los resultados obtenidos. En las pruebas realizadas se observa que existen píxeles en donde el matiz no fue clasificado correctamente, principalmente en las franjas cian, magenta y amarilla. También en las zonas donde se tiene la unión de dos colores distintos es mas difícil la identificación correcta del color y en zonas donde se tienen sombras sobre el objeto provocadas por su topografía.

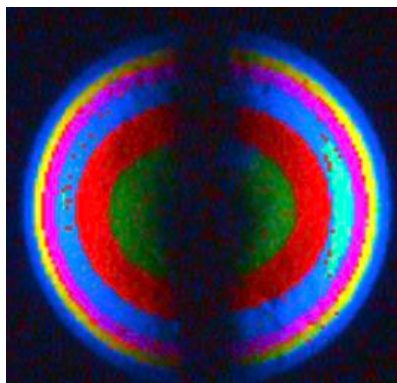


Figura 7.6 Identificación de color con rangos de matiz.

Para mejorar la clasificación del color en las zonas donde se tiene mayor dificultad para la identificación correcta, se modificaron los rangos del matiz. En donde se

extendieron los valores correspondientes al cian, magenta y amarillo que son más difíciles de identificar y de separar de los colores primarios. Para los colores rojo, verde y azul se hizo más pequeño el rango ya que se pueden identificar con mayor facilidad. La modificación se muestra en la Figura 7.7. Estos valores pueden ser modificados según la calidad de la cámara utilizada y la capacidad de capturar diferentes colores. Más franjas de distintos colores podrían ser utilizadas si se lograra tener una mejor separación de los colores, pero los rangos de cada color serían más pequeños y eso complicaría la separación adecuada de los diferentes colores.

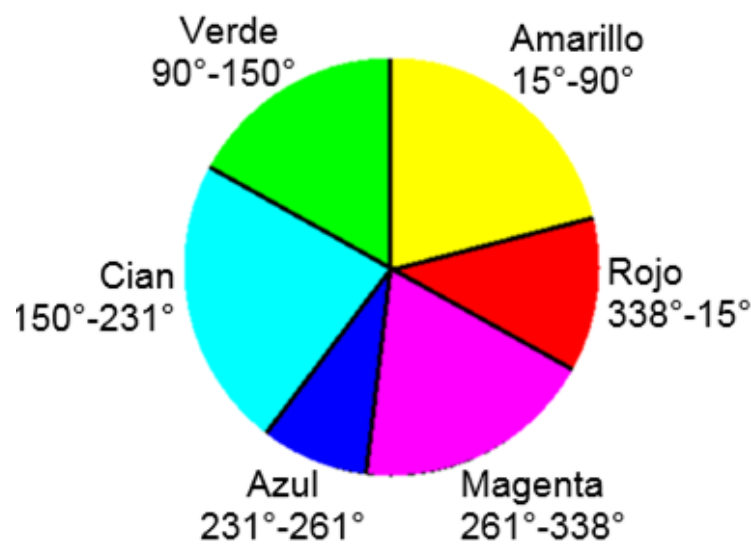


Figura 7.7 Rangos de matiz corregidos.

Al llevar a cabo la evaluación con los rangos modificados de matiz se generó digitalmente la imagen del patrón proyectado en la que se asignó a cada píxel, el valor ideal del color correspondiente al rango en el que fue clasificado como se muestra en la Figura 7.8. Con la modificación de los rangos se puede observar que se mejoró considerablemente la identificación de los diferentes píxeles, aunque aun se tiene dificultad en ciertas regiones. Aun cuando no se puede tener una identificación correcta de todos los píxeles en la imagen, al implementar el corrimiento del patrón y procesar múltiples imágenes de la misma región del objeto se puede compensar este problema ya que se tiene más información de la superficie.

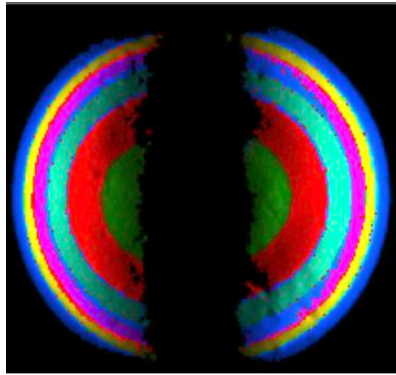


Figura 7.8 Identificación de color con rangos de matiz corregidos.

Este método de identificación de color tiene grandes ventajas cuando se compara con el clasificador de color de LabVIEW®. Una de las ventajas es que permite considerar únicamente el valor de matiz sin importar la saturación o luminosidad de la imagen, al tratar de identificar el color aun cuando existen variaciones en la intensidad por las sombras que existen sobre la superficie, dando una gran ventaja. Otra ventaja es que permite realizar la identificación de cada píxel según el valor de matiz individual, en lugar de clasificar ventanas de cuatro píxeles como en el método anterior considerando los vecinos del píxel analizado. Además se reduce considerablemente el tiempo de procesamiento ya que se hace la clasificación de todos los píxeles de forma simultánea sin importar el tamaño de la imagen en lugar de hacer un barrido de la ventana a analizar a través de toda la imagen.

En la Figura 7.9 se muestra la comparación de la clasificación de color con los dos métodos, generando una imagen digital en donde se observa el color identificado en cada píxel y el tiempo que tardó cada método para la clasificación. Es posible observar que el método con los rangos de matiz permite tener una mejor identificación del color de las franjas y consume menor tiempo, por ello se implementó para el proceso de reconstrucción, aunque el software desarrollado permite seleccionar cualquiera de los dos métodos para la etapa de identificación.

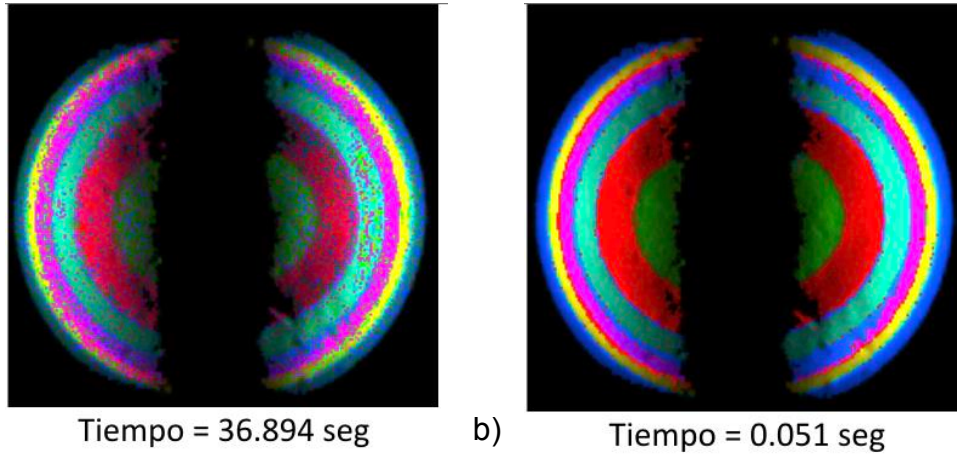


Figura 7.9 Identificación de color con, a) clasificador de color, b) rangos de matiz.

Una vez que se ha identificado el color de cada píxel y se ha asignado la etiqueta de color correspondiente a toda la imagen, se repite el mismo proceso de identificación para todas las imágenes adquiridas con los corrimientos de las franjas y giros del objeto. Después es necesario asignar los valores de altura según el color para lograr obtener la reconstrucción del objeto.

En la siguiente sección se describe el análisis realizado para la asignación de valores de altura de cada color y obtención de las reconstrucciones tridimensionales.

CAPÍTULO VIII

ANÁLISIS, MAPAS DE ALTURA Y FUSIÓN

Después de asignar una etiqueta de color a cada píxel en las imágenes adquiridas es necesario asignar un valor de altura real previamente calibrado, en esta etapa un mapa de alturas es creado para cada imagen adquirida del objeto, obteniendo finalmente un mapa promediado para cada giro del objeto y luego se lleva acabo la fusión de los diferentes mapas para lograr obtener la reconstrucción tridimensional. A continuación, se hace una descripción del proceso establecido para la obtención de la información de altura y la reconstrucción tridimensional.

8.1 Altura real

Primero fue importante establecer cuál es el valor de altura que se debe asignar a cada uno de los colores. Para lograr determinar el tamaño real de las franjas y los corrimientos realizados, fue necesario medir directamente los valores sobre una pantalla plana de referencia a una determinada distancia con un vernier digital y después determinar el rango de alturas para cada franja de color, Figura 8.1

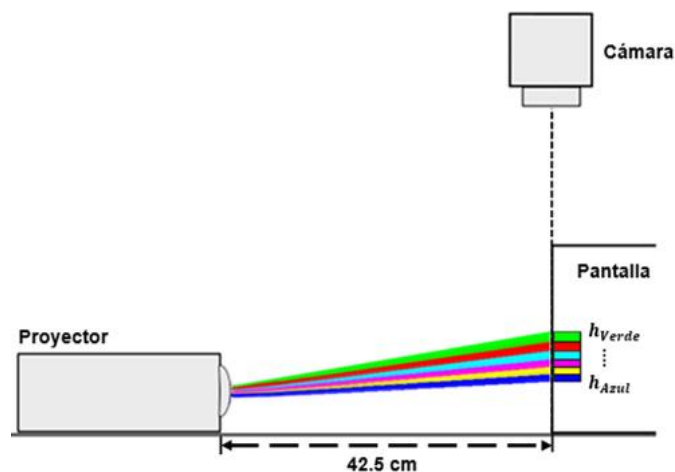


Figura 8.1 Medición de franjas en pantalla de referencia a 42.5 cm.

Colocando la pantalla a 42.5 cm del proyector, en el eje óptico de la cámara, se encontró que cada franja medía 2.6 mm y con cada corrimiento cada franja tiene un desplazamiento de 0.52 mm hacia arriba. Con estos valores se determinó el valor de altura que se puede asignar a cada color identificado. Es importante recordar que el fondo del patrón de franjas es de color negro para eliminar regiones de no interés en donde se pueda tener alguna alteración en el color detectado, por lo cual el color negro siempre tendrá un valor de altura de 0 mm para no alterar las reconstrucciones. Utilizando los valores anteriores, se obtuvo el siguiente rango de valores para cada color en cada desplazamiento, Tabla 8.1.

Tabla 8.1 Valores de altura máxima a 42.5 cm.

Valor máximo de altura para cada color								
		Negro	Azul	Amarillo	Magenta	Cían	Rojo	Verde
Corrimiento	0	0 mm	2.6 mm	5.2 mm	7.8 mm	10.4 mm	13.0 mm	15.6 mm
	1	0 mm	3.12 mm	5.72 mm	8.32 mm	10.92 mm	13.52 mm	16.12 mm
	2	0 mm	3.64 mm	6.24 mm	8.84 mm	11.44 mm	14.04 mm	16.64 mm
	3	0 mm	4.16 mm	6.76 mm	9.36 mm	11.96 mm	14.56 mm	17.16 mm
	4	0 mm	4.68 mm	7.28 mm	9.88 mm	12.48 mm	15.08 mm	17.68 mm

Como se puede observar se puede asignar un valor de altura real directamente medido sobre una pantalla de referencia, sin embargo, los valores asignados corresponden a la altura máxima que puede tener cada franja de color. Para tener mejores resultados se realizó un análisis en el cual se pudiera determinar una ecuación lineal del rango de valores de altura que puede tener cada color dentro del campo de visión de la cámara y se utilizó un valor medio de altura en lugar del máximo que se puede tener para tener una reconstrucción más cercana a las dimensiones reales del objeto posible.

8.1.1 Pendiente de altura

Para mejorar las reconstrucciones obtenidas se asignó una rampa de valores de altura en lugar de un valor fijo a cada color debido a la apertura del proyector y

divergencia de la proyección. Con este proceso se tomaron las medidas del tamaño de las franjas colocando la pantalla en dos ubicaciones distintas, como se muestra en la Figura 8.2.

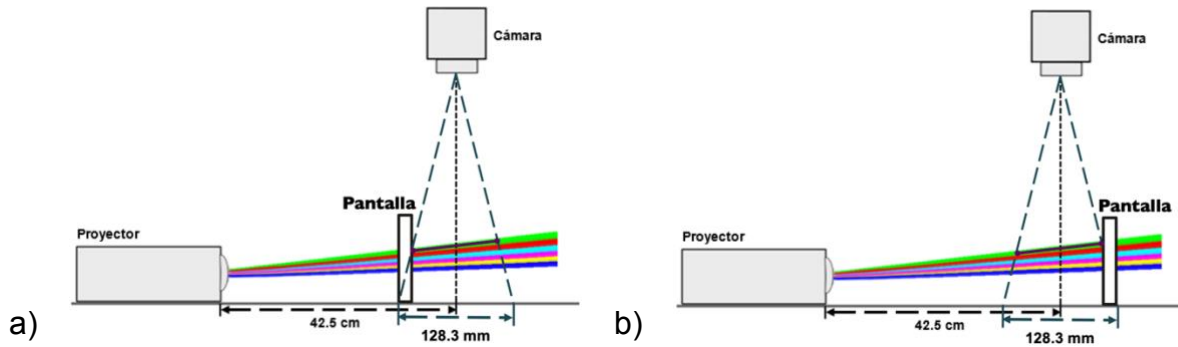


Figura 8.2 Medición de franjas en pantalla de referencia, a) 36.085 cm, b) 48.915 cm.

Colocando la pantalla a 36.085 cm del proyector, se encontró que cada franja medía 2 mm y con cada corrimiento cada franja tiene un desplazamiento de 0.4 mm hacia arriba. Al desplazar la pantalla a 48.915 cm, las franjas tienen un grosor de 3.2 mm y el corrimiento es de 0.64 mm. De acuerdo a lo anterior, se determina que no es posible asignar un solo valor de altura a cada color, se debe de cambiar dependiendo de la distancia a la que se encuentre el objeto del proyector. Con estos valores es posible encontrar una función lineal con la cual se pueda calcular la altura real del objeto dependiendo del píxel que esté siendo analizado, para que el valor asignado aumente conforme el patrón proyectado se aleje del proyector.

Considerando la proyección de cada franja se tomaron los valores de altura para ambas distancias y se calculó la pendiente de proyección para cada color. En la Figura 8.3 se muestra el ejemplo de la proyección de la franja azul, en la cual se pueden tomar los valores de altura para la zona más cercana al proyector $h_1 = 1 \text{ mm}$ y la más lejana $h_3 = 1.6 \text{ mm}$ que se encuentran dentro del campo de visión. El FOV es de 128.3 mm, pero se conoce el tamaño de la imagen que es de 1280 píxeles, que es la distancia dentro de la cual se va a cambiar el valor de altura conforme lo que corresponda. Con estos datos se puede calcular la ecuación 8.1 para obtener la pendiente de proyección para la franja de color azul.

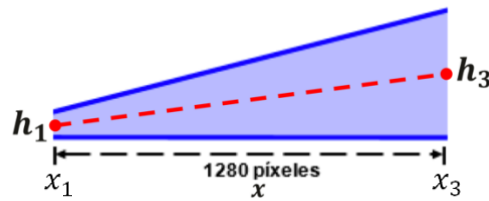


Figura 8.3 Pendiente de proyección para franja azul.

$$m_{azul} = \frac{h_3 - h_1}{x_3 - x_1} \quad (8.1)$$

De esta forma se encontró que la pendiente de la franja azul $m_{azul} = 0.4688 \times 10^{-6}$ representa la razón con la cual el valor de altura va a cambiar con cada píxel. De igual manera se calculó la pendiente de proyección para cada color dependiendo de los valores de altura encontrados dentro del FOV o 1280 píxeles de la imagen. En la Tabla 8.2 se muestran los resultados de las pendientes y los valores de altura medidos.

Tabla 8.2 Pendientes de proyección calculadas para cada color.

		Valores de altura media y pendiente		
		Altura	Altura	Pendiente
		h_1	h_3	m
Franjas de color	Azul	1.0 mm	1.6 mm	0.4688×10^{-6}
	Amarilla	3.0 mm	4.8 mm	1.4063×10^{-6}
	Magenta	5.0 mm	8.0 mm	2.3438×10^{-6}
	Cian	7.0 mm	11.2 mm	3.2813×10^{-6}
	Rojo	9.0 mm	14.4 mm	4.2188×10^{-6}
	Verde	11.0 mm	17.6 mm	5.1563×10^{-6}

Al obtener la pendiente para cada franja de color es posible calcular el valor de altura con la ecuación 8.2 en la cual el valor de altura $h(x)$ se estima dependiendo del píxel x que esté siendo analizado, la pendiente m de la franja de color que se haya identificado y b el valor inicial de la franja o h_1 donde, después de cada corrimiento este valor se incrementará por el desplazamiento de las franjas hacia arriba. Estos valores iniciales serán distintos para cada color y con cada corrimiento. En la Tabla 8.3

se muestran los valores de altura obtenidos con la ecuación 8.2 en 0 píxeles (36.085 cm del proyector), 640 píxeles (42.5 cm) y 1280 píxeles (48.915 cm), en donde se puede comparar el valor de altura previamente medido en estos tres puntos con la pantalla de referencia y el valor calculado con la ecuación propuesta. Se puede observar que se obtiene la altura real con los datos descritos, por lo cual con esta ecuación implementada en el software diseñado en LabVIEW® se lleva a cabo el cálculo de las pendientes y los incrementos de los valores de altura para cada corrimiento, dependiendo de la etiqueta de color detectada en cada píxel se lleva a cabo la asignación de altura (Apéndice I).

$$h(x) = mx + b \quad (8.2)$$

Tabla 8.3 Valores de altura calculados en 0, 640 y 1280 píxeles.

		Valores calculados con pendiente media		
		Altura a 36.085 cm $h(0)$	Altura a 42.5 cm $h(640)$	Altura a 48.915 cm $h(1280)$
Franjas de color	Azul	1.0 mm	1.3 mm	1.6 mm
	Amarilla	3.0 mm	3.90 mm	4.8 mm
	Magenta	5.0 mm	6.50 mm	8 mm
	Cian	7.0 mm	9.10 mm	11.2 mm
	Rojo	9.0 mm	11.70 mm	14.4 mm
	Verde	11.0 mm	14.30 mm	17.6 mm

Después de asignarle un valor de altura a cada uno de los píxeles dependiendo del color que haya sido identificado se obtiene un arreglo bidimensional con todos los valores de altura asignados a cada píxel, este arreglo es el que se utiliza para obtener la reconstrucción tridimensional en la etapa final.

8.2 Mapas de altura

En esta etapa se utiliza el arreglo obtenido anteriormente para adquirir una imagen en escala de grises a la que se le llama mapa de altura del objeto, aquí cada nivel de gris representa un valor de altura diferente y contiene toda la información de la superficie del objeto. Al realizar 5 proyecciones distintas, se obtienen 5 mapas de altura distintos para una misma sección del objeto, se hace un filtrado de los mapas para reducir huecos y variaciones que pueden afectar a la reconstrucción. Al desplazar las franjas sobre el objeto se logra obtener más información de la superficie. En la Figura 8.4 se muestran los diferentes mapas de altura obtenidos con una esfera de unicel, en la cual a simple vista parecen muy similares, si embargo en cada corrimiento el valor de altura se incrementa y esto permite tener más información de esta región del objeto.

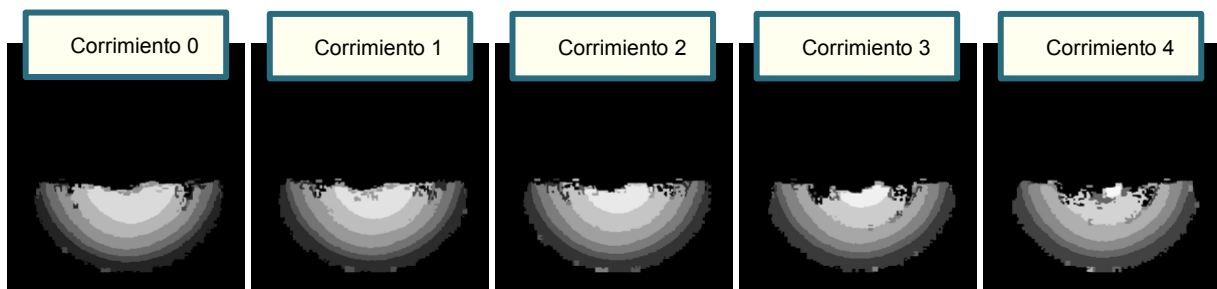


Figura 8.4 Mapas de altura con cada corrimiento.

Para filtrar el mapa de altura obtenido se desarrolló el software que se muestra en la Figura 8.5, en el que se utilizó una combinación de diferentes filtros y funciones de transformación morfológica como: filtro de orden N, filtro pasa bajos, mediana automática, clausura apropiada, clausura y apertura. Estos filtros permiten llenar pequeños huecos que pueden encontrarse en los mapas de altura y reducir variaciones significativas que se puedan presentar al identificar los colores de las franjas, sin cambiar las características principales del resultado obtenido.

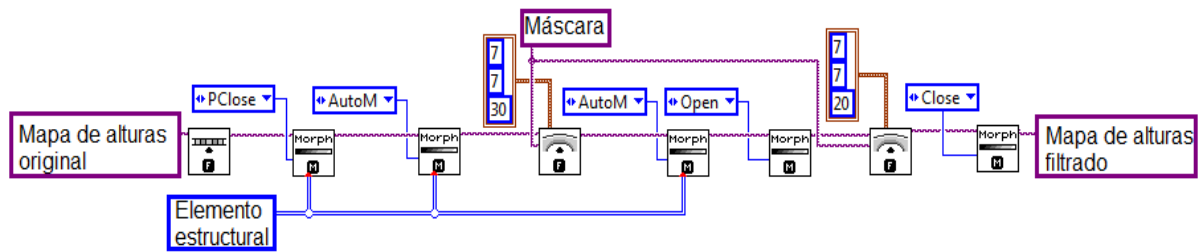


Figura 8.5 Software para filtrado del mapa de altura.

Después se hace una suma de los píxeles de los cinco mapas de altura y se obtiene el promedio de los píxeles, con esto se genera un solo mapa de altura promediado como se muestra en la Figura 8.6. Se puede observar que se tiene una distribución más uniforme de tonos grises, por lo que se tiene más información de la superficie tridimensional.

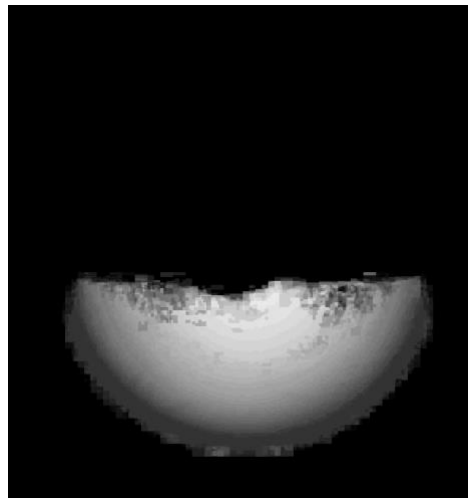


Figura 8.6 Mapa de altura promediado.

Este proceso para la obtención del mapa de altura promediado del objeto se debe repetir según la cantidad de giros del objeto que se hayan realizado, de forma preseleccionada se tienen 5 giros de 60° del objeto por lo cual se obtienen 6 mapas de altura de las diferentes regiones como se muestra en Figura 8.7.

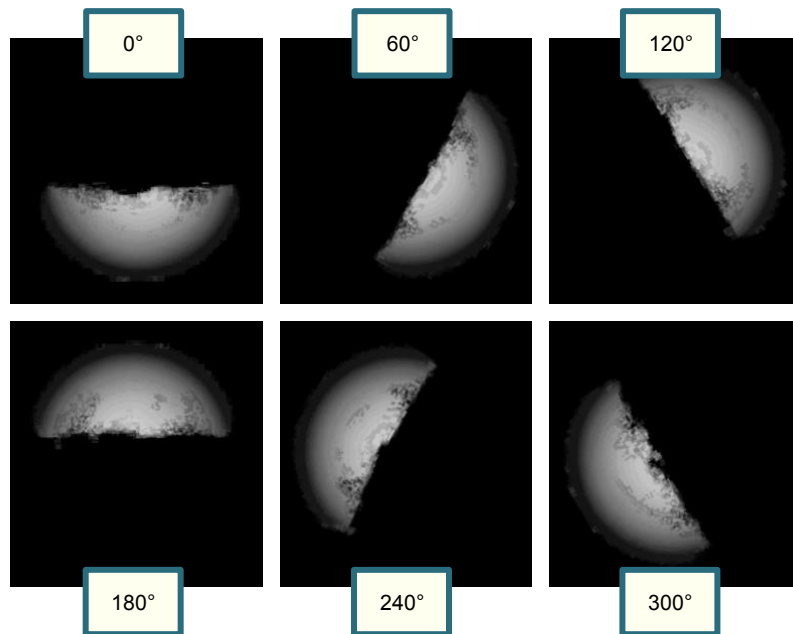


Figura 8.7 Mapas de altura con cada giro.

Al tener información de diferentes regiones del objeto es necesario llevar un procedimiento de fusión en el cual se pueda unir la información adquirida en un único mapa de altura. A continuación, se hace una descripción de los diferentes métodos de fusión utilizados.

8.3 Fusión de mapas de altura

Para llevar a cabo la fusión de los diferentes mapas de altura se compararon diferentes métodos de fusión que permitieran unir las diferentes imágenes y generar un único mapa que contenga la información completa de las alturas del objeto. Existe una gran variedad de métodos de fusión que se pueden utilizar, en ellos se pueden tomar dos mapas existentes y seleccionar cuál valor será asignado al mapa fusionado. En el capítulo II se describieron algunas técnicas de fusión que fueron utilizadas en esta etapa.

8.3.1 Transformada discreta de Wavelet

Como se mencionó anteriormente permite descomponer la imagen en diferentes niveles con bandas de diferentes frecuencias para representar las características de la imagen, al hacer la descomposición se pueden separar los detalles. El proceso general para realizar la fusión con este algoritmo es el siguiente: primero se utiliza la DWT para crear la descomposición de la imagen, después se fusiona cada nivel con algún método de fusión y por último se lleva a cabo la transformada discreta inversa de wavelet (IDWT) para reconstruir la imagen fusionada en el dominio espacial. Este proceso de fusión se muestra en la Figura 8.8, en donde se muestra como se lleva a cabo la fusión de dos mapas de altura de una esfera de unicel, se lleva a cabo la descomposición en dos niveles y la fusión con el método del máximo simple en cada nivel.

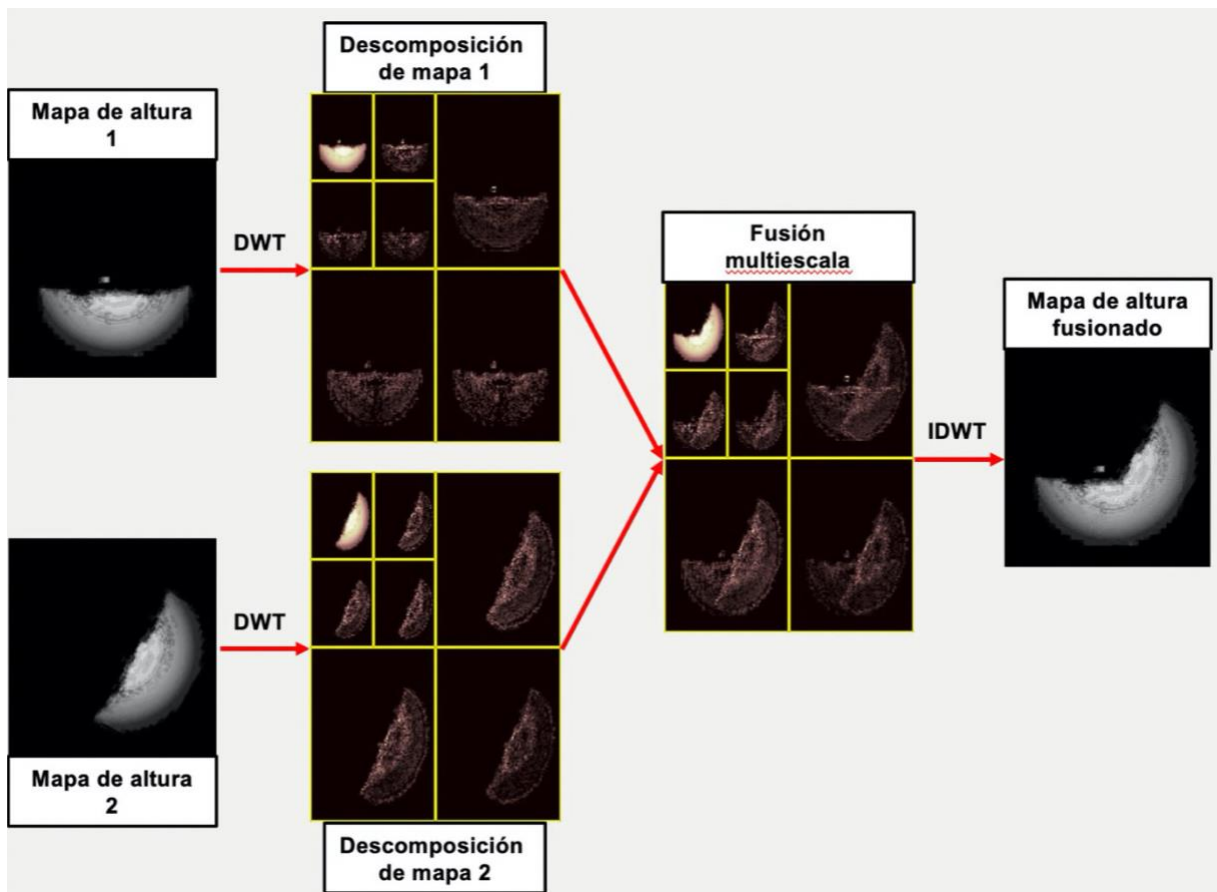


Figura 8.8 Fusión con DWT.

Se puede observar que la fusión se va a realizar con dos mapas de altura y después se irán fusionando los mapas subsecuentes al obtenido con DWT. Este procedimiento de fusión se puede llevar a cabo a través de una herramienta de MATLAB® que permite la descomposición de la imagen en diferentes niveles y utilizar distintos métodos de fusión. En la Figura 8.9 se muestra la herramienta utilizada, en la cual se permite seleccionar los dos mapas de altura, se lleva a cabo la descomposición en dos o más niveles, luego la fusión con el método del máximo simple para las características de la imagen y se obtiene el mapa fusionado. Este procedimiento se repitió para todos los mapas de altura obtenidos, hasta tener un mapa de altura único como se muestra en la Figura 8.10.

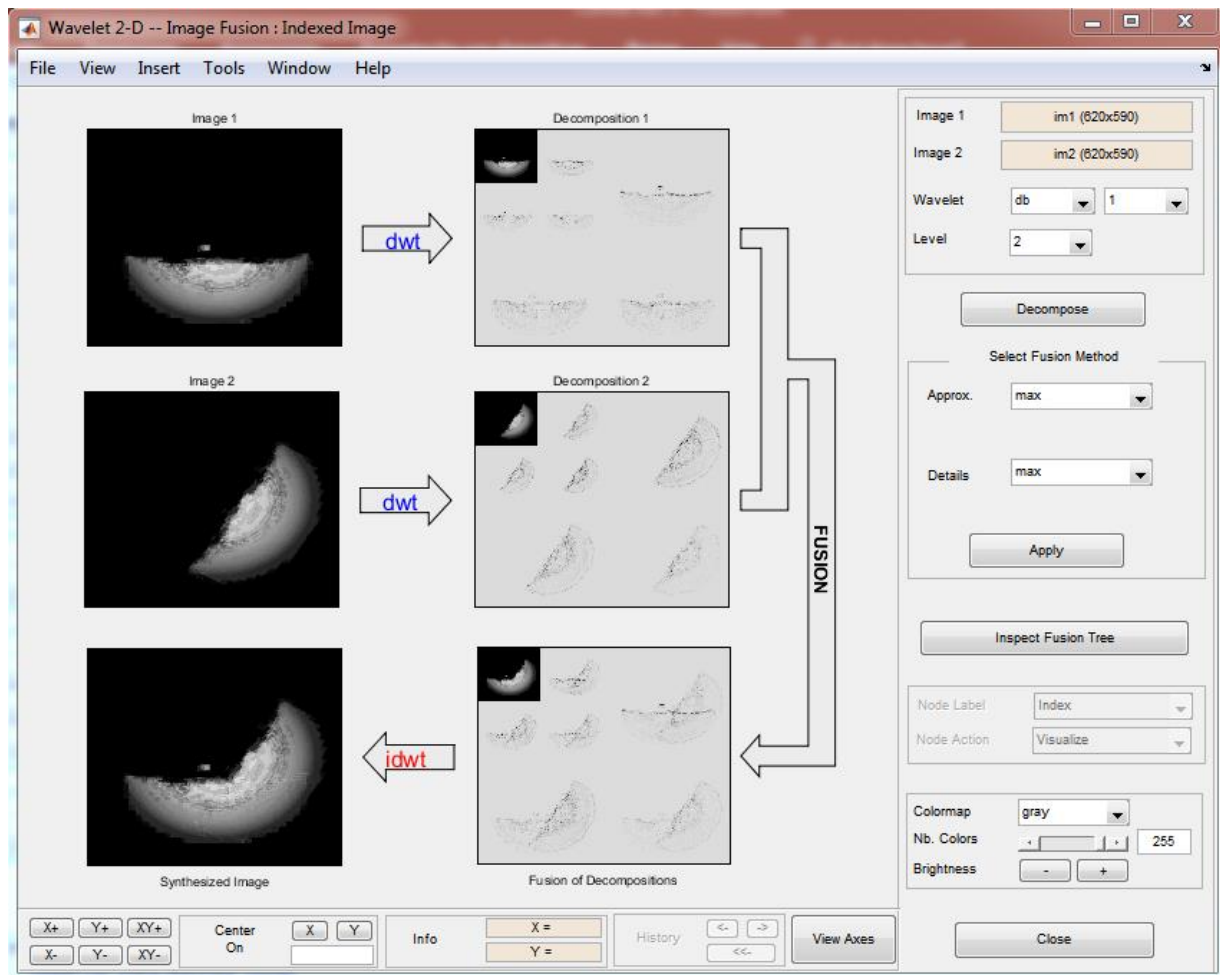


Figura 8.9 Fusión con DWT en MATLAB®.

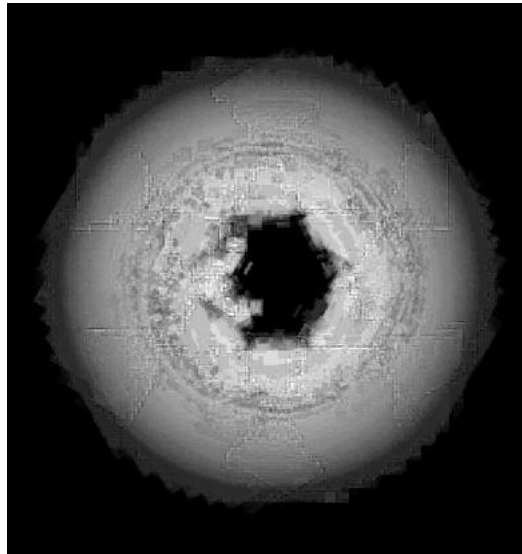


Figura 8.10 Mapa de alturas fusionado con DWT.

Como se puede ver en el mapa resultante se logra unir toda la información de altura del objeto obtenida con la montura rotatoria. En las regiones donde se tiene información en común entre los diferentes mapas fusionados, se logran percibir unas líneas delgadas que pueden no ser muy notorias a simple vista, pero al obtener la reconstrucción del objeto se tiene un resultado con ruido que no permite apreciar correctamente la superficie reconstruida. Por lo tanto, se decidió proponer un método de fusión que permitiera eliminar estas líneas de unión entre los diferentes mapas, a continuación se describe el método propuesto y los resultados obtenidos.

8.3.2 Método de fusión propuesto

Al probar diferentes métodos de fusión se observó que se obtenían ciertas imperfecciones en el mapa resultante, principalmente en donde se tenía información en común entre los diferentes mapas. Utilizando MATLAB® y el método de fusión del máximo simple se logró mejorar el resultado, enseguida se muestra el procedimiento de fusión propuesto (Apéndice J).

Al igual que en los métodos anteriores se fusionan los dos mapas de altura iniciales, como se muestra en la Figura 8.11. En el siguiente paso se hace una suma directa de

todos los píxeles correspondientes de los mapas de altura siempre y cuando alguno de los dos mapas contenga un valor de 0, para tomar únicamente los valores de altura en donde no se tiene información en común entre los dos mapas. Después se genera una máscara binaria de la región donde se tiene información en común entre los dos mapas y se aplica la máscara a los dos mapas iniciales. Al tener los dos mapas de altura enmascarados en donde ambos contienen únicamente las zonas donde hay solapamiento de valores de altura, se utiliza el método de fusión del máximo simple como se muestra en la Figura 8.12 en la cual se tomó el valor de altura más elevado de entre los dos mapas de entrada. Para finalizar se suman directamente el mapa de altura de las diferentes zonas y la fusión de la zona de solapamiento, obteniendo el mapa fusionado, el cual se guarda para utilizarse como el siguiente mapa inicial junto con el obtenido en la siguiente rotación del objeto.

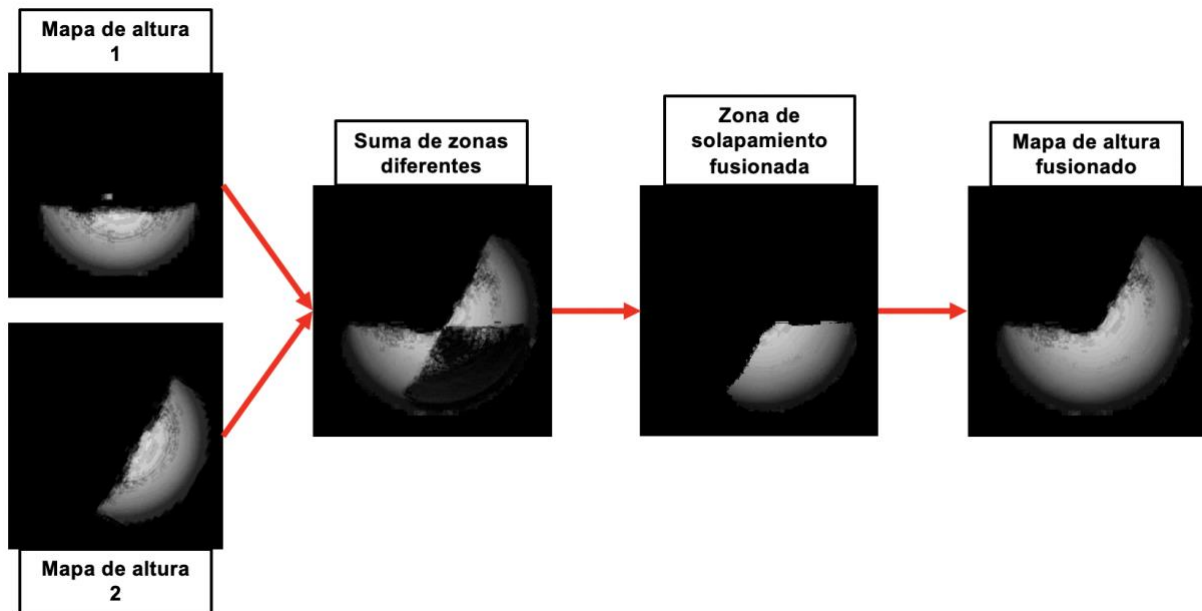


Figura 8.11 Fusión con método propuesto.

En la Figura 8.12 se muestra el mapa final resultante con el método propuesto al fusionar los seis mapas de altura. En la zona de solapamiento se puede utilizar cualquier método de fusión, sin embargo, se determinó utilizar el máximo simple ya que el solapamiento corresponde a las zonas donde normalmente ocurren las

oclusiones por la configuración del sistema y se forman sombras sobre el objeto, resultando en la identificación incorrecta del color ya que el color se vuelve más oscuro. Al asignar el valor más elevado se puede asegurar el valor de altura en el cual se tuvo una mejor proyección del color y por lo tanto una mejor identificación del color.

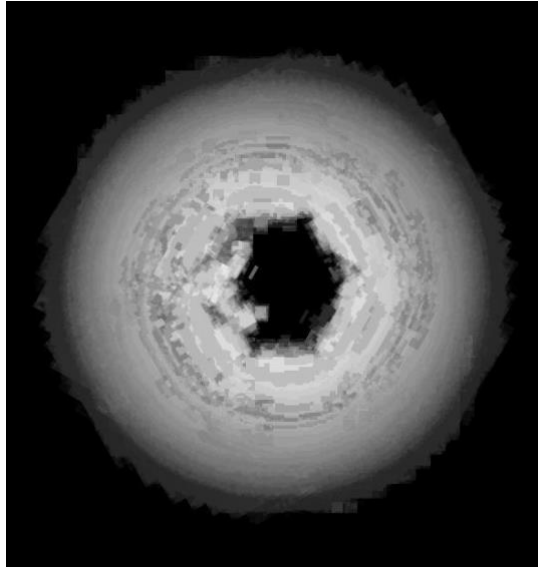


Figura 8.12 Mapa de altura fusionado con método propuesto.

Como se puede observar se logró eliminar las líneas que se formaban en las zonas donde se tenía el solapamiento de valores de altura entre diferentes mapas, al enmascarar esta región y aplicar el algoritmo del máximo simple únicamente en donde se tiene solapamiento entre los dos mapas y se logra hacer mas uniforme el resultado del mapa resultante. Aunque las líneas obtenidas con el algoritmo DWT son muy pequeñas y parecen no afectar el resultado, al reconstruir el objeto se logra distinguir muy fácilmente la diferencia entre los dos mapas.

8.4 Unidades reales en ejes X y Y

Una vez que se obtienen los valores de altura de toda la superficie del objeto, fue necesario convertir las dimensiones de los ejes X y Y a unidades reales para poder

obtener la reconstrucción tridimensional final. A continuación, se describe como se lleva a cabo la conversión de estos valores.

Para realizar esta conversión fue necesario considerar algunos parámetros que ya habían sido calculados anteriormente como el campo de visión de la cámara y la resolución de la imagen (1280 x 960 píxeles). Midiendo el largo del FOV real de la cámara se obtuvo un valor de 128.53 mm para los 1280 píxeles y se calculó directamente el tamaño real de un píxel en la imagen como se muestra en la ecuación 8.3, es decir que cada píxel captura 0.06 mm del campo de visión. Se puede comprobar el resultado haciendo el mismo procedimiento para el ancho de la imagen, en donde según el FOV medido es de 96.4 mm para los 960 píxeles. El tamaño de píxel es necesario para obtener las reconstrucciones en unidades reales.

$$\text{Tamaño de pixel} = \frac{128.53 \text{ mm}}{1280} = 100.41 \text{ }\mu\text{m} \quad (8.3)$$

Después de que se han convertido las unidades de los ejes X y Y en las dimensiones reales del objeto, se asignaron las alturas a cada píxel en la imagen dependiendo del color identificado y se fusionaron los diferentes mapas de altura obtenidos, se puede utilizar una herramienta de LabVIEW® que permite obtener una gráfica tridimensional de la superficie. En el siguiente capítulo se muestran los resultados obtenidos de esta técnica con diferentes objetos y la validación de las pruebas realizadas para la evaluación del desempeño del método propuesto.

CAPÍTULO IX

PRUEBAS FINALES Y VALIDACIÓN

Al tener los mapas de altura con los valores reales de altura de cada punto del objeto se lograron obtener diferentes reconstrucciones de objetos y se llevó a cabo la fusión de la textura real de la superficie para tener una mejor representación del objeto. Después, estos resultados fueron evaluados para comprobar que se obtuvieron reconstrucciones precisas y que estuvieran dentro de un margen aceptable comparadas al objeto real. En esta sección se muestran los resultados obtenidos para las diferentes superficies y el procedimiento de reconstrucción, después se hace una validación de un objeto de referencia calibrado para comprobar estadísticamente el comportamiento del sistema, calculando su exactitud y precisión.

9.1 Pruebas finales

Se realizaron pruebas con objetos de geometría simple como una pirámide y esfera, pero también se probaron superficies con geometría más compleja como máscaras de cerámica. Estas pruebas fueron realizadas con baja iluminación para que no se viera afectado el color proyectado y la intensidad de la luz en las imágenes capturadas, sin embargo, se hicieron pruebas con la luz encendida y se observó que no alteraban los resultados de la reconstrucción. Cabe mencionar que todos los objetos de prueba fueron pintados de color blanco mate para que no se viera afectado el matiz que se identifica de las franjas proyectadas debido a la variación de tono de la misma superficie y para disminuir la reflectancia de superficies que puede alterar la calidad de las imágenes. A continuación, se muestran los resultados obtenidos para diferentes objetos.

Para obtener la reconstrucción completa de una esfera de unicel es necesario colocarla en seis posiciones distintas por medio del giro de la montura rotatoria y después fusionar los mapas de altura de cada región para lograr obtener la

reconstrucción completa. Esta prueba toma un tiempo aproximado de 3 minutos en el que se puede realizar la proyección de las franjas, captura de imágenes, giro del objeto, procesamiento y obtención de la reconstrucción. En la Figura 9.1 se muestra el resultado obtenido, también se genera un archivo en el cual se obtienen todos los valores de altura de la superficie completa. Como se puede observar es posible obtener la topografía por medio de la identificación de color sin la necesidad de utilizar alguna de las técnicas de perfilometría tradicionales.

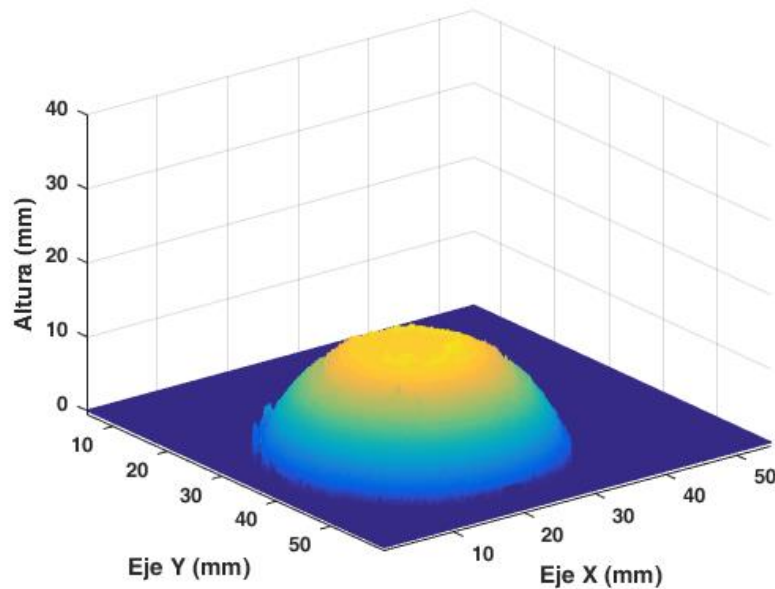


Figura 9.1 Reconstrucción tridimensional de esfera de unicel.

Para obtener la reconstrucción completa de una máscara cerámica también es necesario colocarla en seis posiciones distintas por medio del giro de la montura rotatoria y después fusionar los mapas de altura de cada región para lograr obtener la reconstrucción completa. Esta prueba requiere un tiempo aproximado de 3 minutos, en la Figura 9.2 se muestra el resultado obtenido para la máscara 1. En la Figura 9.3 se muestra una segunda máscara de cerámica con cambios de altura más pronunciados y regiones planas, por lo cual se pueden ver zonas en donde no se obtiene correctamente la reconstrucción del objeto. En todos los casos existe una región de oclusión en la parte central en donde no se puede llevar a cabo la proyección

de las franjas y por lo tanto no es posible obtener la información de altura de esta región, por lo que se utiliza un algoritmo que considera los píxeles vecinos de la zona faltante para reconstruir esta región.

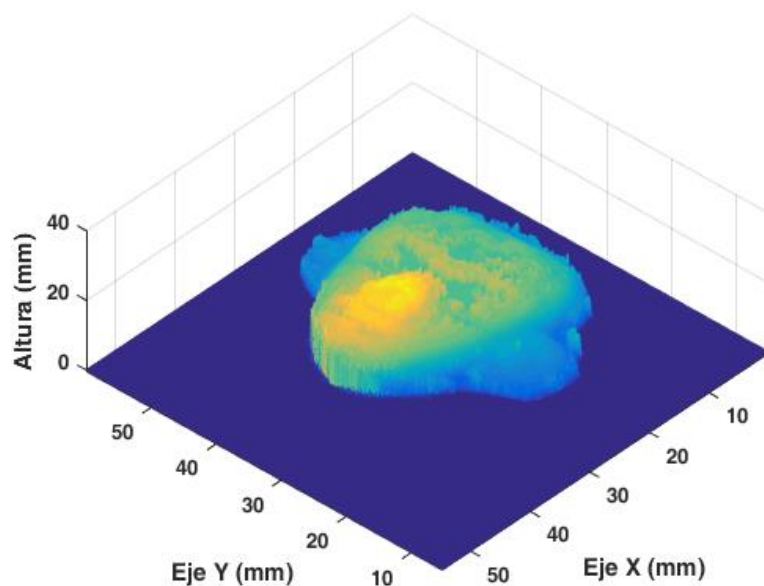


Figura 9.2 Reconstrucción tridimensional de máscara de cerámica 1.

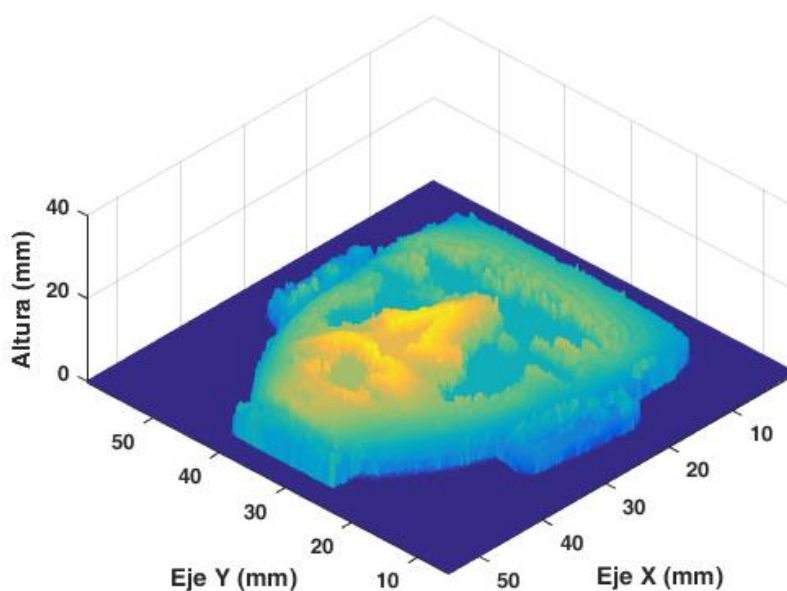


Figura 9.3 Reconstrucción tridimensional de máscara de cerámica 2.

9.1.1 Fusión de textura

Para lograr un resultado muy similar al objeto real se tomó una imagen de la superficie bajo alta iluminación y se fusionó con la reconstrucción obtenida. A través de LabVIEW® y MATLAB® se utiliza un algoritmo que permite llevar a cabo la fusión de una imagen bidimensional a la información tridimensional que se va a representar, de esta forma se puede observar la reconstrucción con la textura y color real del objeto para que se pueda tener una mejor visualización.

En las siguientes figuras se pueden observar las reconstrucciones mostradas en la sección anterior después de llevar a cabo la fusión de la textura. Se puede observar con mayor facilidad el objeto y tener así una mejor representación de la superficie de prueba, también permite identificar cuáles son las zonas de dificultad en los objetos con superficies irregulares.

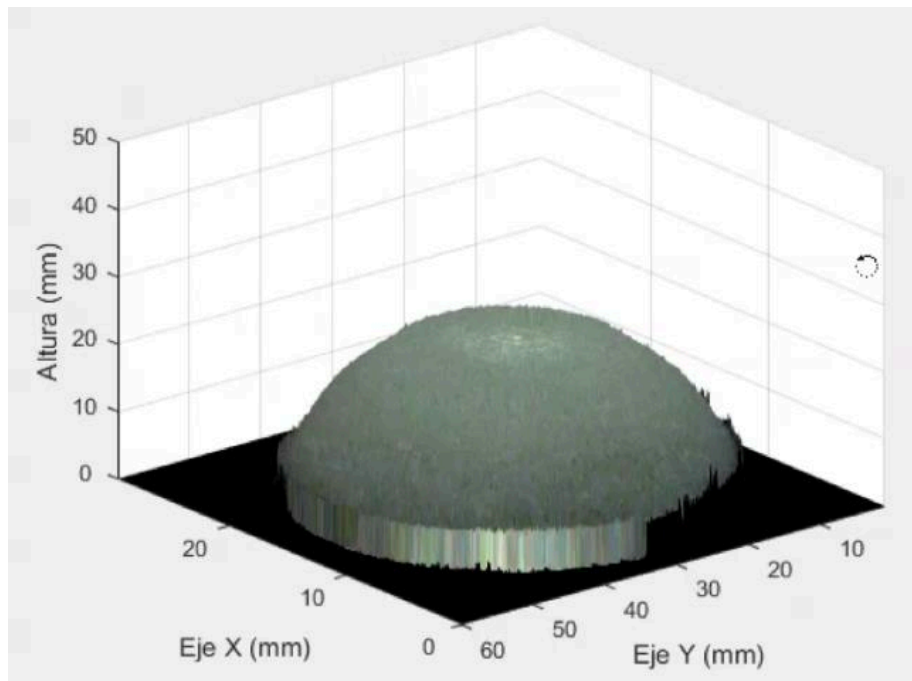


Figura 9.4 Reconstrucción tridimensional de esfera de unicel con textura.

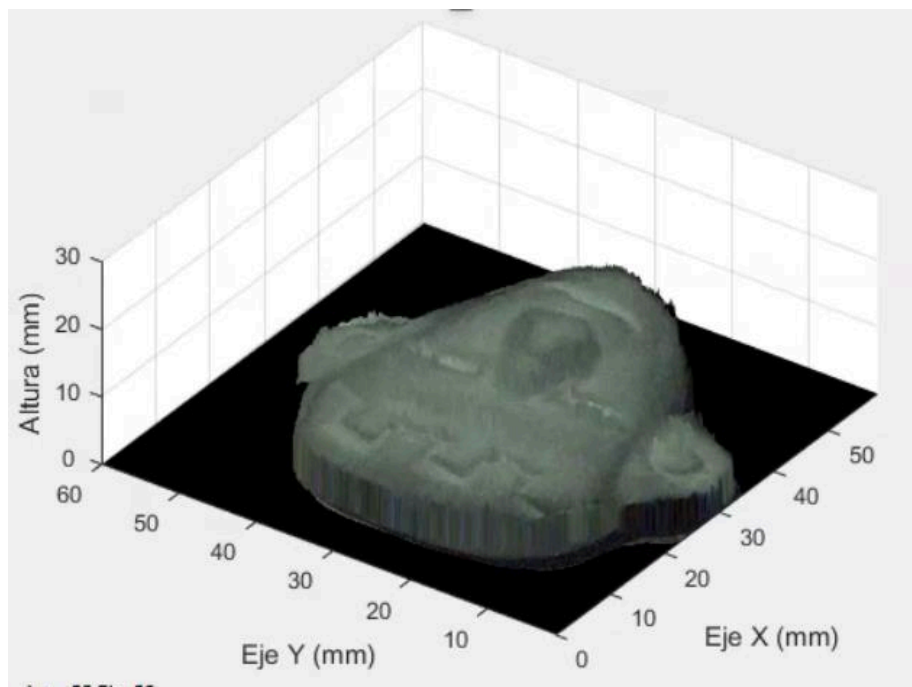


Figura 9.5 Reconstrucción tridimensional de máscara de cerámica 1 con textura.

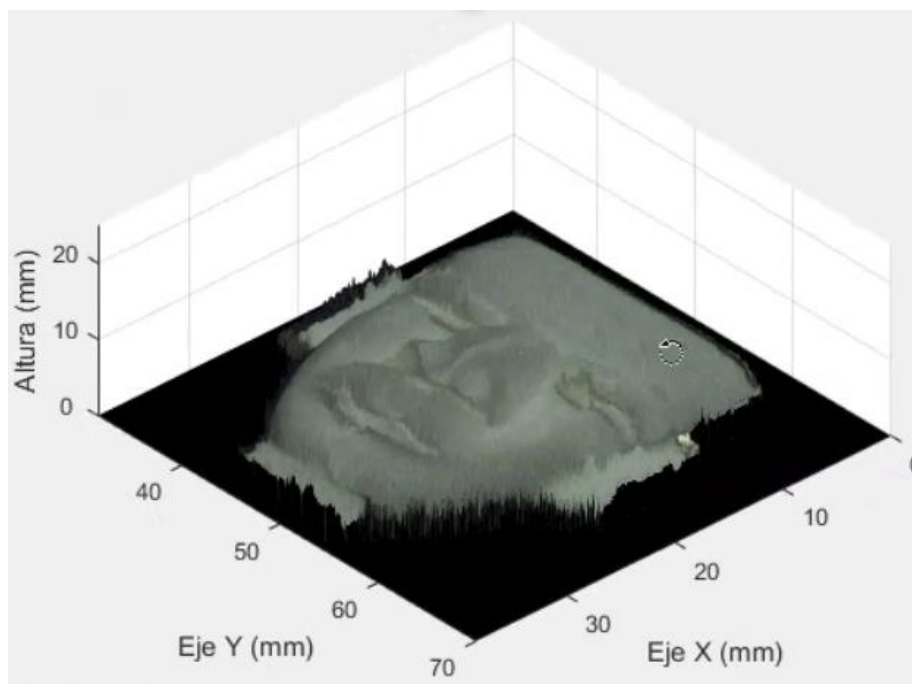


Figura 9.6 Reconstrucción tridimensional de máscara de cerámica 2 con textura.

9.1.2 Objeto de referencia

Para evaluar el desempeño de la técnica fue necesario comparar los resultados de altura obtenidos con la técnica y compararlos con los valores reales de los objetos. Para llevar a cabo esta evaluación se utilizó como objeto un plano inclinado que fue previamente diseñado en SolidWorks® y por medio de una impresora 3D se imprimió el modelo. Se conocen las medidas reales con la que se realizó el diseño y la impresión se llevó a cabo con alta resolución (0.1 mm). Este modelo 3D se utilizó en la validación de la técnica. En la Figura 9.7 (a) se muestra el diseño del plano inclinado con sus medidas exactas y (b) el objeto 3D que representa el plano inclinado, colocado sobre una base impresa en el mismo material.

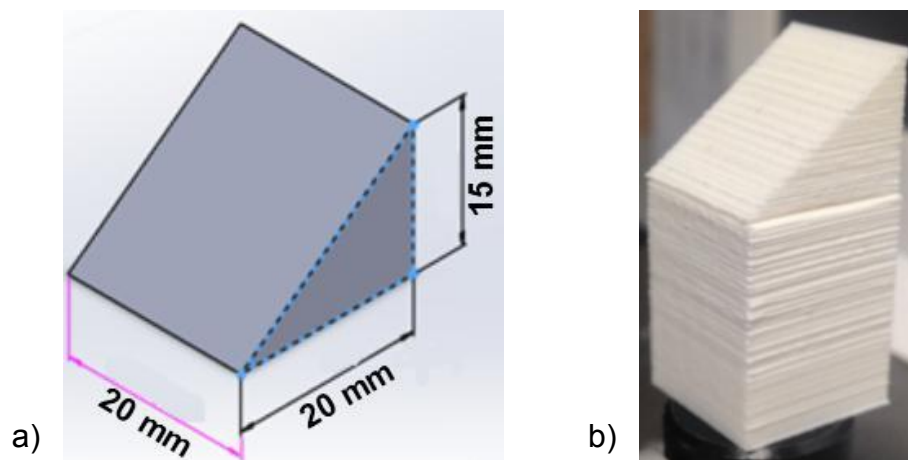


Figura 9.7 Plano inclinado de referencia, a) diseñado en SolidWorks® y b) impreso en 3D.

En la Figura 9.8 se muestra la reconstrucción tridimensional obtenida con la técnica desarrollada y en la Figura 9.9 se observa la textura del objeto. Se puede concluir que se logran obtener resultados muy cercanos a las superficies reales, sin embargo, existen diferencias con el objeto real principalmente en los extremos de la superficie. Los problemas que se presentan en la reconstrucción están asociados a la identificación de color, esto se corrigió colocando una máscara para eliminar el ruido en el contorno del objeto. Los valores de altura son cercanos al ideal y por la tanto se puede utilizar para evaluar la técnica. En la siguiente sección se hace una descripción del desarrollo y los resultados de la evaluación estadística de las pruebas realizadas.

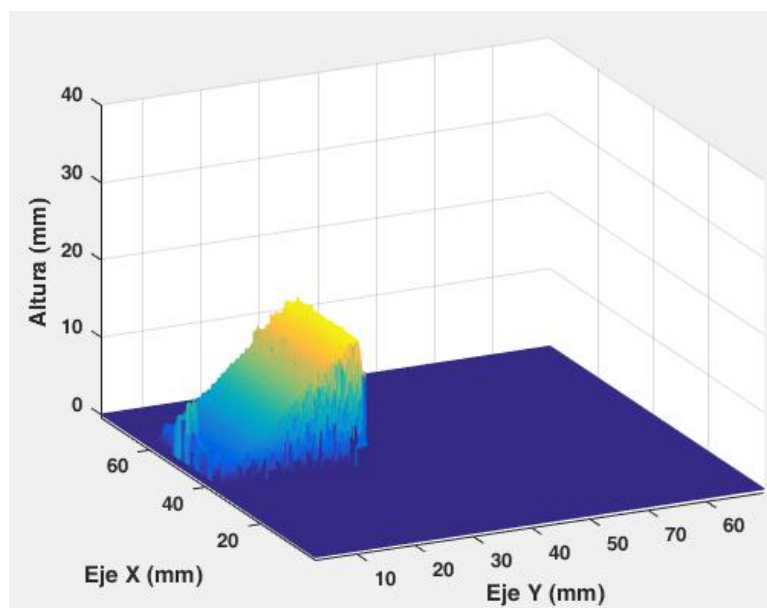


Figura 9.8 Reconstrucción tridimensional de plano inclinado.

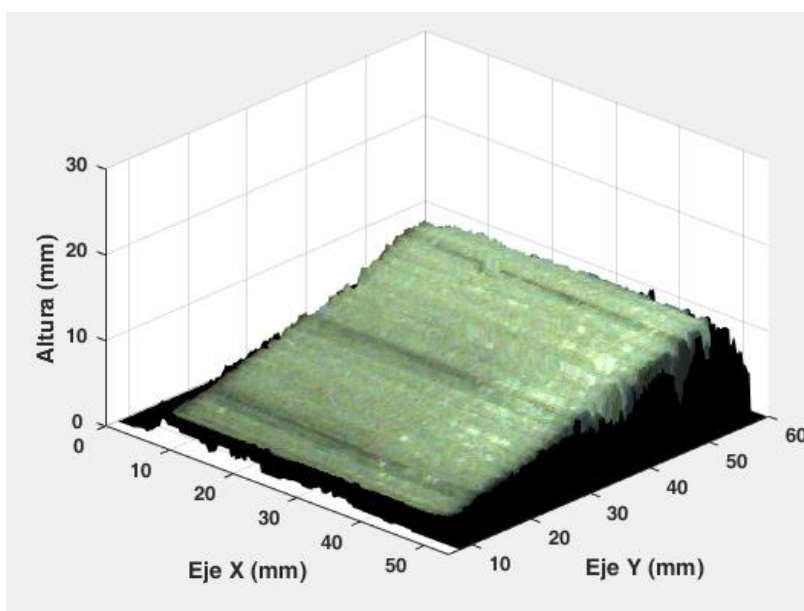


Figura 9.9 Reconstrucción tridimensional de plano inclinado con textura.

9.2 Análisis de los datos y validación estadística

Finalmente se analizaron los resultados obtenidos para evaluar la técnica desarrollada y determinar el error de las mediciones realizadas. Estas pruebas se realizaron con el fin de observar el comportamiento de los resultados, determinar la exactitud, precisión y error del sistema, y con ello poder validar la técnica propuesta. A continuación, se hace una descripción del análisis realizado y de los resultados obtenidos.

9.2.1 Proceso de medición

Para realizar las pruebas fue necesario establecer las condiciones en las cuales se realizarían las reconstrucciones y el proceso de medición de los valores de altura. Esto con el fin de reducir errores externos que pueden presentarse en el momento de la medición, reducir la incertidumbre y para que los resultados sean lo más similares posible. Se determinó que se realizarían 45 reconstrucciones de un mismo objeto, seleccionando como objeto el plano inclinado impreso (patrón de referencia). Las reconstrucciones se obtuvieron con la luz apagada y se registraron los valores de altura de tres puntos distintos. A continuación, se describe el proceso de reconstrucción para medir la altura máxima que se utilizó.

- I. Abrir el software de reconstrucción en LabVIEW®.
- II. Encender cámara.
- III. Encender el proyector.
- IV. Ejecutar el software de reconstrucción.
- V. Apagar proyector.
- VI. Apagar cámara.
- VII. Cerrar software.
- VIII. Guardar archivos.

Entre cada una de las instrucciones se contó un tiempo de 15 segundos, excepto en el punto IV al ejecutar el software, ya que éste toma un tiempo de 20 segundos en

realizar el proceso completo para obtener la reconstrucción. Los archivos que se guardan para llevar a cabo la validación son el mapa de altura para obtener los datos y las imágenes procesadas por si es necesario hacer alguna modificación al procesamiento de la imagen sin tener que repetir el procedimiento de tomar las muestras.

Los valores de altura que se tomaron corresponden a tres puntos del plano inclinado como se muestra en la Figura 9.10, en la cual se puede observar que se colocaron marcas en la superficie del plano inclinado con el fin de hacer la medición de altura y utilizar esos valores como referencia.

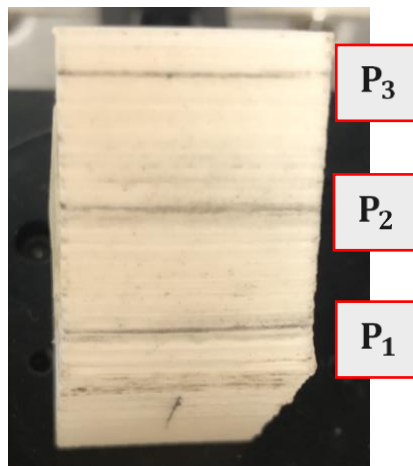


Figura 9.10 Plano inclinado con marcas en alturas de referencia.

En las marcas del objeto se midió el valor de altura utilizando un vernier, como se muestra en la Figura 9.11. Como se puede observar P_1 tiene una altura de 2.8 mm, P_2 es de 8.25 mm y P_3 es de 14.15 mm. Estas alturas son la referencia con la que se hace la comparación de lo que se logra obtener con la técnica. Después de tener los valores de referencia se capturó una imagen con las marcas en los tres puntos y se determinó su ubicación en píxeles en la captura, para conocer el renglón de la imagen en la que se van a analizar los resultados. Por medio de IMAQ Vision® se encontró que P_1 se ubica en el renglón 217, P_2 en 133 y P_3 en el 46. Al realizar las 45 pruebas se extrajeron los valores de altura que se encuentran en estos renglones de la imagen.

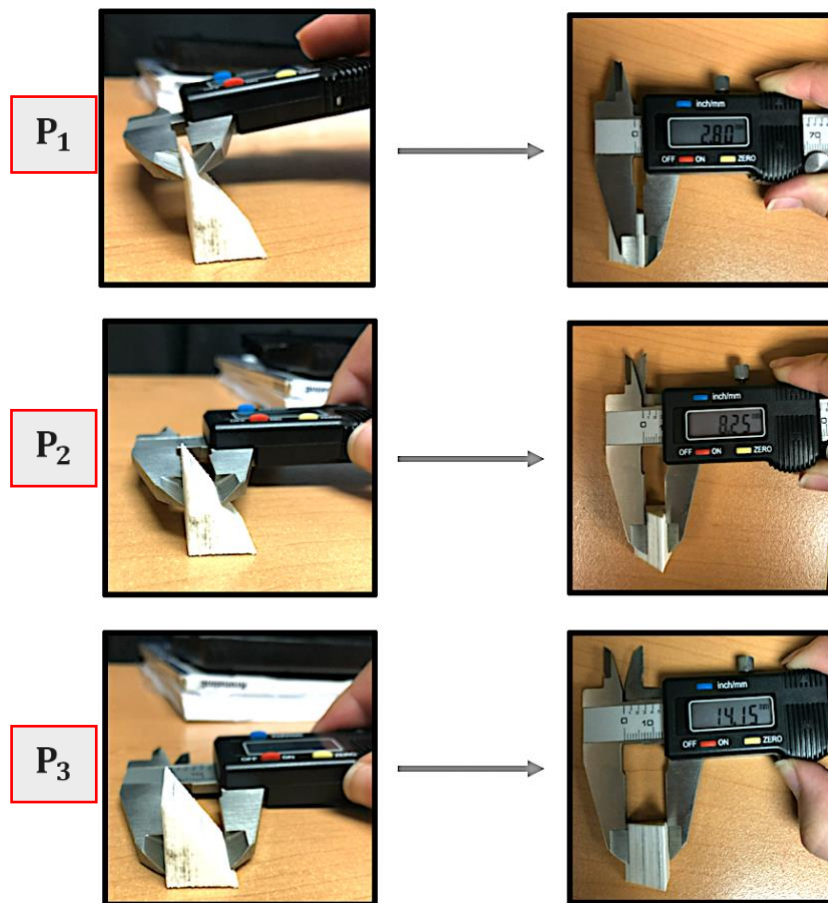


Figura 9.11 Medición de alturas de referencia reales.

Una vez que se realizaron las 45 pruebas, por medio de LabVIEW® se obtuvieron los valores de altura en los renglones correspondientes: puntos P_1 , P_2 y P_3 de los mapas de altura, después se obtuvo el promedio de esos renglones para hacer la comparación con el valor real como se muestra en el ejemplo de la Figura 9.12.

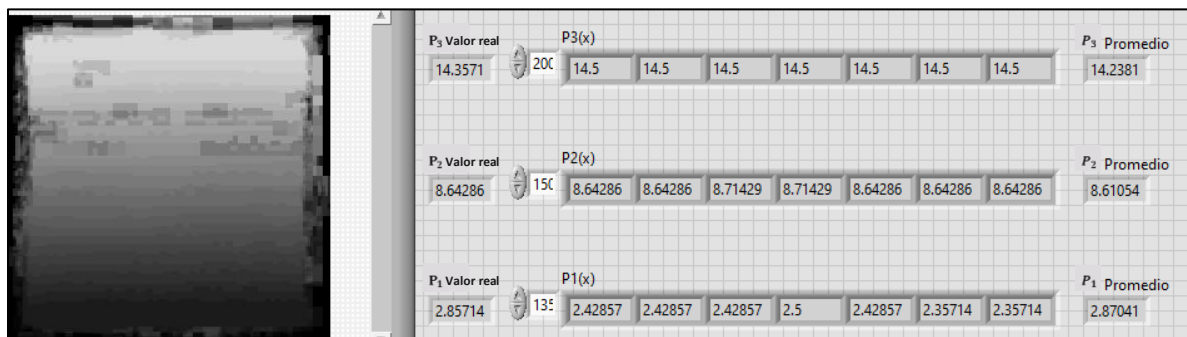


Figura 9.12 Valores de altura reales y promedio en puntos de referencia.

Después se registraron los datos obtenidos para las 45 muestras tomadas del plano inclinado calibrado. En la Tabla 9.1 se muestran los valores de altura promediados para los tres puntos de referencia en todas las reconstrucciones.

Tabla 9.1 Datos de altura registrada con plano inclinado calibrado.

Muestra	Altura promediada (mm)			Muestra	Altura promediada (mm)		
	P_1	P_2	P_3		P_1	P_2	P_3
1	2.87041	8.61054	14.2381	24	2.88163	8.64184	14.1741
2	2.97755	8.61497	14.302	25	2.94082	8.5534	13.8422
3	2.95034	8.64354	14.469	26	2.93707	8.33435	14.2177
4	2.89014	8.62857	14.4197	27	2.88537	8.58537	14.0452
5	2.93231	8.56361	14.1861	28	2.94558	8.50306	14.4684
6	2.91429	8.59354	14.1503	29	2.85782	8.26667	14.1966
7	2.93844	8.55952	14.1918	30	2.94218	8.39456	14.45
8	2.90578	8.61293	14.0684	31	2.88946	8.63061	14.2197
9	2.92415	8.54422	14.417	32	2.90578	8.37585	13.734
10	2.93469	8.53061	14.2854	33	2.8949	8.53163	14.3395
11	2.90952	8.5932	14.0847	34	2.90476	8.44388	14.3184
12	2.90136	8.48503	14.0388	35	2.92823	8.47415	14.332
13	2.76599	8.59354	13.9932	36	2.90986	8.49286	14.0435
14	2.93299	8.5085	14.3241	37	2.91054	8.50374	14.1449
15	2.95408	8.47381	14.0592	38	2.91156	8.47925	13.9384
16	2.88265	8.31224	14.4143	39	2.87177	8.48673	14.1673
17	2.95238	8.44762	13.9075	40	2.92177	8.52517	14.1422
18	2.92211	8.56871	14.0204	41	2.90612	8.33537	14.2537
19	2.91871	8.64422	14.2048	42	2.85034	8.51565	14.2102
20	2.91633	8.38435	14.6881	43	2.89354	8.57075	14.1986
21	2.94286	8.5551	14.0986	44	2.94014	8.31633	13.7262
22	2.91395	8.61599	13.999	45	2.90374	8.30238	13.7759
23	2.94014	8.50646	14.0561				

Se utilizaron los valores de altura registrados para evaluar los resultados obtenidos y validar la técnica desarrollada. Utilizando el software MATLAB® se pudieron calcular parámetros estadísticos de los datos obtenidos, realizar pruebas para determinar si se tiene una distribución normal y calcular además el error de la medición, la precisión y exactitud del sistema desarrollado (Apéndice K). A continuación se muestran los cálculos realizados y los resultados obtenidos.

9.2.2 Estadística de los datos

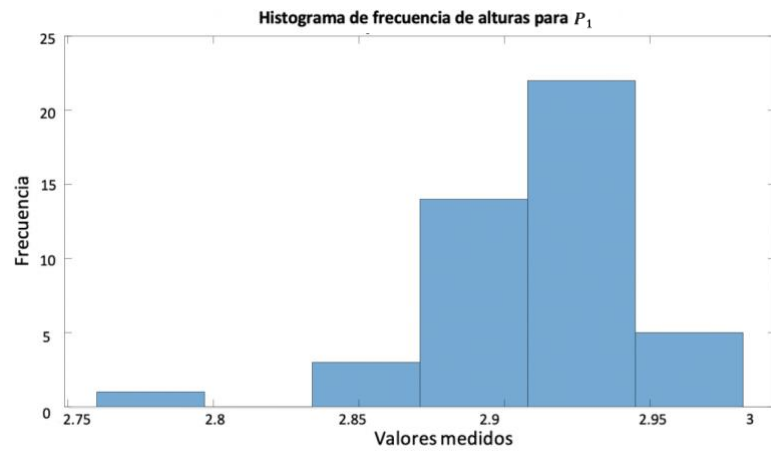
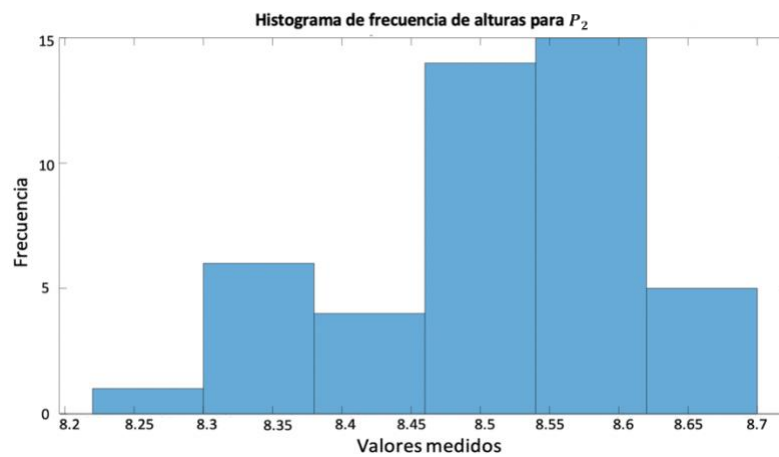
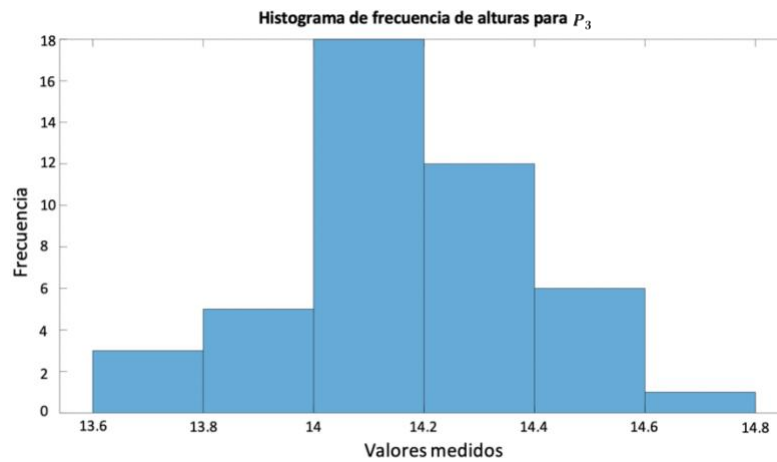
Con los resultados obtenidos se llevó a cabo un análisis para describir las características más importantes del conjunto de datos por medio de la estadística descriptiva. Se calculó la media aritmética μ , mediana me y desviación estándar σ [123]. Los resultados se pueden observar en la Tabla 9.2.

Tabla 9.2 Datos obtenidos de las muestras.

	P_1	P_2	P_3
Media aritmética (mm)	$\mu_1 = 2.9116$	$\mu_2 = 8.5078$	$\mu_3 = 14.1679$
Mediana (mm)	$me_1 = 2.9139$	$me_2 = 8.5252$	$me_3 = 14.1861$
Desviación estándar (mm)	$\sigma_1 = 0.0349$	$\sigma_2 = 0.1034$	$\sigma_3 = 0.2031$

9.2.3 Histograma

Un histograma muestra de forma gráfica el comportamiento de los datos, divide los datos registrados en intervalos o categorías y registra la frecuencia con la que se presenta cada intervalo. En el eje X del histograma se muestran los diferentes intervalos o categorías que están presentes en el conjunto de datos y en el eje Y se muestra la frecuencia con la que se repite cada categoría. Para los datos registrados se obtuvieron los histogramas que se muestran en la Figura 9.13, Figura 9.14 y Figura 9.15 para P_1 , P_2 y P_3 .

Figura 9.13 Histograma de valores de altura registrados para P_1 .Figura 9.14 Histograma de valores de altura registrados para P_2 .Figura 9.15 Histograma de valores de altura registrados para P_3 .

9.2.3.1 Distribución normal

Al observar los histogramas obtenidos con las muestras tomadas de la superficie en los tres puntos de referencia, se puede apreciar que se tiene una distribución normal ya que la media y mediana coinciden con el valor central, el valor central es mayor y las frecuencias disminuyen hacia los extremos. A los histogramas obtenidos en MATLAB® se les sobrepuso una curva de distribución normal, como se muestra en la Figura 9.16, Figura 9.17 y Figura 9.18 para comparar el comportamiento de los resultados obtenidos, se puede observar la frecuencia de los valores de altura registrados y la curva de distribución correspondiente para P_1 , P_2 y P_3 .

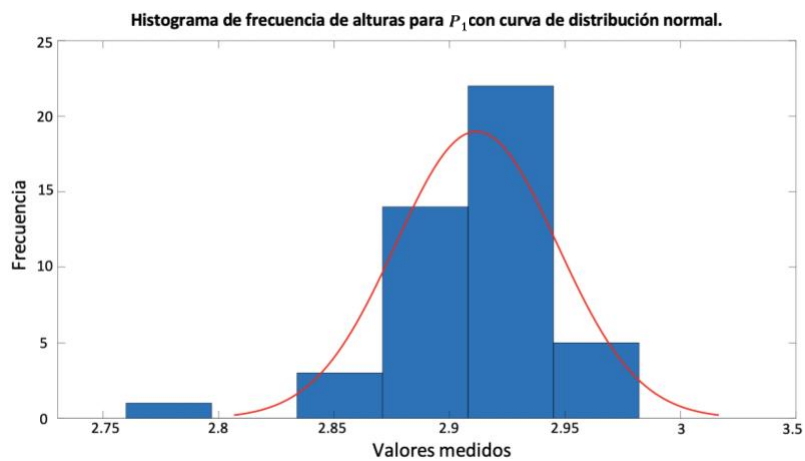


Figura 9.16 Histograma de valores de altura para P_1 con curva de distribución normal.

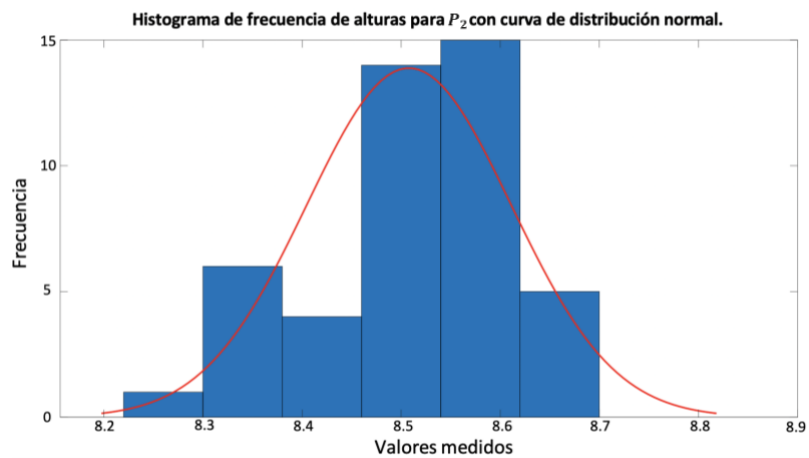


Figura 9.17 Histograma de valores de altura para P_2 con curva de distribución normal.

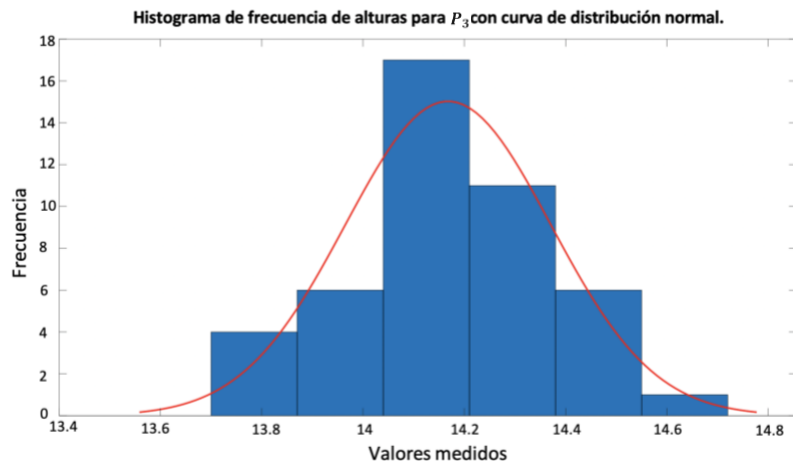


Figura 9.18 Histograma de valores de altura para P_3 con curva de distribución normal.

Una distribución normal como se muestra en la Figura 9.19 tiene las siguientes propiedades:

1. La moda es el punto sobre el eje horizontal donde la curva tiene su punto máximo, esta ocurre en $x = \mu$.
2. La curva es simétrica alrededor del eje vertical. Sus puntos de inflexión ocurren en $x = \mu \pm \sigma$ y es cóncava hacia abajo cuando $\mu - \sigma < x < \mu + \sigma$.
3. La curva normal se aproxima al eje horizontal de manera asintótica, conforme se aleja de la media en cualquier dirección.
4. El área total bajo la curva y sobre el eje horizontal es igual a uno [123].

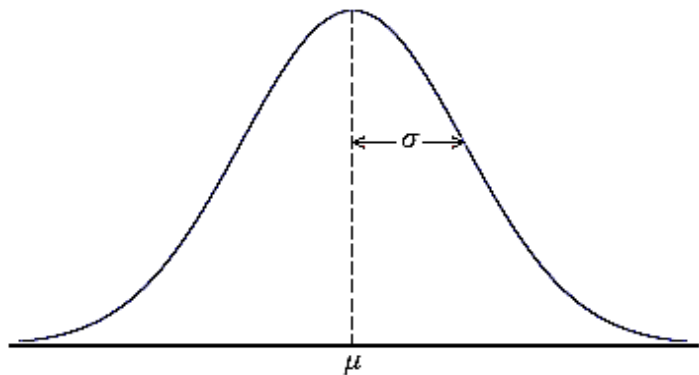


Figura 9.19 Distribución normal.

En los histogramas obtenidos con las muestras se puede apreciar que se tiene una distribución normal, ya que la curva cumple con las propiedades de una distribución normal. Para los datos registrados se obtuvieron las medias de cada punto que son: $\mu_1 = 2.9116$ mm, $\mu_2 = 8.5079$ mm y $\mu_3 = 14.1679$ mm, que es donde se encuentran los puntos máximos de las curvas correspondientes. Mientras que los puntos de inflexión se encuentran en $x_1 = 2.9116 \pm 0.0349$ mm, $x_2 = 8.5078 \pm 0.1034$ mm y $x_3 = 14.1679 \pm 0.2031$ mm.

También se obtuvieron las gráficas de la probabilidad normalizada para comprobar que el conjunto de datos se aproxima a una distribución normal. Los datos registrados se grafican junto con la distribución normal teórica y si los puntos de los datos se aproximan a la normal se puede asumir que se tiene una distribución normal. En la Figura 9.20, Figura 9.21 y Figura 9.22 se muestran las gráficas de probabilidad normalizada y se puede observar que los datos se aproximan a la normal.

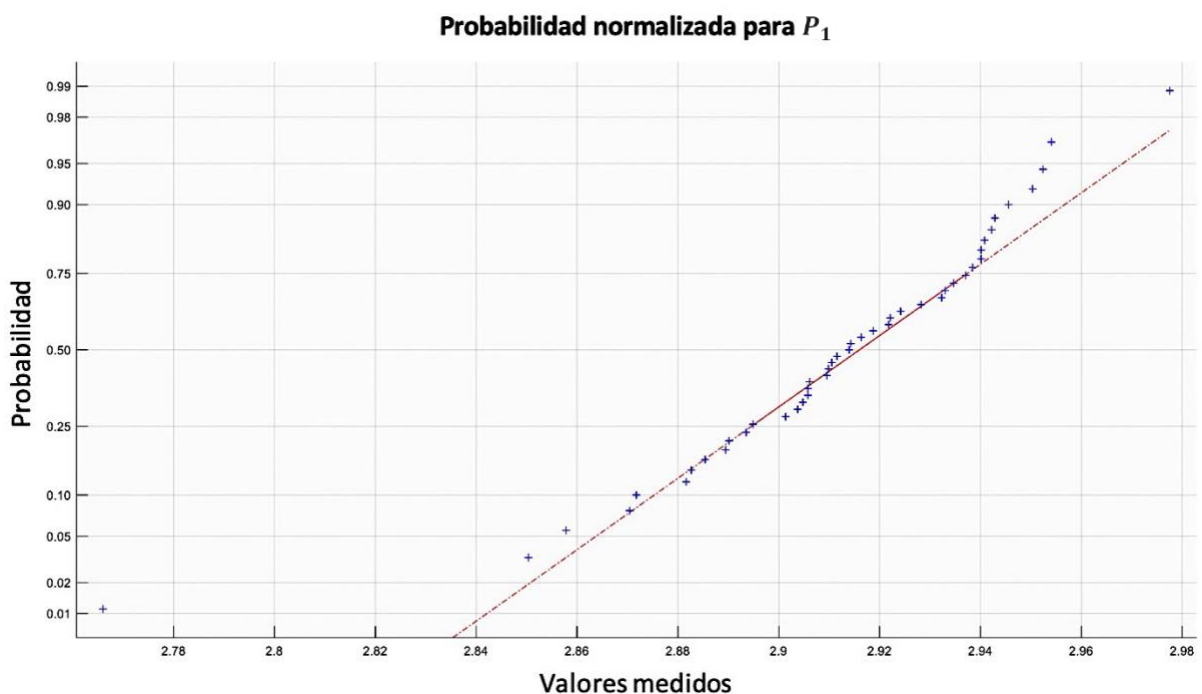
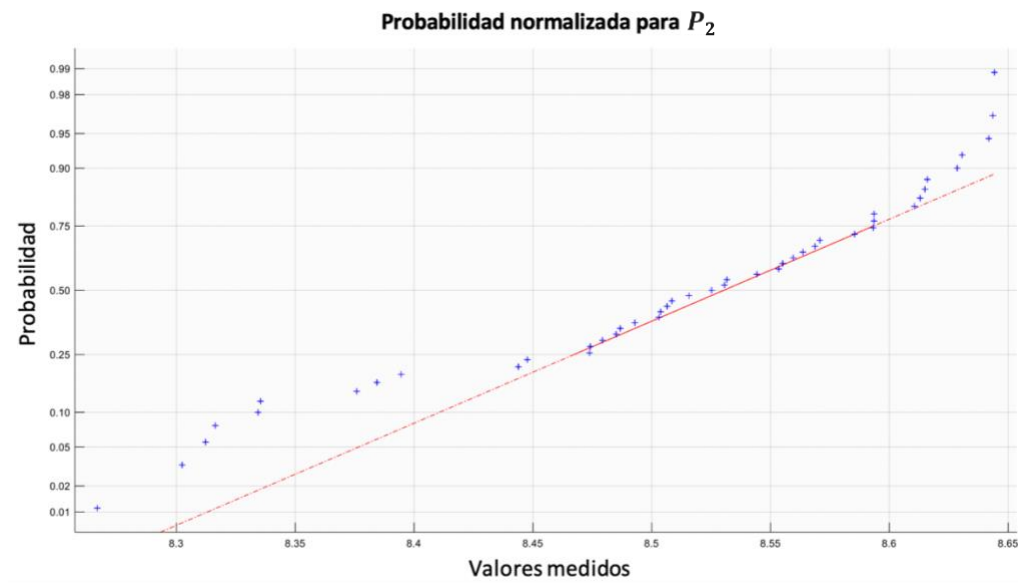
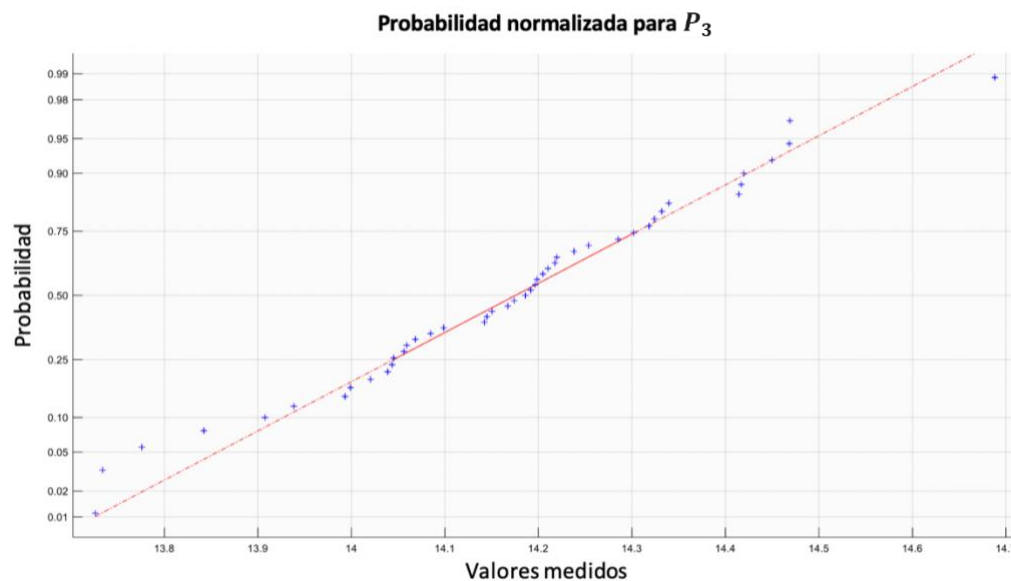


Figura 9.20 Probabilidad normalizada para P_1 .

Figura 9.21 Probabilidad normalizada para P_2 .Figura 9.22 Probabilidad normalizada para P_3 .

Gráficamente se puede observar que los datos se ajustan a una distribución normal, sin embargo, es necesario realizar una prueba de bondad de ajuste para comprobar los resultados y verificar el tipo de distribución que se tiene. A continuación se muestran los resultados obtenidos con la prueba de ajuste Chi-cuadrada.

9.2.3.2 Prueba de bondad de ajuste Chi-cuadrada

La prueba de bondad de ajuste permite verificar que la población de la cual proviene una muestra tiene una distribución especificada o supuesta. Al probar la bondad de ajuste de un conjunto de datos, se comparan las frecuencias observadas realmente en cada categoría o intervalo de clase, con las frecuencias esperadas teóricamente [123][124].

La prueba de Chi-cuadrada X^2 se basa en el nivel de ajuste que existe entre la frecuencia de ocurrencia de las observaciones en una muestra observada y las frecuencias esperadas que se obtienen a partir de la distribución hipotética. Esta prueba es aplicable para variables aleatorias discretas o continuas. Si las frecuencias observadas se acercan a las frecuencias esperadas se tiene un buen ajuste. Si las frecuencias observadas difieren de manera considerable de las frecuencias esperadas el ajuste es deficiente. Un buen ajuste conduce a la aceptación del modelo propuesto para la población, mientras que un ajuste deficiente conduce a un rechazo del modelo. La prueba se puede realizar con la ecuación 9.1, en donde o_i representa la frecuencia observada en la i -ésima clase, e_i es la frecuencia esperada en la i -ésima clase y k es el número de clases o categorías de los datos.

$$X^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(o_i - e_i)^2}{e_i} \quad (9.1)$$

En la Tabla 9.3, Tabla 9.4 y Tabla 9.5 se muestran los límites inferior y superior de cada una de las clases, las frecuencias esperadas y observadas para cada clase y el valor calculado de Chi-cuadrada X^2 para los puntos de referencia P_1 , P_2 y P_3 correspondientes. También se muestra la sumatoria de los resultados de cada clase y se puede observar el valor con el que se compara para 3 grados de libertad.

Tabla 9.3 Prueba de Chi-cuadrada para P_1 .

Clase (k)	Límite inferior	Límite superior	Frecuencia observada (o_i)	Frecuencia esperada (e_i)	X^2
1	2.7659	2.8822	5	9	1.7778
2	2.8822	2.9027	6	9	1
3	2.9027	2.9205	11	9	0.4444
4	2.9205	2.9410	11	9	0.4444
5	2.9410	2.9775	7	9	0.4444
$\sum_{i=1}^5 X^2$					4.1111
Tabla Chi-cuadrado					7.8147

Tabla 9.4 Prueba de Chi-cuadrada para P_2 .

Clase (k)	Límite inferior	Límite superior	Frecuencia observada (o_i)	Frecuencia esperada (e_i)	X^2
1	8.2666	8.4208	6	9	1
2	8.4208	8.4816	5	9	1.7778
3	8.4816	8.5340	10	9	0.1111
4	8.5340	8.5949	10	9	0.1111
5	8.5949	8.6442	9	9	0
$\sum_{i=1}^5 X^2$					3
Tabla Chi-cuadrado					7.8147

Tabla 9.5 Prueba de Chi-cuadrada para P_3 .

Clase (k)	Límite inferior	Límite superior	Frecuencia observada (o_i)	Frecuencia esperada (e_i)	X^2
1	13.734	13.9969	5	9	1.7778
2	13.9969	14.1164	10	9	0.1111
3	14.1164	14.2193	10	9	0.1111
4	14.2193	14.3388	7	9	0.4444
5	14.3388	14.6881	8	9	0.1111
$\sum_{i=1}^5 X^2$					2.5555
Tabla Chi-cuadrado					7.8147

Para comprobar los resultados obtenidos se realizó la prueba de bondad de ajuste Chi-cuadrada utilizando la función `chi2gof(x)` de MATLAB® que permite determinar si un conjunto de datos tiene una distribución normal, en dado caso el resultado de la prueba es cero. Con tres grados de libertad y un nivel de significancia de 5% se obtiene que para los valores de P_1 es $X^2 = 1.5473$ y comparando este resultado con el valor correspondiente de X^2 que se muestra en el Anexo 3, se observa que $1.5473 \leq 7.815$ por lo tanto se puede afirmar que los resultados obtenidos presentan una distribución normal. Este mismo procedimiento se sigue para los puntos P_2 y P_3 , obteniendo $X^2 = 2.3264$ y $X^2 = 1.9319$ respectivamente. En la Figura 9.23 se muestra el resultado de la prueba para los tres puntos de referencia y se confirma que los datos tienen una distribución normal.

a)

```

chi =
    0

p =
    0.4613

st =
    struct with fields:
        chi2stat: 1.5473
        df: 2
        edges: [2.7660 2.8718 2.8929 2.9141 2.9352 2.9776]
        O: [4 6 13 10 12]
        E: [5.7195 7.6104 10.4186 10.0018 11.2497]

```

b)

```

chi =
    0

p =
    0.5075

st =
    struct with fields:
        chi2stat: 2.3264
        df: 3
        edges: [8.2667 8.4177 8.4554 8.4932 8.5310 8.5687 8.6442]
        O: [9 2 6 7 7 14]
        E: [8.6218 5.1522 6.1870 6.5123 6.0082 12.5186]

```

c)

```

chi =
    0

p =
    0.5867

st =
    struct with fields:
        chi2stat: 1.9319
        df: 3
        edges: [13.7262 14.0148 14.1110 14.2072 14.3033 14.3995 14.6881]
        O: [8 9 10 7 4 7]
        E: [10.1446 7.3878 8.4160 7.6929 5.6422 5.7165]

```

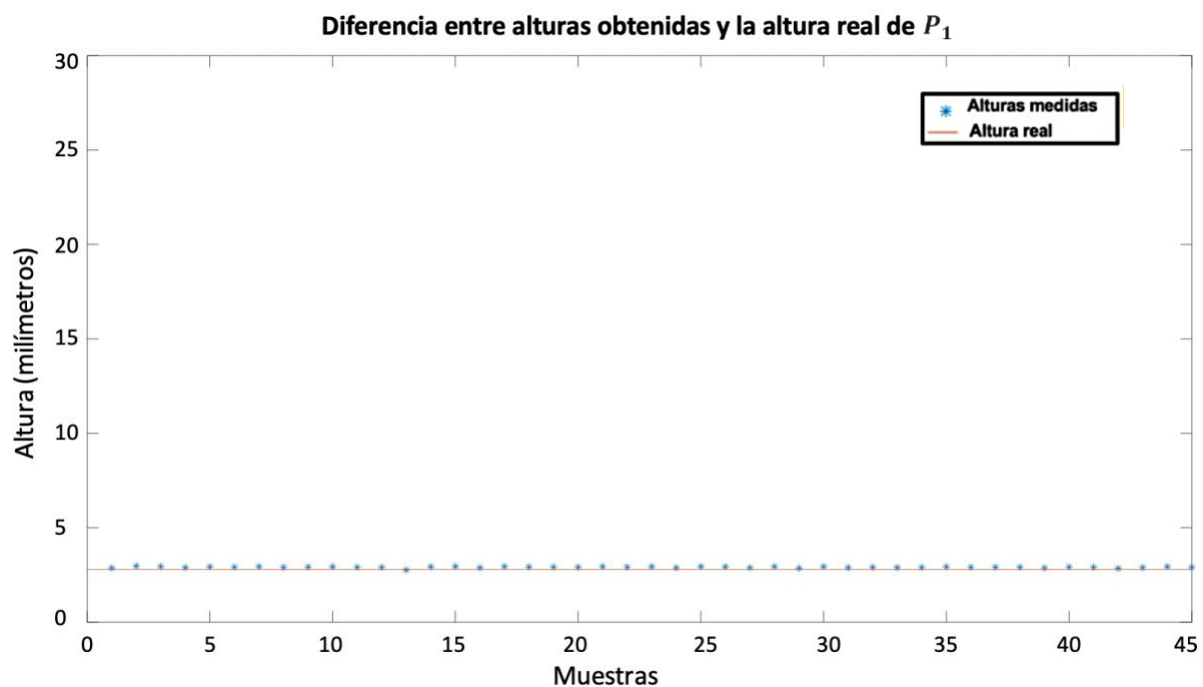
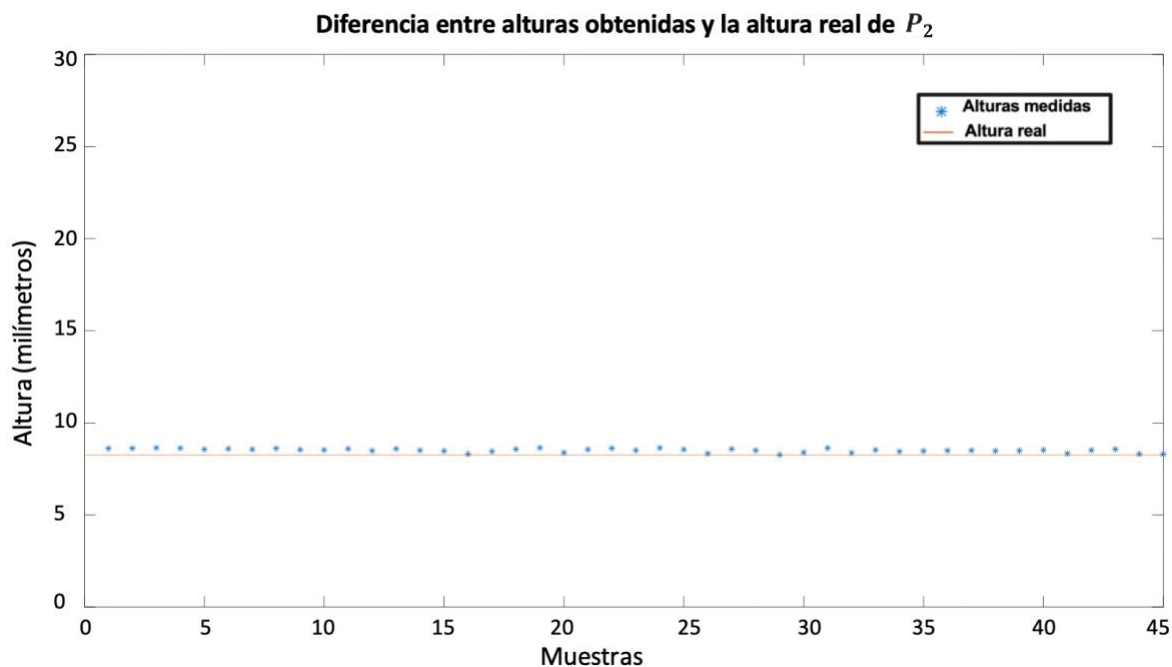
Figura 9.23 Prueba de Chi-cuadrada en MATLAB® para, a) P_1 , b) P_2 y c) P_3 .

9.2.4 Medición del error

Al realizar las pruebas con un objeto de referencia, del cual se conocen las medidas de altura en diferentes puntos de la superficie, se pueden comparar con los valores medidos con la técnica propuesta para evaluar los resultados obtenidos y cuantificar el error en las mediciones. El error es la diferencia entre el valor medido y el real como se muestra en la ecuación (9.2). De esta manera utilizando MATLAB® se calculó el error que se obtiene en cada una de las mediciones realizadas para los valores de altura en los puntos de referencia P_1 , P_2 y P_3 .

$$x_{error} = x_{medido} - x_{verdadero} \quad (9.2)$$

Previamente se describió como se realizaron las mediciones de altura en los tres puntos de referencia utilizando un vernier, en donde se encontró que P_1 tiene una altura de 2.8 mm, P_2 es de 8.25 mm y P_3 es de 14.15 mm. Estos valores reales se pueden comparar directamente con los obtenidos en las muestras tomadas con el sistema de reconstrucción. En la Figura 9.24, Figura 9.25 y Figura 9.26 se muestran gráficamente la comparación entre estos valores, en donde se puede observar con una línea roja los valores reales para P_1 , P_2 y P_3 respectivamente. Con los asteriscos azules se observan los valores de altura que se midieron en las 45 reconstrucciones realizadas para la evaluación de la técnica. Se puede observar que los valores medidos se aproximan en gran medida al valor real y por ello se puede deducir que la técnica propuesta utilizando la identificación de color puede asignar correctamente un valor de altura para cada punto, que será muy cercano al valor de altura real, proporcionando buenos resultados en las reconstrucciones obtenidas. Al conocer el error que se tiene en cada una de las mediciones se puede calcular la exactitud y precisión del sistema desarrollado como se muestra a continuación [123]–[125].

Figura 9.24 Diferencia entre el valor real de P_1 y valores obtenidos.Figura 9.25 Diferencia entre el valor real de P_2 y valores obtenidos.

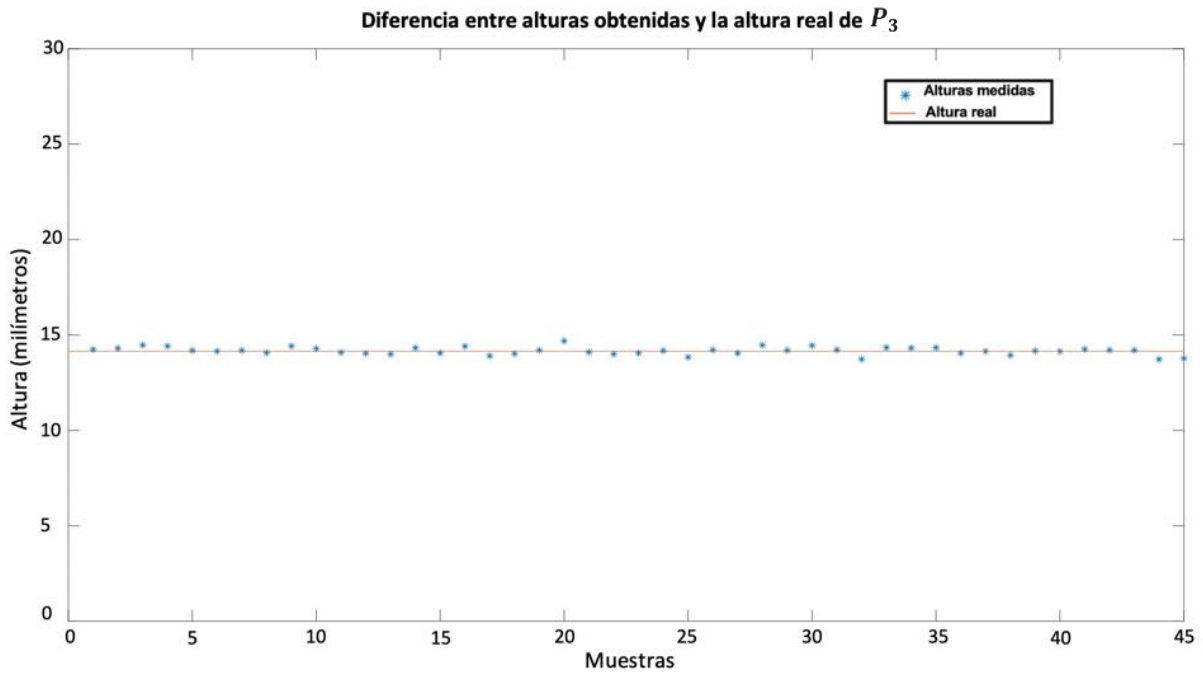


Figura 9.26 Diferencia entre el valor real de P_3 y valores obtenidos

9.2.4.1 Exactitud

La exactitud se puede definir como la concordancia que existe entre el resultado de la medición y el valor verdadero, permite caracterizar cualitativamente la calidad de una medición. Se puede calcular como la media del error, utilizando la ecuación (9.3).

$$\bar{x}_{error} = \frac{\sum_{i=1}^N x_{i,error}}{N} \quad (9.3)$$

En donde $\bar{x}_{error}$ es la media del error, $x_{i,error}$ es el error calculado en cada una de las mediciones y N es el número de muestras. En la Tabla 9.6 se muestran los errores obtenidos con cada una de las 45 reconstrucciones obtenidas en cada punto.

Tabla 9.6 Error calculado en cada una de las mediciones.

Muestra	xi_{error} P_1 (mm)	xi_{error} P_2 (mm)	xi_{error} P_3 (mm)	Muestra	xi_{error} P_1 (mm)	xi_{error} P_2 (mm)	xi_{error} P_3 (mm)
1	0.0704	0.3605	0.0881	24	0.0816	0.3918	0.0241
2	0.1775	0.3649	0.152	25	0.1408	0.3034	-0.3078
3	0.1503	0.3935	0.319	26	0.1370	0.0843	0.0677
4	0.0901	0.3785	0.2697	27	0.0853	0.3353	-0.1048
5	0.1323	0.3136	0.0361	28	0.1455	0.2530	0.3184
6	0.1142	0.3435	0.0003	29	0.0578	0.0166	0.0466
7	0.1384	0.3095	0.0418	30	0.1421	0.1445	0.3
8	0.1057	0.3629	-0.0816	31	0.0894	0.3806	0.0697
9	0.1241	0.2942	0.267	32	0.1057	0.1258	-0.416
10	0.1346	0.2806	0.1354	33	0.0949	0.2816	0.1895
11	0.1095	0.3432	-0.0653	34	0.1047	0.1938	0.1684
12	0.1013	0.2350	-0.1112	35	0.1282	0.2241	0.182
13	-0.0340	0.3435	-0.1568	36	0.1098	0.2428	-0.1065
14	0.1329	0.2585	0.1741	37	0.1105	0.2537	-0.0051
15	0.1540	0.2238	-0.0908	38	0.1115	0.2292	-0.2116
16	0.0826	0.0622	0.2643	39	0.0717	0.2367	0.0173
17	0.1523	0.1976	-0.2425	40	0.1217	0.2751	-0.0078
18	0.1221	0.3187	-0.1296	41	0.1061	0.0853	0.1037
19	0.1187	0.3942	0.0548	42	0.0503	0.2656	0.0602
20	0.1163	0.1343	0.5381	43	0.0935	0.3207	0.0486
21	0.1428	0.3051	-0.0514	44	0.1401	0.0663	-0.4238
22	0.1139	0.3659	-0.151	45	0.1037	0.0523	-0.3741
23	0.1401	0.2564	-0.0939				

Después de calcular el error de cada medición se pudo utilizar la ecuación (9.3), en donde se obtuvo la media del error de las 45 pruebas realizadas:

$$\bar{x}_{error} P_1 = 0.1116 \text{ mm}$$

$$\bar{x}_{error} P_2 = 0.2579 \text{ mm}$$

$$\bar{x}_{error} P_3 = 0.0179 \text{ mm}$$

Considerando que la exactitud del sistema es igual a la media del error, se tiene que para cada punto de referencia:

$$Exactitud_{P_1} = 0.1116 \text{ mm}$$

$$Exactitud_{P_2} = 0.2579 \text{ mm}$$

$$Exactitud_{P_3} = 0.0179 \text{ mm}$$

9.2.4.2 Precisión

La precisión caracteriza el grado de concordancia entre los resultados de las diferentes mediciones bajo las condiciones establecidas. La precisión se toma usualmente como una medida de la repetibilidad que presentan las mediciones realizadas. Para obtener la precisión del sistema es necesario calcular primero la desviación estándar del error como se muestra en la ecuación (9.4).

$$\sigma_{error} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (xi_{error} - \bar{x}_{error})^2}{N - 1}} \quad (9.4)$$

En donde σ_{error} es la desviación estándar del error, $\bar{x}_{error}$ es la media del error, xi_{error} es el error calculado en cada una de las mediciones y N es el número de muestras. Considerando el error calculado en cada una de las mediciones (Tabla 9.6), la media del error de cada punto y utilizando la ecuación anterior se calcularon las desviaciones estándar del error:

$$\sigma_{error} P_1 = 0.0333 \text{ mm}$$

$$\sigma_{error} P_2 = 0.0901 \text{ mm}$$

$$\sigma_{error} P_3 = 0.1819 \text{ mm}$$

La precisión se expresa en términos de la desviación estándar y de un coeficiente de porcentaje de variación; este coeficiente se obtiene por medio de la curva de

distribución normal donde el 95% de los datos se encuentran a $\pm 2\sigma$ de la media y el 99% de los datos se encuentran en el rango de $\pm 3\sigma$ de la media, por lo tanto la precisión de un sistema se calcula con $\pm 3\sigma_{error}$. La precisión de cada punto de medición fue:

$$Precisión_{P_1} = \pm 0.0999 \text{ mm}$$

$$Precisión_{P_2} = \pm 0.2703 \text{ mm}$$

$$Precisión_{P_3} = \pm 0.5457 \text{ mm}$$

Como se puede observar la precisión es distinta para los diferentes puntos de referencia, esto se debe a la identificación de color y posibles variaciones que se pueden presentar en ciertas franjas. En el caso del P_1 la franja de color que se utiliza para la reconstrucción es azul, para P_2 es magenta y en P_3 es roja. El color rojo se puede identificar con facilidad y separar del resto de los colores, mientras que el azul presenta algunos problemas ya que en ciertas regiones el software puede detectarlo como cian o confundirlo con otro color y el magenta es uno de los colores más difíciles de identificar ya que dependiendo de la superficie se pueden formar sombras en la franja y detectar un color incorrecto como rojo o azul. Se puede observar que los resultados obtenidos en los tres puntos de referencia están relacionados con la franja de color en la que se realizó la prueba, por lo que el error que se presenta está asociado a la etapa de identificación, sin embargo, se puede apreciar que el sistema logra entregar resultados con buena precisión y exactitud utilizando la técnica propuesta.

En el siguiente capítulo se dan las conclusiones del trabajo realizado durante el desarrollo e implementación de la técnica propuesta, se mencionan algunas de las dificultades y limitantes presentes y también se detalla el trabajo que se puede realizar a futuro para mejorar los resultados obtenidos.

CAPÍTULO X

CONCLUSIONES

Se desarrolló una técnica de perfilometría diferente a las técnicas que existen en la actualidad, utilizando una nueva configuración ortogonal basándose en la identificación directa del color de un patrón de franjas para obtener la reconstrucción tridimensional de un objeto. El prototipo desarrollado permite reconstruir superficies completas gracias a la montura rotatoria que reduce oclusiones del sistema producidas por la configuración. A continuación se presentan las observaciones que se realizaron durante el desarrollo, limitantes de la técnica y recomendaciones para un trabajo futuro.

10.1 Conclusiones generales

En la actualidad existe una extensa documentación relacionada con diferentes sistemas de perfilometría tridimensional, mejoras y propuestas de diversas técnicas, distintas configuraciones y comparaciones de distintos métodos. Existen muchas áreas en el mercado en las que se pueden aplicar estas investigaciones, ya que permiten reconstruir una superficie tridimensional con rapidez y obtener medidas exactas de la misma.

Aun cuando existe una gran cantidad de investigaciones enfocadas a la perfilometría tridimensional y equipos comerciales para obtener la reconstrucción de objetos, todavía se tienen muchas limitaciones en cuanto a las técnicas que se utilizan, los objetos que se pueden reconstruir y la portabilidad de los equipos. Gran parte de los trabajos realizados se enfocan principalmente en el uso de las técnicas más conocidas, como corrimiento de fase. Algunas implementan el uso de color para mejorar los resultados que se pueden obtener, pero el color se utiliza principalmente para codificar información adicional que ayude a mejorar la reconstrucción de la

superficie con las técnicas convencionales, pero normalmente no se utiliza como única técnica para obtener la topografía del objeto. La mayoría de las técnicas desarrolladas utilizan configuraciones de sistema similares, en los que el ángulo entre cámara y proyector sea pequeño, mientras que con la técnica propuesta se utiliza una nueva configuración ortogonal que no se encontró en trabajos anteriores.

El propósito de esta investigación era desarrollar una técnica de reconstrucción utilizando una configuración ortogonal y la identificación del color de un patrón de franjas, evitando utilizar modelos matemáticos complejos. Con la técnica desarrollada se lograron obtener reconstrucciones de superficies completas utilizando la configuración ortogonal propuesta, una montura rotatoria y proyección de franjas de color donde cada color tiene un valor de altura asignado. Por medio de la identificación directa del matiz y sin la necesidad de utilizar modelos matemáticos avanzados, de triangulación o de corrimiento de fase; se lograron obtener los valores de altura reales de la superficie completa.

10.2 Conclusiones de la configuración ortogonal

El prototipo desarrollado utiliza la configuración propuesta en la que el proyector y la cámara se encuentran colocados de forma ortogonal en el sistema. Esta nueva configuración es indispensable para el uso de la técnica de identificación de color, ya que por medio de esta configuración se puede hacer la relación directa de los valores de altura con cada franja de color. Se probaron diferentes variantes de la configuración para mejorar algunas de las limitantes que se presentaban.

Algunas ventajas del prototipo desarrollado son su facilidad de implementación, la infraestructura requerida es accesible y no requiere de un espacio grande para su montaje y operación. Otra de las ventajas es que al colocar la cámara en dirección ortogonal al objeto se presenta muy poca distorsión en la imagen adquirida, por lo que no es necesario realizar algún proceso de calibración de la cámara para reducir las distorsiones como en otras técnicas. Resultó más fácil implementar el montaje

ortogonal que considerar un ángulo entre cámara y proyector, ya que no se tiene que hacer la medición de los ángulos. Además aún si alguno de los elementos se encontrara un poco desalineado el sistema puede obtener las reconstrucciones adecuadamente, resultando más robusto. No es necesario utilizar la triangulación para obtener los valores de altura reales, ya que estos están directamente asociados al color de las franjas. Sin embargo, el utilizar la configuración propuesta presenta algunas limitaciones que se mencionan a continuación.

El prototipo desarrollado solo se puede utilizar para reconstruir objetos pequeños, ya que el campo de visión no es muy amplio. Esto se puede corregir cambiando la lente utilizada en la cámara o modificando la distancia a la que se encuentra ubicada.

Normalmente, al proyectar un patrón de franjas sobre un objeto con geometría compleja se observan sombras en la superficie debido a la configuración del proyector y la cámara. Incluso, con la configuración ortogonal no es posible reconstruir completamente el objeto. Para corregir esta limitante se propusieron diferentes variantes de la configuración: utilizar múltiples proyectores o una montura rotatoria.

Utilizando dos proyectores con las mismas características se encontró que se aumenta el área de proyección y se reducen algunas sombras en la superficie, obteniendo reconstrucciones casi completas del objeto rápidamente ya que se lleva a cabo la proyección simultánea del patrón. Sin embargo, se siguen teniendo zonas de oclusión del objeto, principalmente con superficies irregulares. Otra desventaja de esta configuración es que se duplica el tamaño del sistema, ya que ambos proyectores deben ser colocados a la misma distancia. Con esta configuración es importante que se tengan las mismas características y configuración en ambos proyectores, y que además se encuentren perfectamente alineados y realizar la proyección con alturas iguales para lograr obtener reconstrucciones correctas. Por lo cual aun cuando se logró reducir las oclusiones y mejorar la reconstrucción obtenida, no es la opción más recomendable sobre todo si se tiene un espacio limitado o no se cuenta con dos unidades de proyección idénticas.

Haber considerado una montura rotatoria hizo posible girar el objeto a diferentes posiciones y obtener la reconstrucción completa de la superficie sin la necesidad de utilizar múltiples proyectores. Al girar el objeto se puede realizar la proyección sobre áreas que se encontraban ocluidas o con topografías irregulares. Dependiendo del tamaño y complejidad de la superficie se puede incrementar el número de giros realizados. Esta configuración puede consumir más recursos al necesitar la montura y su controlador, pero logra mejorar considerablemente las proyecciones realizadas en superficies irregulares y brinda mejores resultados que al utilizar dos proyectores. Una desventaja de esta configuración es que se incrementa el tiempo de proyección, captura y análisis para la obtención de la reconstrucción ya que se debe de realizar la proyección sobre diferentes regiones del objeto y después fusionar los resultados obtenidos. Para reducir el tiempo de reconstrucción podría implementarse el uso del segundo proyector reduciendo el número de giros que se deben de hacer al objeto de prueba.

En las diferentes modificaciones de la configuración se presentan áreas pequeñas de oclusión en el centro de los objetos, sobre los cuales no se logra realizar la proyección. Una de las soluciones es utilizar un algoritmo de interpolación para obtener los valores faltantes considerando los píxeles vecinos de las imágenes capturadas, tal y como se hizo en el desarrollo de esta investigación.

Otra opción sería utilizar un montaje auxiliar con un espejo entre el proyector y el objeto, el cual permita llevar a cabo la proyección sobre las áreas ocluidas, como se muestra en la Figura 10.1. En esta configuración se puede utilizar alguna técnica como corrimiento de fase o Fourier para obtener la reconstrucción de la zona faltante y después fusionarla a la reconstrucción obtenida con la técnica propuesta. De esta forma el sistema sería capaz de procesar y obtener zonas ocluidas con la configuración auxiliar del espejo y el resto con identificación de color utilizando la configuración ortogonal, lo cual no se ha realizado anteriormente en alguno de los trabajos consultados.

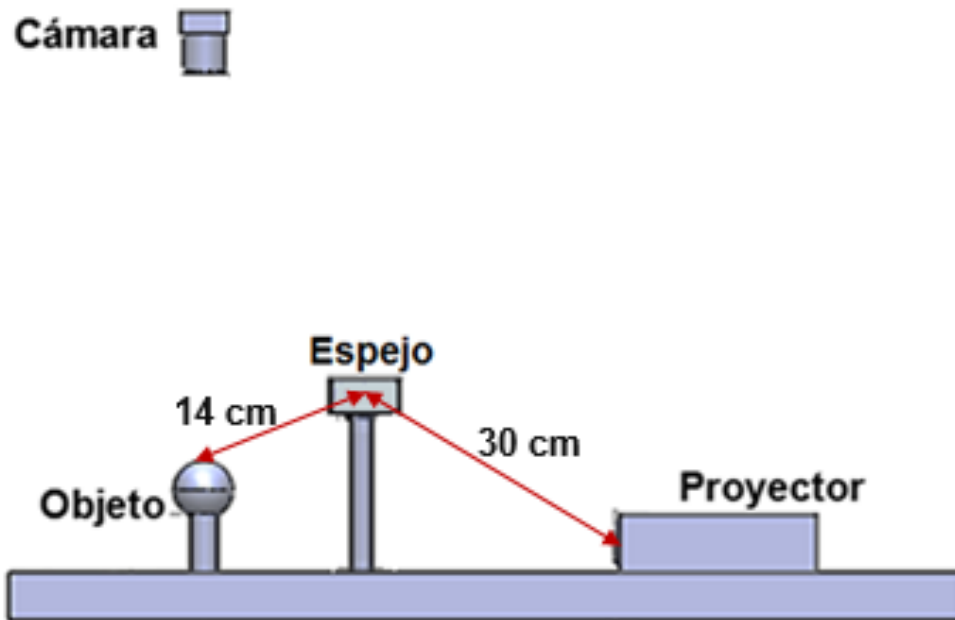


Figura 10.1 Montaje auxiliar con espejo para zonas ocluidas.

10.3 Conclusiones de la técnica de análisis

El análisis propuesto permite codificar un valor o pendiente de valores de altura directamente en cada franja de color, de esta forma identificando únicamente el matiz de la imagen se logra obtener la reconstrucción tridimensional del objeto. Este análisis es simple, rápido y directo, no es necesario utilizar triangulación para convertir los valores a alturas reales, corrimiento de fase o llevar a cabo el desenvolvimiento de fase. Sin embargo, la identificación de color es una de las etapas más complicadas de la técnica y como se ha mostrado existen algunas limitantes.

Para identificar correctamente cada una de las franjas se trabajó sólo con los valores de matiz, excluyendo los valores de saturación y luminosidad. Uno de los problemas más evidentes en esta etapa se presenta en las regiones donde se unen dos franjas de color porque se detecta una línea delgada con diferente valor de matiz. Este solapamiento de color se puede reducir y más adelante se describen algunas opciones para corregir este tipo de error.

Una desventaja de la identificación de color es que este tipo de análisis solo se puede utilizar con objetos blancos, para que no se modifique el matiz identificado. Superficies de color pueden afectar los valores de altura asignados por una identificación incorrecta, pero si se hace un estudio de la alteración del color de las franjas por el color del objeto se podría hacer una compensación para corregir la etapa de identificación. Lee *et al.* [126] presentan un estudio de cómo reducir el error que se obtiene cuando se proyecta un color sobre superficies con color diferente al blanco o con discontinuidades y los métodos mencionados se pueden estudiar para implementar el más apropiado con el sistema propuesto y así reducir esta limitante.

Aun cuando se encontraron limitantes con la técnica propuesta, se lograron obtener resultados efectivos con alta precisión de las superficies de prueba. Algunas de las ventajas que se observaron con la técnica es que se puede utilizar la identificación de color con la configuración ortogonal y no es necesario aplicar modelos matemáticos para calcular la fase del objeto o utilizar triangulación para realizar la conversión a valores de altura reales ya que la técnica propuesta permite codificar directamente el valor de altura a cada franja de color.

10.4 Conclusiones del software desarrollado

El software desarrollado integra las diferentes etapas de la técnica en una interfaz de LabVIEW® desde la generación de franjas de color, proyección del patrón, captura de imagen, comunicación con el controlador, rotación del objeto en la montura, procesamiento de las imágenes, identificación de color, asignación de valores de altura, fusión de mapas obtenidos y reconstrucción tridimensional. Al tener un solo software integrado se evita utilizar diferentes programas o realizar el desarrollo en etapas, lo cual prolongaría el tiempo de reconstrucción.

Una de las ventajas de LabVIEW® es que permite tener una interfaz amigable en donde el usuario puede modificar diferentes parámetros que son importantes para la reconstrucción. También permite llevar a cabo la identificación de color con diferentes

herramientas, en donde utilizando el modelo HSL se logró mejores resultados ya que se considera únicamente el valor de matiz. Una de las ventajas más importantes es que permite ejecutar programas desarrollados en MATLAB® por medio de una ventana donde se introduce el código y las variables, esta herramienta fue muy importante para realizar las pruebas finales y obtener las gráficas de los resultados. MATLAB® cuenta con gráficos tridimensionales, herramientas de estadística y fusión de imágenes más avanzadas que permiten observar con mayor facilidad y detalle los resultados obtenidos. De esta forma se utilizaron los dos softwares a través de la interfaz desarrollada.

Existen modificaciones que se pueden realizar para mejorar la interfaz como contar con la opción para seleccionar el método de fusión de los diferentes mapas de altura y se puedan comprobar los resultados que se obtienen sin tener que hacer modificaciones al código desarrollado. Otro de los cambios importantes sería implementar el uso del montaje auxiliar con el espejo y en el software hacer los cambios necesario para realizar la proyección sobre el espejo, el análisis dependiendo de la técnica utilizada y fusionar el resultado con lo obtenido en la identificación de color.

10.5 Trabajo futuro

Con los resultados presentados se logró obtener reconstrucciones de objetos completos al utilizar la montura rotatoria y se vio que utilizando la identificación de color es posible asignar valores de altura directamente a cada punto de la imagen sin la necesidad de utilizar modelos matemáticos o técnicas adicionales para la conversión a valores reales. Sin embargo, al observar los resultados se puede considerar que al ser una nueva técnica y configuración se tienen limitantes y problemas que se pueden corregir.

Al utilizar la montura rotatoria se incrementa el tiempo de reconstrucción dependiendo de los giros que sean utilizados, ya que se deben adquirir mas imágenes

y llevar a cabo un mayor procesamiento. Para reducir el tiempo se puede disminuir la cantidad de giros utilizados dependiendo de la topografía del objeto o utilizar un segundo proyector con las mismas características como se mencionó anteriormente, aunque esto duplicaría el tamaño del prototipo. Al utilizar un segundo proyector se logra hacer la proyección sobre un área mayor y por lo tanto se reduce el tiempo de prueba.

Para corregir el problema que se presenta en la identificación de color por el solapamiento de franjas de diferente color, se puede utilizar un pequeño espacio de color negro (con valor de altura cero) entre franjas, lo cual permite separar el solapamiento de los colores, sin embargo, esto altera los valores de altura detectados por lo cual se debería hacer un ajuste en la asignación de alturas. Otra posible corrección sería analizar no solamente el color del píxel seleccionado, sino identificar el matiz de los píxeles arriba y debajo de éste, para determinar el color correctamente ya que se conoce el orden de proyección de las franjas.

Una de las limitantes de la configuración ortogonal son las sombras que se forman en objetos irregulares creando zonas de oclusión. Para reducir este problema, como se mencionó anteriormente, se puede implementar el uso de un espejo para realizar la proyección sobre estas zonas y utilizar otra técnica para reconstruir estas regiones. Otra posible sugerencia sería incrementar los grados de libertad de movimiento del objeto para llevar a cabo la proyección del patrón sobre las zonas ocluidas. Sin embargo, al hacer cualquiera de estas dos correcciones se incrementará el tiempo de análisis.

Las técnicas que son normalmente utilizadas logran obtener resultados con gran exactitud y precisión, sin embargo, la técnica de perfilometría desarrollada y presentada en esta tesis es innovadora al proponer una nueva configuración ortogonal y técnica de análisis basada en la identificación directa del color de un patrón de franjas, para obtener la reconstrucción tridimensional de un objeto sin la necesidad de utilizar modelos matemáticos complejos para realizar el análisis. Aun cuando se tienen

algunas limitantes, se logró obtener reconstrucciones de diferentes objetos con una alta precisión.

REFERENCIAS

- [1] T. Yoshizawa, *Handbook of Optical Holography*. Boca Raton, FL., USA: CRC Press, Taylor & Francis Group, LLC, 2009.
- [2] S. Zhang, *Handbook of 3D Machine Vision, Optical Metrology and Imaging*. Boca Raton, FL., USA: CRC Press, Taylor & Francis Group, LLC, 2013.
- [3] N. Portillo Amavisca, L. Molina, and G. Trujillo, *Escáner Láser de Objetos Tridimensionales*, First. Saarbrücken, Germany: Editorial Académica Española, 2011.
- [4] F. Chen, G. M. Brown, and M. Song, "Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods," *Opt. Eng.*, vol. 39, no. 1, pp. 10–22, Jan. 2000, doi: 10.1117/1.602438.
- [5] K. Harding, *Handbook of Optical Dimensional Metrology*. Boca Raton, FL., USA: CRC Press, Taylor & Francis Group, LLC, 2013.
- [6] B. Ribbens, S. Vanlanduit, J. J. J. Dirckx, and P. Cools, "Fringe projection simulation software for 3D shape measurements," in *10th IMEKO Symposium Laser metrology for precision measurement and inspection in industry 2011*, 2011, vol. 2156, pp. 185–191.
- [7] S. S. Gorthi, "Fringe projection techniques: Whither we are?," *Opt. Lasers Eng.*, vol. 48, no. 2, pp. 133–140, Feb. 2010, doi: 10.1016/J.OPTLASENG.2009.09.001.
- [8] J. Geng, "Structured-light 3D surface imaging: a tutorial," *Adv. Opt. Photonics*, vol. 3, no. 2, pp. 128–160, Jun. 2011, doi: 10.1364/AOP.3.000128.
- [9] A. Silva Mejia, "Reconstrucción 3D de objetos empleando proyección de patrones binarios y algoritmos de corrimiento de fase," Universidad de Guadalajara, 2013.
- [10] J. Salvi, S. Fernandez, T. Pribanic, and X. Llado, "A state of the art in structured light patterns for surface profilometry," *Pattern Recognit.*, vol. 43, no. 8, pp. 2666–2680, Aug. 2010, doi: 10.1016/J.PATCOG.2010.03.004.
- [11] J. Salvi, J. Pagès, and J. Batlle, "Pattern codification strategies in structured light

- systems,” *Pattern Recognit.*, vol. 37, no. 4, pp. 827–849, Apr. 2004, doi: 10.1016/J.PATCOG.2003.10.002.
- [12] J. Batlle, E. Mouaddib, and J. Salvi, “Recent progress in coded structured light as a technique to solve the correspondence problem: a survey,” *Pattern Recognit.*, vol. 31, no. 7, pp. 963–982, Jul. 1998, doi: 10.1016/S0031-3203(97)00074-5.
- [13] N. Tornero-Martínez, G. Trujillo-Schiaffino, M. Anguiano-Morales, P. G. Mendoza-Villegas, D. P. Salas-Peimbert, and L. F. Corral-Martínez, “Color profilometry techniques: A review Técnicas de perfilometría en color: Una Revisión,” *Óptica Pura y Apl.*, vol. 51, no. 4, pp. 51001:1–26, 2018, doi: 10.7149/OPA.51.4.51001.
- [14] P. S. Huang, Q. Hu, F. Jin, and F.-P. Chiang, “Color-encoded digital fringe projection technique for high-speed three-dimensional surface contouring,” *Opt. Eng.*, vol. 38, no. 6, pp. 1065–1071, Jun. 1999, doi: 10.1117/1.602151.
- [15] J. Pan, P. S. Huang, and F.-P. Chiang, “Color phase-shifting technique for three-dimensional shape measurement,” *Opt. Eng.*, vol. 45, no. 1, pp. 013602-1-013602–9, Jan. 2006, doi: 10.1117/1.2151160.
- [16] W. Yin, X. Cheng, J. Xie, H. Cui, and Y. Chen, “High-speed 3D profilometry employing HSI color model for color surface with discontinuities,” *Opt. Laser Technol.*, vol. 96, pp. 81–87, Nov. 2017, doi: 10.1016/J.OPTLASTEC.2017.05.007.
- [17] J. L. Flores, A. Muñoz, S. Ordoñez, G. Garcia-Torales, and J. A. Ferrari, “Color-fringe pattern profilometry using an efficient iterative algorithm,” *Opt. Commun.*, vol. 391, pp. 88–93, May 2017, doi: 10.1016/J.OPTCOM.2016.12.058.
- [18] C. Je, S. W. Lee, and R. Park, “Color-Phase Analysis for Sinusoidal Structured Light in Rapid Range Imaging,” in *Proc. 6th Asian Conference on Computer Vision (ACCV 2004)*2, 2004, vol. 1, no. ACCV 2004, pp. 270–275.
- [19] Y. Hu, J. Xi, J. Chicharo, and Z. Yang, “Blind color isolation for color-channel-based fringe pattern profilometry using digital projection,” *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 24, no. 8, pp. 2372–2382, Aug. 2007, doi: 10.1364/JOSAA.24.002372.

- [20] F. Da and H. Huang, "A novel color fringe projection based Fourier transform 3D shape measurement method," *Optik (Stuttgart)*, vol. 123, no. 24, pp. 2233–2237, Dec. 2012, doi: 10.1016/J.IJLEO.2011.11.014.
- [21] M. Padilla, M. Servin, and G. Garnica, "Fourier analysis of RGB fringe-projection profilometry and robust phase-demodulation methods against crosstalk distortion," *Opt. Express*, vol. 24, no. 14, pp. 15417–15428, Jul. 2016, doi: 10.1364/OE.24.015417.
- [22] O. A. Skydan, M. J. Lalor, and D. R. Burton, "Technique for phase measurement and surface reconstruction by use of colored structured light," *Appl. Opt.*, vol. 41, no. 29, pp. 6104–6117, Oct. 2002, doi: 10.1364/AO.41.006104.
- [23] O. E. Castillo, R. Legarda-Sáenz, J. L. Flores, and G. Garcia-Torales, "Measurement of phase objects by the use of color phase-shifting technique," in *Proceedings Volume 8867, Infrared Remote Sensing and Instrumentation XXI*, Sep. 2013, vol. 8867, pp. 886710-1-886710-6, doi: 10.1117/12.2025202.
- [24] N. Karpinsky and S. Zhang, "High-resolution, real-time 3D imaging with fringe analysis," *J. Real-Time Image Process.*, vol. 7, pp. 55–66, 2012, doi: 10.1007/s11554-010-0167-4.
- [25] S. Zhang and P. S. Huang, "High-resolution, real-time three-dimensional shape measurement," *Opt. Eng.*, vol. 45, no. 12, pp. 123601-1-123601-8, Dec. 2006, doi: 10.1117/1.2402128.
- [26] S. Zhang and S.-T. Yau, "High-speed three-dimensional shape measurement system using a modified two-plus-one phase-shifting algorithm," *Opt. Eng.*, vol. 46, no. 11, pp. 113603-1-113603-6, Nov. 2007, doi: 10.1117/1.2802546.
- [27] S. Zhang and P. Huang, "High-Resolution, Real-time 3D Shape Acquisition," in *2004 Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshop*, 2004, pp. 28–37, doi: 10.1109/CVPR.2004.360.
- [28] S. Zhang, "High-resolution, Real-time 3-D Shape Measurement," Stony Brook University, 2005.
- [29] Z. Zhang, C. E. Towers, and D. P. Towers, "Time efficient color fringe projection system for 3D shape and color using optimum 3-frequency Selection," *Opt.*

- Express*, vol. 14, no. 14, pp. 6444–6455, Jul. 2006, doi: 10.1364/OE.14.006444.
- [30] Y. Y. López Domínguez, A. Martínez, and J. A. Rayas, “Topometry and color association by RGB fringe projection technique,” *Rev. Mex. Fis.*, vol. 60, no. 2, pp. 109–113, 2014, [Online]. Available: https://rmf.smf.mx/pdf/rmf/60/2/60_2_102.pdf.
- [31] Y. Y. López Domínguez, A. Martínez, J. A. Rayas, and K. Genovese, “Topometry and color association by RGB fringe projection technique,” in *Proc. SPIE 8287, Eighth Symposium Optics in Industry*, Sep. 2011, vol. 8287, pp. 1–7, doi: 10.1117/12.913344.
- [32] W.-H. Su, “Color-encoded fringe projection for 3D shape measurements,” *Opt. Express*, vol. 15, no. 20, pp. 13167–13181, Oct. 2007, doi: 10.1364/OE.15.013167.
- [33] H. J. Chen, J. Zhang, D. J. Lv, and J. Fang, “3-D shape measurement by composite pattern projection and hybrid processing,” *Opt. Express*, vol. 15, no. 19, pp. 12318–12330, Sep. 2007, doi: 10.1364/OE.15.012318.
- [34] P. Fong and F. Buron, “Sensing Deforming and Moving Objects with Commercial Off the Shelf Hardware,” in *2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR’05) - Workshops*, 2005, vol. 3, pp. 1–8, doi: 10.1109/CVPR.2005.524.
- [35] P. Fong and F. Buron, “High-resolution three-dimensional sensing of fast deforming objects,” in *2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2005, pp. 1606–1611, doi: 10.1109/IROS.2005.1545602.
- [36] G. A. Ayubi, J. M. Di Martino, J. L. Flores, and J. A. Ferrari, “Binary coded linear fringes for three-dimensional shape profiling,” *Opt. Eng.*, vol. 51, no. 10, pp. 103601-1-103601–6, Oct. 2012, doi: 10.1117/1.OE.51.10.103601.
- [37] T. Cheng, Q. Du, and Y. Jiang, “Color fringe projection profilometry using geometric constraints,” *Opt. Commun.*, vol. 398, pp. 39–43, Sep. 2017, doi: 10.1016/J.OPTCOM.2017.04.038.
- [38] W. Li, S. Duan, and Z. Yin, “Phase Unwrapping for Large Discontinuous Surface Based on Color Fringe Projection,” in *2012 International Conference on*

-
- Information Technology and Management Science(ICITMS 2012) Proceedings*, 2013, pp. 563–574, doi: 10.1007/978-3-642-34910-2_66.
- [39] F. Da, L. Wang, and L. Hu, “Fringe projection profilometry based on complementary color-encoded fringe patterns,” *Opt. Laser Technol.*, vol. 44, no. 8, pp. 2332–2339, Nov. 2012, doi: 10.1016/J.OPTLASTEC.2012.04.028.
- [40] M. Anguiano-Morales, G. Garnica, E. Noé Arias, L. Fernando M., D. P. Salas-Peimbert, and G. Trujillo-Schiaffino, “Shape and colour texture of a prehispanic piece by combining fringe projection and colour image fusion,” in *Frontiers in Optics 2012/Laser Science XXVIII*, Oct. 2012, p. FW3A.1, doi: 10.1364/FIO.2012.FW3A.1.
- [41] K. Chen, J. Xi, Y. Yu, S. Tong, and Q. Guo, “Three-dimensional measurement of object surfaces with complex shape and color distribution based on projection of color fringe patterns,” *Appl. Opt.*, vol. 52, no. 30, pp. 7360–7366, Oct. 2013, doi: 10.1364/AO.52.007360.
- [42] D. Caspi, N. Kiryati, and J. Shamir, “Range imaging with adaptive color structured light,” *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 20, no. 5, pp. 470–480, May 1998, doi: 10.1109/34.682177.
- [43] J. Tajima and M. Iwakawa, “3-D data acquisition by Rainbow Range Finder,” in *[1990] Proceedings. 10th International Conference on Pattern Recognition*, 1990, vol. i, pp. 309–313, doi: 10.1109/ICPR.1990.118121.
- [44] Z. J. Geng, “Rainbow three-dimensional camera: new concept of high-speed three-dimensional vision systems,” *Opt. Eng.*, vol. 35, no. 2, pp. 376–383, Feb. 1996, doi: 10.1117/1.601023.
- [45] Y. Hao, F. Zhu, and X. Xu, “Spectral-analysis-based range image acquiring method,” in *SPIE International Symposium on Multispectral Image Processing (ISMIP’98)*, Sep. 1998, vol. 3545, pp. 58–61, doi: 10.1117/12.323638.
- [46] C. K. Yee and K. S. Yen, “Single frame profilometry with rapid phase demodulation on colour-coded fringes,” *Opt. Commun.*, vol. 397, pp. 44–50, Aug. 2017, doi: 10.1016/J.OPTCOM.2017.03.064.
- [47] S. Barone, A. Paoli, and A. V. Razionale, “A Coded Structured Light System

- Based on Primary Color Stripe Projection and Monochrome Imaging,” *Sensors*, vol. 13, no. 10, pp. 13802–13819, Oct. 2013, doi: 10.3390/s131013802.
- [48] L. Zhang, B. Curless, and S. M. Seitz, “Rapid shape acquisition using color structured light and multi-pass dynamic programming,” in *Proceedings. First International Symposium on 3D Data Processing Visualization and Transmission*, 2002, pp. 24–36, doi: 10.1109/TDPVT.2002.1024035.
- [49] P. Fechteler and P. Eisert, “Adaptive color classification for structured light systems,” in *2008 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops*, Jun. 2008, pp. 1–7, doi: 10.1109/CVPRW.2008.4563048.
- [50] J. Pagès, J. Salvi, C. Collewet, and J. Forest, “Optimised De Bruijn patterns for one-shot shape acquisition,” *Image Vis. Comput.*, vol. 23, no. 8, pp. 707–720, Aug. 2005, doi: 10.1016/J.IMAVIS.2005.05.007.
- [51] S. Fernandez and J. Salvi, “A novel structured light method for one-shot dense reconstruction,” in *2012 19th IEEE International Conference on Image Processing*, Sep. 2012, pp. 9–12, doi: 10.1109/ICIP.2012.6466782.
- [52] H. J. Chen, J. Zhang, and J. Fang, “Surface height retrieval based on fringe shifting of color-encoded structured light pattern,” *Opt. Lett.*, vol. 33, no. 16, pp. 1801–1803, Aug. 2008, doi: 10.1364/OL.33.001801.
- [53] X. Zhang and L. Zhu, “Determination of edge correspondence using color codes for one-shot shape acquisition,” *Opt. Lasers Eng.*, vol. 49, no. 1, pp. 97–103, Jan. 2011, doi: 10.1016/J.OPTLASENG.2010.08.013.
- [54] X. Zhang, Y. Li, and L. Zhu, “Color code identification in coded structured light,” *Appl. Opt.*, vol. 51, no. 22, pp. 5340–5356, Aug. 2012, doi: 10.1364/AO.51.005340.
- [55] F.-H. Cheng, C.-T. Lu, and Y.-S. Huang, “3D Object Scanning System by Coded Structured Light,” in *2010 Third International Symposium on Electronic Commerce and Security*, Jul. 2010, pp. 213–217, doi: 10.1109/ISECS.2010.54.
- [56] C. Je, S. W. Lee, and R.-H. Park, “High-Contrast Color-Stripe Pattern for Rapid Structured-Light Range Imaging,” in *8th European Conference on Computer*

- Vision (ECCV 2004)*, 2004, pp. 95–107, doi: 10.1007/978-3-540-24670-1_8.
- [57] K. L. Boyer and A. C. Kak, “Color-Encoded Structured Light for Rapid Active Ranging,” *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. PAMI-9, no. 1, pp. 14–28, Jan. 1987, doi: 10.1109/TPAMI.1987.4767869.
- [58] H. Kawasaki, R. Furukawa, R. Sagawa, and Y. Yagi, “Dynamic scene shape reconstruction using a single structured light pattern,” in *2008 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2008, pp. 1–22, doi: 10.1109/CVPR.2008.4587702.
- [59] A. O. Ulusoy, F. Calakli, and G. Taubin, “One-shot scanning using de bruijn spaced grids,” in *2009 IEEE 12th International Conference on Computer Vision Workshops, ICCV Workshops 2009*, 2009, pp. 1786–1792, doi: 10.1109/ICCVW.2009.5457499.
- [60] R. Sagawa, H. Kawasaki, S. Kiyota, and R. Furukawa, “Dense one-shot 3D reconstruction by detecting continuous regions with parallel line projection,” in *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision*, 2011, pp. 1911–1918, doi: 10.1109/ICCV.2011.6126460.
- [61] J. Salvi, J. Batlle, and E. Mouaddib, “A robust-coded pattern projection for dynamic 3D scene measurement,” *Pattern Recognit. Lett.*, vol. 19, no. 11, pp. 1055–1065, 1998, doi: 10.1016/S0167-8655(98)00085-3.
- [62] Z. Song and R. Chung, “Determining both surface position and orientation in structured-light-based sensing,” *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 32, no. 10, pp. 1770–1780, 2010, doi: 10.1109/TPAMI.2009.192.
- [63] H. Lin, L. Nie, and Z. Song, “A single-shot structured light means by encoding both color and geometrical features,” *Pattern Recognit.*, vol. 54, pp. 178–189, 2016, doi: 10.1016/j.patcog.2015.12.013.
- [64] S. Y. Chen, Y. F. Li, and J. Zhang, “Vision Processing for Realtime 3-D Data Acquisition Based on Coded Structured Light,” *IEEE Trans. Image Process.*, vol. 17, no. 2, pp. 167–176, Feb. 2008, doi: 10.1109/TIP.2007.914755.
- [65] D. Desjardins and P. Payeur, “Dense Stereo Range Sensing with Marching Pseudo-Random Patterns,” in *Fourth Canadian Conference on Computer and*

- Robot Vision (CRV '07)*, May 2007, pp. 216–226, doi: 10.1109/CRV.2007.22.
- [66] H. J. W. J. W. Spoelder, F. M. M. Vos, E. M. Petriu, F. C. A. C. A. Groen, E. M. Petriu, and F. C. A. C. A. Groen, “Some aspects of pseudo random binary array-based surface characterization,” in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2000, vol. 49, no. 6, pp. 1331–1336, doi: 10.1109/19.893279.
- [67] H. J. W. Spoelder, F. M. Vos, E. M. Petriu, and F. C. A. Groen, “Some aspects of pseudo random binary array based surface characterization,” in *IMTC/98 Conference Proceedings. IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference. Where Instrumentation is Going (Cat. No.98CH36222)*, 1998, vol. 1, pp. 2–7, doi: 10.1109/IMTC.1998.679629.
- [68] A. Adan, F. Molina, and L. Morena, “Disordered patterns projection for 3D motion recovering,” in *Proceedings - 2nd International Symposium on 3D Data Processing, Visualization and Transmission.*, 2004, pp. 262–269, doi: 10.1109/TDPVT.2004.1335204.
- [69] A. Adan, F. Molina, A. S. Vazquez, and L. Morena, “3D feature tracking using a dynamic structured light system,” in *Proceedings - 2nd Canadian Conference on Computer and Robot Vision, CRV 2005*, 2005, pp. 168–175, doi: 10.1109/CRV.2005.1.
- [70] R. A. Morano, C. Ozturk, R. Conn, S. Dubin, S. Zietz, and J. Nissanov, “Structured light using pseudorandom codes,” *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 20, no. 3, pp. 322–327, Mar. 1998, doi: 10.1109/34.667888.
- [71] C. J. Davies and M. S. Nixon, “A hough transform for detecting the location and orientation of three-dimensional surfaces via color encoded Spots,” *IEEE Trans. Syst. Man, Cybern. Part B Cybern.*, vol. 28, no. 1, pp. 90–95, 1998, doi: 10.1109/3477.658582.
- [72] C. Albitar, P. Graebing, and C. Doignon, “Robust structured light coding for 3D reconstruction,” in *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision*, 2007, pp. 7–12, doi: 10.1109/ICCV.2007.4408982.
- [73] A. Sicardi-Segade, J. C. Estrada, A. Martínez-García, and G. Garnica, “On axis fringe projection: A new method for shape measurement,” *Opt. Lasers Eng.*, vol.

- 69, pp. 29–34, Jun. 2015, doi: 10.1016/J.OPTLASENG.2015.01.003.
- [74] E. Zendejas Hernandez *et al.*, “Perfilómetro Tridimensional Basado en la Fusión de Datos Obtenidos por Corrimiento de Fase y Triangulación,” *Congr. Int. Ing. Electrónica, ELECTRO 2016*, vol. 38, pp. 94–98, 2016.
- [75] C. Je, K. H. Lee, and S. W. Lee, “Multi-projector color structured-light vision,” *Signal Process. Image Commun.*, vol. 28, no. 9, pp. 1046–1058, 2013, doi: 10.1016/j.image.2013.05.005.
- [76] F. Da and S. Gai, “Flexible three-dimensional measurement technique based on a digital light processing projector,” *Appl. Opt.*, vol. 47, no. 3, pp. 377–385, Jan. 2008, doi: 10.1364/AO.47.000377.
- [77] P. Zhang *et al.*, “High dynamic range 3D measurement based on structured light: A review,” *J. Adv. Manuf. Sci. Technol.*, vol. 1, no. 1, pp. 31–40, 2021, doi: 10.51393/j.jamst.2021004.
- [78] J. Wang and Y. Yang, “High-speed three-dimensional measurement technique for object surface with a large range of reflectivity variations,” *Appl. Opt.*, vol. 57, no. 30, p. 9172, 2018, doi: 10.1364/ao.57.009172.
- [79] J. Wang, Y. Yang, and Y. Zhou, “3-D shape reconstruction of non-uniform reflectance surface based on pixel intensity, pixel color and camera exposure time adaptive adjustment,” *Sci. Rep.*, vol. 11, no. 1, pp. 1–15, 2021, doi: 10.1038/s41598-021-83779-9.
- [80] W. Guo, Z. Wu, Y. Li, Y. Liu, and Q. Zhang, “Real-time 3D shape measurement with dual-frequency composite grating and motion-induced error reduction,” *Opt. Express*, vol. 28, no. 18, p. 26882, 2020, doi: 10.1364/oe.403474.
- [81] W. Li, X. Su, and Z. Liu, “Large-scale three-dimensional object measurement: a practical coordinate mapping and image data-patching method,” *Appl. Opt.*, vol. 40, no. 20, pp. 3326–3333, Jul. 2001, doi: 10.1364/AO.40.003326.
- [82] M. J. Baker, J. Xi, and J. F. Chicharo, “Neural network digital fringe calibration technique for structured light profilometers,” *Appl. Opt.*, vol. 46, no. 8, pp. 1233–1243, Mar. 2007, doi: 10.1364/AO.46.001233.
- [83] S. Zhang and P. S. Huang, “Novel method for structured light system calibration,”

- Opt. Eng.*, vol. 45, no. 8, pp. 083601: 1–8, Aug. 2006, doi: 10.1117/1.2336196.
- [84] A. Asundi and Z. Wensen, “Unified calibration technique and its applications in optical triangular profilometry,” *Appl. Opt.*, vol. 38, no. 16, pp. 3556–3561, Jun. 1999, doi: 10.1364/AO.38.003556.
- [85] D. Malacara, *Color vision and colorimetry: Theory and applications*, Second., vol. PM204. Bellingham, Washington, USA: SPIE Press, 2003.
- [86] G. Sharma, *Digital Color Imaging Handbook*. Boca Raton, FL., USA: CRC Press LLC, 2003.
- [87] I. X-Rite, “A Guide to Understanding Color,” Grand Rapids, Michigan, 2007. Accessed: Mar. 01, 2019. [Online]. Available: https://www.xrite.com/-/media/xrite/files/whitepaper_pdfs/l10-001_a_guide_to_understanding_color_communication/l10-001_understand_color_en.pdf.
- [88] H.-C. Lee, *Introduction to Color Imaging Science*, First. New York, USA: Cambridge University Press, 2005.
- [89] N. A. Ibraheem, M. M. Hasan, R. Z. Khan, and P. K. Mishra, “Understanding Color Models: A Review,” *ARPJ J. Sci. Technol.*, vol. 2, no. 3, pp. 265–275, 2012, doi: 10.1.1.679.8051.
- [90] D. Wu and D.-W. Sun, “Colour measurements by computer vision for food quality control - A review,” *Trends Food Sci. Technol.*, vol. 29, no. 1, pp. 5–20, 2013, doi: 10.1016/j.tifs.2012.08.004.
- [91] K. León, D. Mery, F. Pedreschi, and J. León, “Color measurement in L*a*b* units from RGB digital images,” *Food Res. Int.*, vol. 39, no. 10, pp. 1084–1091, 2006, doi: 10.1016/j.foodres.2006.03.006.
- [92] M. Tkalcic and J. F. Tasic, “Colour spaces: perceptual, historical and applicational background,” in *The IEEE Region 8 EUROCON 2003. Computer as a Tool*, 2003, vol. 2, pp. 304–308, doi: 10.1109/EURCON.2003.1248032.
- [93] P. Nishad and R. M. Chezian, “Various Colour Spaces and Colour Space Conversion Algorithms,” *J. Glob. Res. Comput. Sci.*, vol. 4, no. 1, pp. 44–48, 2013, [Online]. Available: www.jgrcs.info.

- [94] G. Paschos, "Perceptually uniform color spaces for color texture analysis: An empirical evaluation," *IEEE Trans. Image Process.*, vol. 10, no. 6, pp. 932–937, 2001, doi: 10.1109/83.923289.
- [95] G. Saravanan, G. Yamuna, and S. Nandhini, "Real time implementation of RGB to HSV/HSI/HSL and its reverse color space models," in *International Conference on Communication and Signal Processing (ICCSP 2016)*, 2016, pp. 462–466, doi: 10.1109/ICCSP.2016.7754179.
- [96] A. Ford and A. Roberts, "Colour Space Conversions," 1998. http://herakles.fav.zcu.cz/research/night_road/westminster.pdf.
- [97] R. A. Jayashree, "RGB to HSI color space conversion via MACT algorithm," in *International Conference on Communication and Signal Processing, ICCSP 2013 - Proceedings*, 2013, pp. 561–565, doi: 10.1109/iccsp.2013.6577117.
- [98] E. Optics, "Imaging | Edmund Optics," 2014. <https://www.edmundoptics.com/resources/application-notes/imaging/> (accessed Mar. 01, 2019).
- [99] G. P. FLIR, "Selecting a Lens for your Camera," 2017. Accessed: Mar. 01, 2019. [Online]. Available: <https://www.ptgrey.com/support/downloads/10396>.
- [100] L. J. van V. Ian T. Young, Jan J. Gerbrands, *Fundamentals of Image Processing*. Delft University of Technology, 2007.
- [101] M. I. Chacón Murguía, *Procesamiento Digital de Imágenes*. Trillas, 2008.
- [102] National Instruments, *NI Vision IMAQ Vision Concepts Manual*. 2005.
- [103] A. Sharma and A. Saroliya, "A Brief Review of Different Image Fusion Algorithm," *Int. J. Sci. Res.*, vol. 4, no. 6, pp. 2319–7064, 2013, [Online]. Available: www.ijsr.net.
- [104] M. Sharma, "A review: image fusion techniques and applications," *Int J Comput Sci Inf Technol*, vol. 7, no. 3, pp. 1082–1085, 2016.
- [105] K. Rani and R. Sharma, "Study of Different Image fusion Algorithm," *Int. J. Emerg. Technol. Adv. Eng.*, vol. 3, no. 5, pp. 288–291, 2013.
- [106] N. Jha, A. K. Saxena, A. Shrivastava, and M. Manoria, "A review on various image fusion algorithms," in *IEEE International Conference on Recent*

- Innovations in Signal Processing and Embedded Systems, RISE 2017*, 2018, no. 1, pp. 163–167, doi: 10.1109/RISE.2017.8378146.
- [107] J. Suthakar, “Study of Image Fusion-Techniques, Method and Applications,” *Int. J. Comput. Sci. Mob. Comput.*, vol. 3, no. 11, pp. 469–476, 2014, [Online]. Available: www.ijcsmc.com.
- [108] S. A. Rahim, “Labview Based Image Fusion Using Discrete Wavelet Transform,” *Int. J. Eng. Res. Technol.*, vol. 2, no. 5, pp. 708–713, 2013.
- [109] E. H. Adelson, P. J. Burt, C. H. Anderson, J. M. Ogden, and J. R. Bergen, “Pyramid Methods in Image Processing,” *RCA Eng.*, vol. 29, no. 6, pp. 33–41, 1984.
- [110] Y. Zheng, “Multi-scale fusion algorithm comparisons: Pyramid, DWT and iterative DWT,” in *2009 12th International Conference on Information Fusion, FUSION 2009*, 2009, pp. 1060–1067.
- [111] L. Mingjing, Z. Jianfu, and L. Jie, “Research on Image Fusion Rules Based on Contrast Pyramid,” *Proc. 2018 Chinese Autom. Congr. CAC 2018*, pp. 1361–1364, 2019, doi: 10.1109/CAC.2018.8623196.
- [112] R. M. S. Priya and V. S. Dharun, “Image fusion techniques for high resolution images - A comparison,” in *IEEE 2014 International Conference on Control, Instrumentation, Communication and Computational Technologies, ICCICCT 2014*, 2014, pp. 1266–1270, doi: 10.1109/ICCICCT.2014.6993155.
- [113] H. H. Wang, J. Zhang, and W. Wang, “Fusion algorithm for images data by using steerable pyramid transform,” in *IEEE 2005 International Conference on Machine Learning and Cybernetics, ICMLC 2005*, 2005, no. August, pp. 5050–5054, doi: 10.1109/icmlc.2005.1527833.
- [114] N. Tornero, M. Marcelino, and A. Morales, “Image stitching for fringe projection profilometry,” *Opt. Quantum Electron.*, no. 2909, pp. 1–14, 2021, doi: 10.1007/s11082-021-02946-4.
- [115] G. P. FLIR, “Chameleon USB 2.0 Camera: Technical Reference,” 2013.
- [116] G. P. FLIR, “Chameleon USB 2.0 Camera: Imaging Performance Specification,” 2013.

- [117] Edmund Optics, “18 mm DG Series Fixed Focal Length Lens: Technical Specifications,” 2019.
- [118] I. National Aperture, “Motion Products | MM-4M-R Rotary Motorized Stages | National Aperture inc.” <http://www.naimotion.com/mm4mr.htm> (accessed Jul. 25, 2019).
- [119] I. National Aperture, “6 Position Encoder Resolution Data Sheet.” Accessed: Jul. 25, 2019. [Online]. Available: www.nationalaperture.com/www.naimotion.com.
- [120] I. National Aperture, “MicroMini Controller User Manual.” pp. 1–73.
- [121] N. Portillo Amavisca, “Optimización y calibración de un sistema láser de digitalización y reconstrucción de objetos sólidos en rotación,” Instituto Tecnológico de Chihuahua, 2008.
- [122] N. Tornero Martínez, “Perfilometría de superficies por detección directa de franjas de color,” Instituto Tecnológico de Chihuahua, 2016.
- [123] R. E. Walpole, R. H. Myers, M. Sharon L., and Y. Keying, *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*. México: Pearson, 2012.
- [124] E. O. Doebelin, *Measurement systems: Application and Design*, First. United States of America: McGraw-Hil, 1966.
- [125] J. O. Westgard, R. N. Carey, and S. Wold, “Criteria for judging precision and accuracy in method development and evaluation,” *Clin. Chem.*, vol. 20, no. 7, pp. 825–833, 1974, doi: 10.1093/clinchem/20.7.825.
- [126] K. H. Lee, C. Je, and S. W. Lee, “Color-stripe structured light robust to surface color and discontinuity,” in *8th Asian Conference on Computer Vision*, 2007, no. PART II, pp. 507–516, doi: 10.1007/978-3-540-76390-1_50.

ANEXOS Y APÉNDICES

ANEXOS

ANEXO 1

CARACTERÍSTICAS DE LA CÁMARA CMLN-132C-CS

Model	Version	MP	Imaging Sensor
CMLN-13S2C-CS CMLN-13S2M-CS	Color Mono	1.3 MP	■ Sony ICX445 CCD, 1/3", 3.75 μm ■ Global Shutter ■ 18 FPS at 1296 x 964

	All Chameleon Models
Imaging Performance (EMVA 1288)	See the Imaging Performance Specification , which includes quantum efficiency, saturation capacity (full well depth), read noise, dynamic range and signal to noise ratio.
A/D Converter	12-bit
Video Data Output	8-bit and 16-bit digital data
Image Data Formats	Y8, Y16 (monochrome), 8-bit and 16-bit Raw Bayer data (color)
Partial Image Modes	Pixel binning and region of interest (ROI) modes
Image Processing	Color/Greyscale conversion, gamma, lookup table, white balance
Shutter	Global shutter; Automatic/manual/one-push/extended shutter modes 0.01 ms to >10 seconds (extended shutter mode)
Gain	Automatic/manual/one-push modes 0 dB to 24 dB
Gamma	0.50 to 4.00
White Balance	Automatic/manual/one-push modes
Digital Interface	5-pin Mini-B USB2.0 digital interface for camera control, video data transmission, and power
Transfer Rates	480 Mbit/s
GPIO	7-pin JST GPIO connector, 4 pins for trigger and strobe, 1 pin +3.3 V, 1 VEXT pin for external power
External Trigger Modes	IIDC Trigger Modes 0, 1, 3, and 14
Synchronization	Via external trigger or software trigger
Memory Channels	3 memory channels for custom camera settings
Flash Memory	256 KB non-volatile memory
Dimensions	25.5 mm x 44 mm x 41 mm (excluding lens holder and connectors)
Mass	37 grams (without optics or tripod mounting bracket)
Power Consumption	2 W, 4.745 to 5.25 V via Mini-B USB 2.0 interface or JST 7-pin GPIO connector
Machine Vision Standard	IIDC v1.31
Camera Control	Via FlyCapture SDK, CSRs, or third party software

ANEXO 2

ESPECIFICACIONES DE LENTE DOBLE GAUSS CON DISTANCIA FOCAL DE 18 mm

TECHSPEC® FOCUSABLE DOUBLE GAUSS IMAGING LENS #54-857 • 18mm FL • f/4

TECHSPEC® DOUBLE GAUSS MACRO IMAGING LENS

Our TECHSPEC® Double Gauss lenses provide high-performance, compact size and exceptional value. Their expanded performance yields image resolution greater than 100 lp/mm on up to a 1.3" sensor. The focus ring and manual iris can lock in place with the included thumbscrews. Set screws are also included to facilitate a low profile integration in machine vision applications. Mechanical design also allows the focusing movement to be motorized by the user.



Focal Length:	18mm
Minimum Working Distance¹:	210mm
Focus Range¹ (lockable):	210mm – ∞
Length:	32.3mm
Max. Rear Protrusion:	2.5mm
Filter Thread:	M30.5 x 0.5
Max. Sensor Format:	14.3mm
Camera Mount:	C-mount

Aperture (f/#):	f/4 - f/12
Magnification Range:	0X – 0.08X
Distortion²:	<2%
Object Space NA²:	0.0097
No. of Elements (Groups):	6 (4)
AR Coating:	1/4λ MgF ₂ @ 550nm
Weight:	114g

Sensor Size	1/2.5"	1/2"	1/1.8"	2/3"	Sony 2/3" *	1"	1" Sq [†]	4/3"
Field of View ³	70.2mm - 17.5°	78.8mm - 19.6°	88.8mm - 22.0°	108.7mm - 26.8°	104.3mm - 25.8°	159.2mm - 38.4°	139.5mm - 34.0°	NA

1. From front of housing

2. At Min Working Distance

3. Horizontal FOV on standard 4:3 sensor format

* 6:5 aspect ratio

† 1:1 aspect ratio

Specifications subject to change

ANEXO 3

VALORES CRÍTICOS DE LA DISTRIBUCIÓN DE CHI-CUADRADA

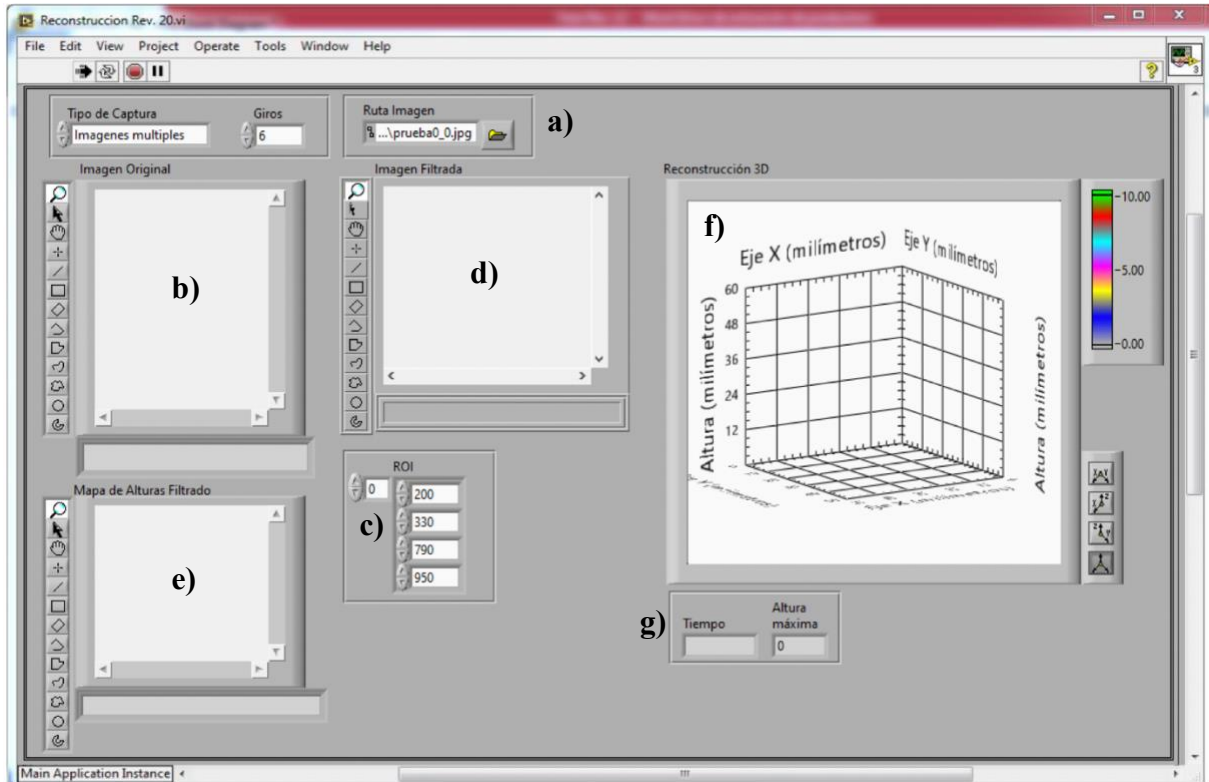
Critical Values for Chi-Square Distribution.

df	Upper Tail Probability									
	0.2	0.1	0.05	0.04	0.03	0.025	0.02	0.01	0.005	0.0005
1	1.642	2.706	3.841	4.218	4.709	5.024	5.412	6.635	7.879	12.116
2	3.219	4.605	5.991	6.438	7.013	7.378	7.824	9.210	10.597	15.202
3	4.642	6.251	7.815	8.311	8.947	9.348	9.837	11.345	12.838	17.730
4	5.989	7.779	9.488	10.026	10.712	11.143	11.668	13.277	14.860	19.997
5	7.289	9.236	11.070	11.644	12.375	12.833	13.388	15.086	16.750	22.105
6	8.558	10.645	12.592	13.198	13.968	14.449	15.033	16.812	18.548	24.103
7	9.803	12.017	14.067	14.703	15.509	16.013	16.622	18.475	20.278	26.018
8	11.030	13.362	15.507	16.171	17.010	17.535	18.168	20.090	21.955	27.868
9	12.242	14.684	16.919	17.608	18.480	19.023	19.679	21.666	23.589	29.666
10	13.442	15.987	18.307	19.021	19.922	20.483	21.161	23.209	25.188	31.420
11	14.631	17.275	19.675	20.412	21.342	21.920	22.618	24.725	26.757	33.137
12	15.812	18.549	21.026	21.785	22.742	23.337	24.054	26.217	28.300	34.821
13	16.985	19.812	22.362	23.142	24.125	24.736	25.472	27.688	29.819	36.478
14	18.151	21.064	23.685	24.485	25.493	26.119	26.873	29.141	31.319	38.109
15	19.311	22.307	24.996	25.816	26.848	27.488	28.259	30.578	32.801	39.719
16	20.465	23.542	26.296	27.136	28.191	28.845	29.633	32.000	34.267	41.308
17	21.615	24.769	27.587	28.445	29.523	30.191	30.995	33.409	35.718	42.879
18	22.760	25.989	28.869	29.745	30.845	31.526	32.346	34.805	37.156	44.434
19	23.900	27.204	30.144	31.037	32.158	32.852	33.687	36.191	38.582	45.973
20	25.038	28.412	31.410	32.321	33.462	34.170	35.020	37.566	39.997	47.498
21	26.171	29.615	32.671	33.597	34.759	35.479	36.343	38.932	41.401	49.011
22	27.301	30.813	33.924	34.867	36.049	36.781	37.659	40.289	42.796	50.511
23	28.429	32.007	35.172	36.131	37.332	38.076	38.968	41.638	44.181	52.000
24	29.553	33.196	36.415	37.389	38.609	39.364	40.270	42.980	45.559	53.479
25	30.675	34.382	37.652	38.642	39.880	40.646	41.566	44.314	46.928	54.947
26	31.795	35.563	38.885	39.889	41.146	41.923	42.856	45.642	48.290	56.407
27	32.912	36.741	40.113	41.132	42.407	43.195	44.140	46.963	49.645	57.858
28	34.027	37.916	41.337	42.370	43.662	44.461	45.419	48.278	50.993	59.300
29	35.139	39.087	42.557	43.604	44.913	45.722	46.693	49.588	52.336	60.735
30	36.250	40.256	43.773	44.834	46.160	46.979	47.962	50.892	53.672	62.162
31	37.359	41.422	44.985	46.059	47.402	48.232	49.226	52.191	55.003	63.582
32	38.466	42.585	46.194	47.282	48.641	49.480	50.487	53.486	56.328	64.995
33	39.572	43.745	47.400	48.500	49.876	50.725	51.743	54.776	57.648	66.403
34	40.676	44.903	48.602	49.716	51.107	51.966	52.995	56.061	58.964	67.803
35	41.778	46.059	49.802	50.928	52.335	53.203	54.244	57.342	60.275	69.199
36	42.879	47.212	50.998	52.137	53.560	54.437	55.489	58.619	61.581	70.588
37	43.978	48.363	52.192	53.344	54.781	55.668	56.730	59.893	62.883	71.972
38	45.076	49.513	53.384	54.547	56.000	56.896	57.969	61.162	64.181	73.351
39	46.173	50.660	54.572	55.748	57.215	58.120	59.204	62.428	65.476	74.725
40	47.269	51.805	55.758	56.946	58.428	59.342	60.436	63.691	66.766	76.095
41	48.363	52.949	56.942	58.142	59.638	60.561	61.665	64.950	68.053	77.459
42	49.456	54.090	58.124	59.335	60.845	61.777	62.892	66.206	69.336	78.820
43	50.548	55.230	59.304	60.526	62.050	62.990	64.116	67.459	70.616	80.176
44	51.639	56.369	60.481	61.714	63.253	64.201	65.337	68.710	71.893	81.528
45	52.729	57.505	61.656	62.901	64.453	65.410	66.555	69.957	73.166	82.876
46	53.818	58.641	62.830	64.085	65.652	66.617	67.771	71.201	74.437	84.220
47	54.906	59.774	64.001	65.268	66.847	67.821	68.985	72.443	75.704	85.560
48	55.993	60.907	65.171	66.448	68.041	69.023	70.197	73.683	76.969	86.897
49	57.079	62.038	66.339	67.627	69.233	70.222	71.406	74.919	78.231	88.231
50	58.164	63.167	67.505	68.804	70.423	71.420	72.613	76.154	79.490	89.561

APÉNDICES

APÉNDICE A

INTERFAZ DE USUARIO DEL SOFTWARE DE RECONSTRUCCIÓN

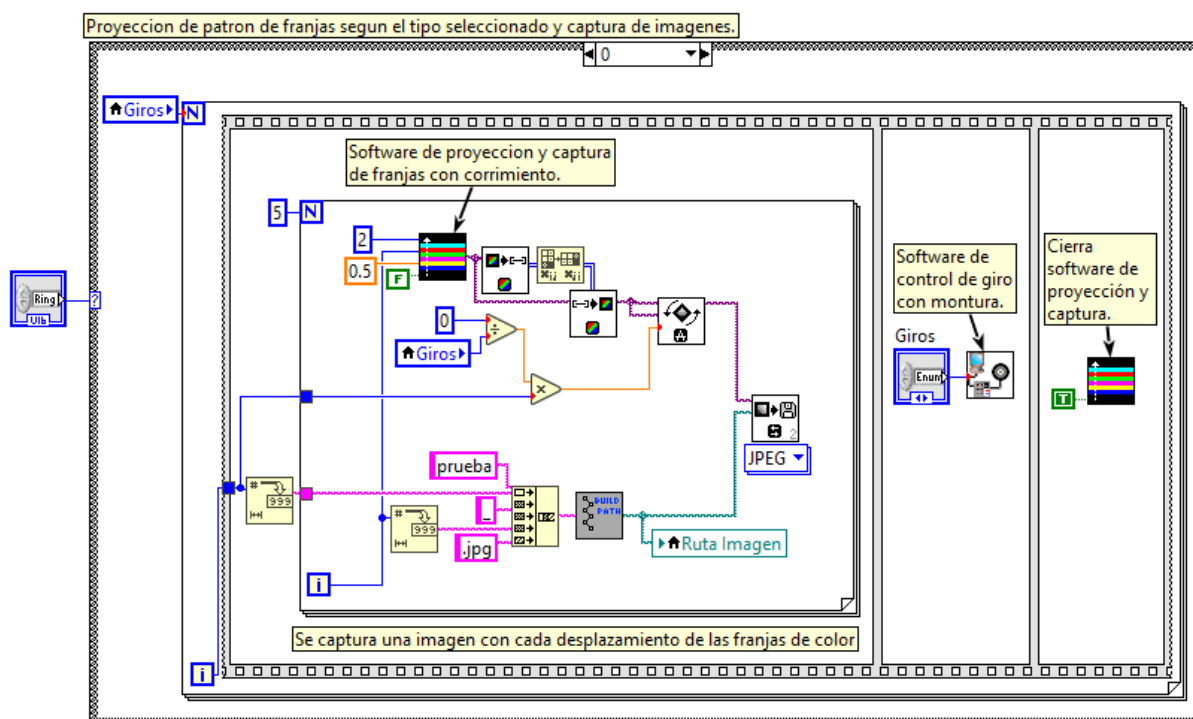


- a) Selección de tipo de captura y número de giros de montura rotatoria. Se muestra ruta de la imagen.
- b) Imagen original.
- c) Selección de la región de interés.
- d) Imagen filtrada.
- e) Mapa de alturas obtenido.
- f) Reconstrucción tridimensional
- g) Tiempo de reconstrucción y valor de altura máxima.

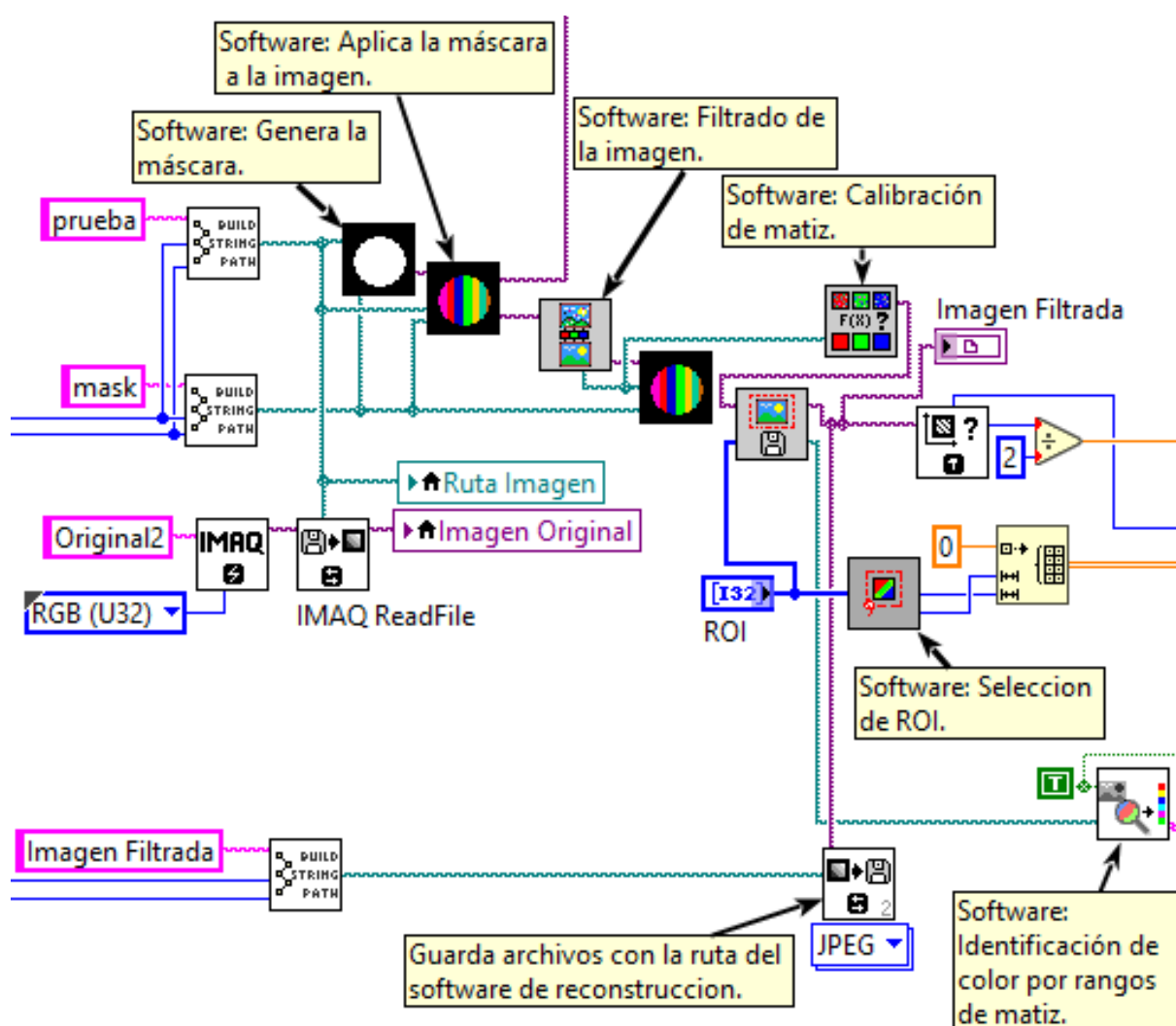
APÉNDICE B

SOFTWARE DE RECONSTRUCCIÓN EN LABVIEW®

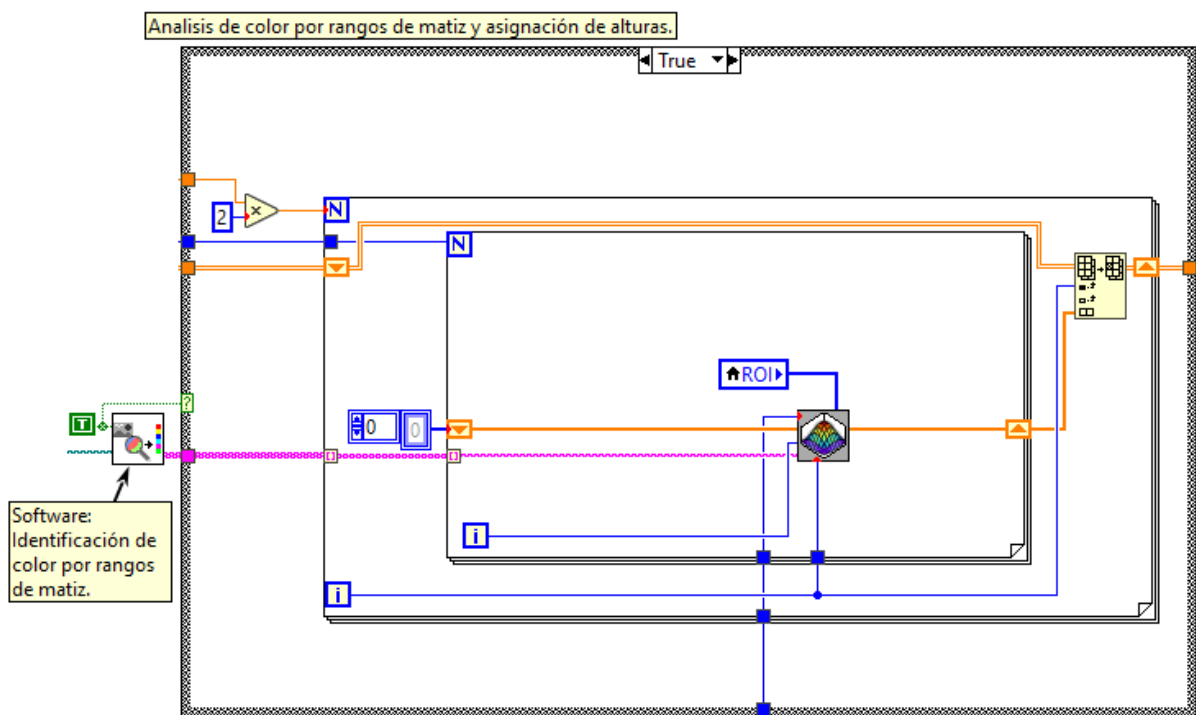
Código fuente (parte 1: proyección de franjas, captura de imágenes y giro del objeto)



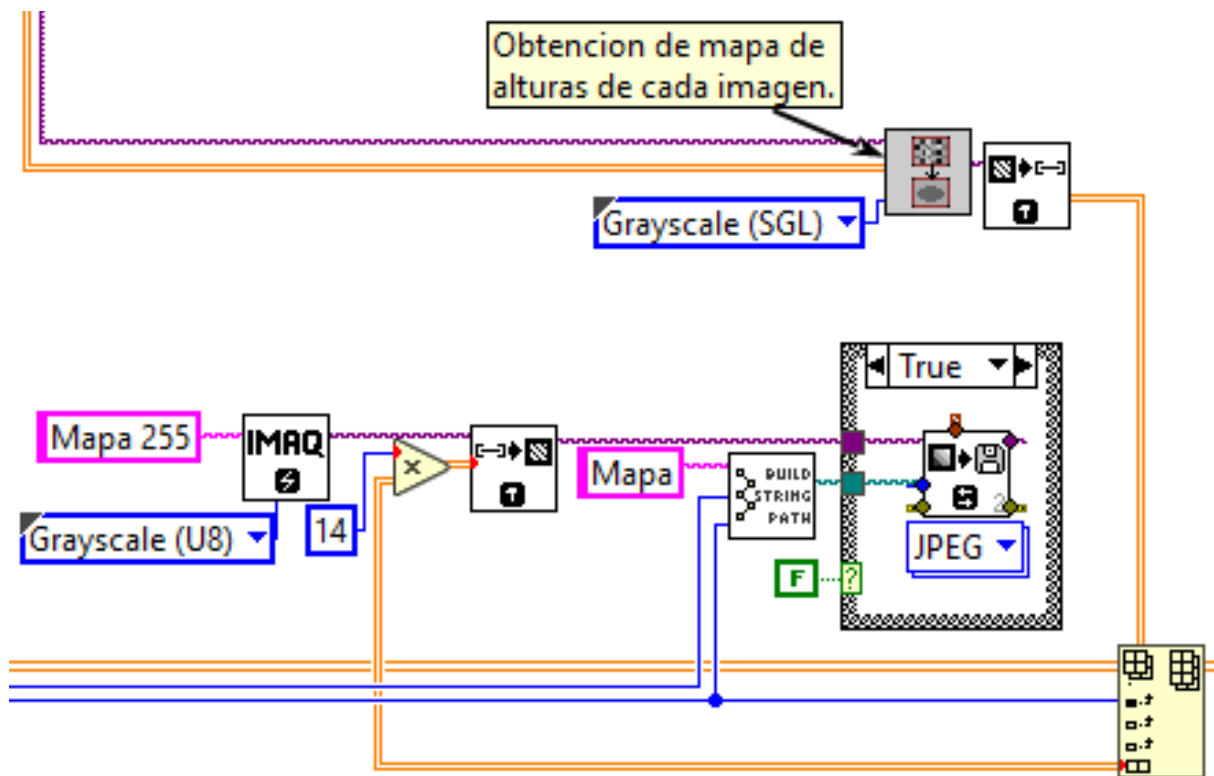
Código fuente (parte 2: procesamiento de imagen)



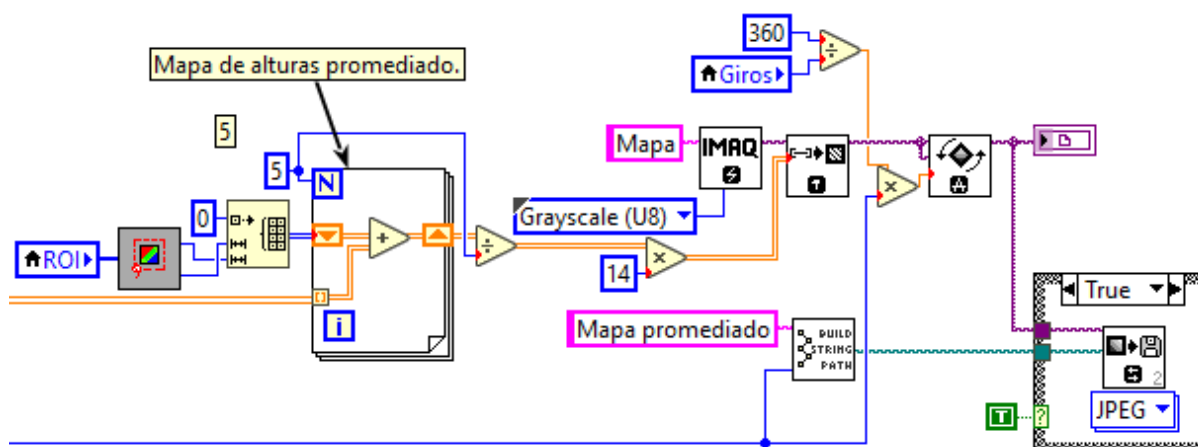
Código fuente (parte 3: identificación color por rangos de matiz y análisis de altura)

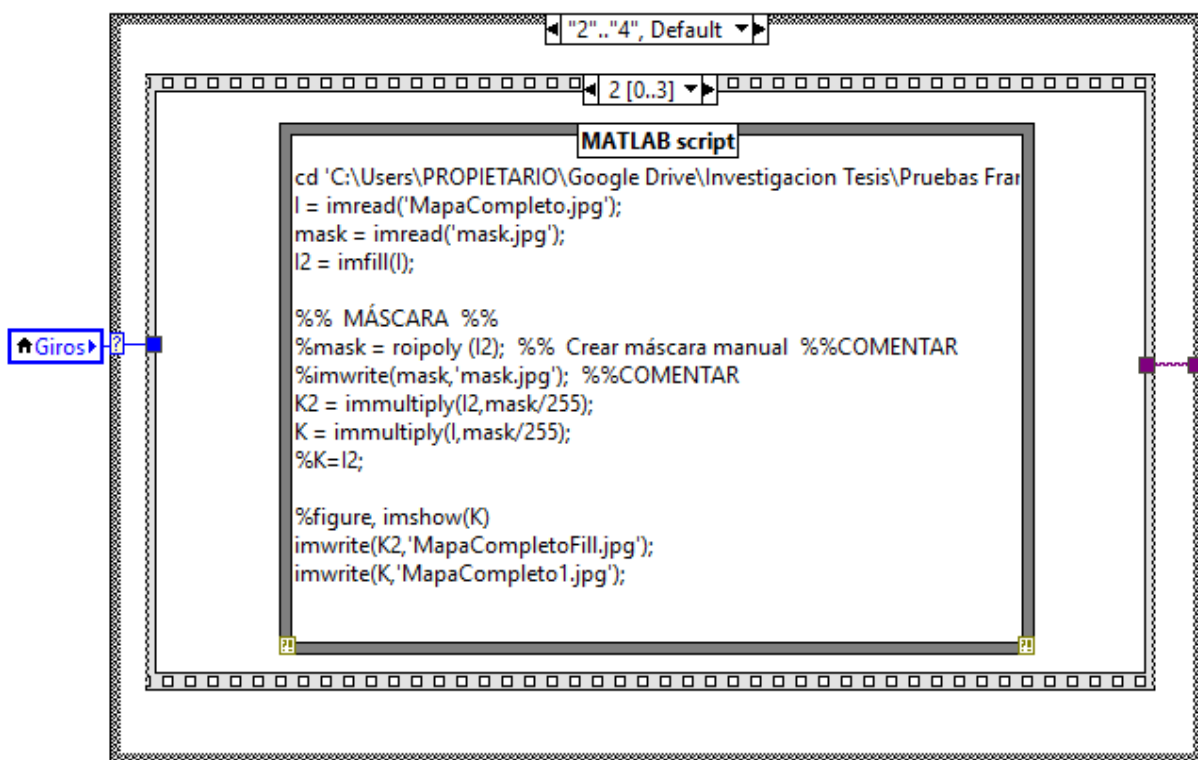


Código fuente (parte 4: mapa de alturas)

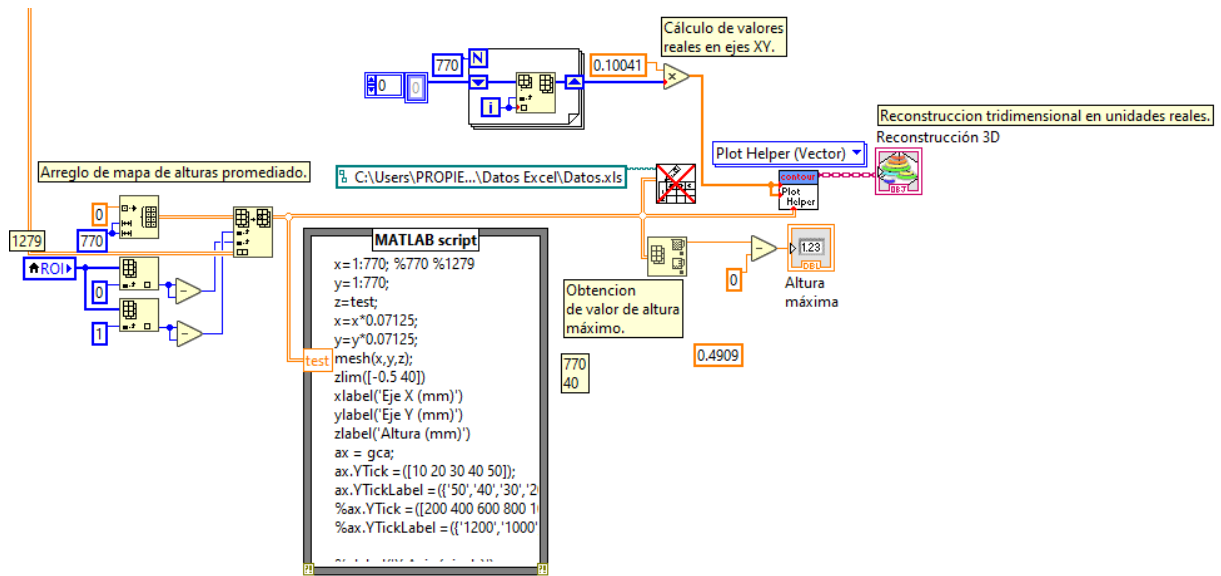


Código fuente (parte 5: mapa de alturas promediado y rotación)



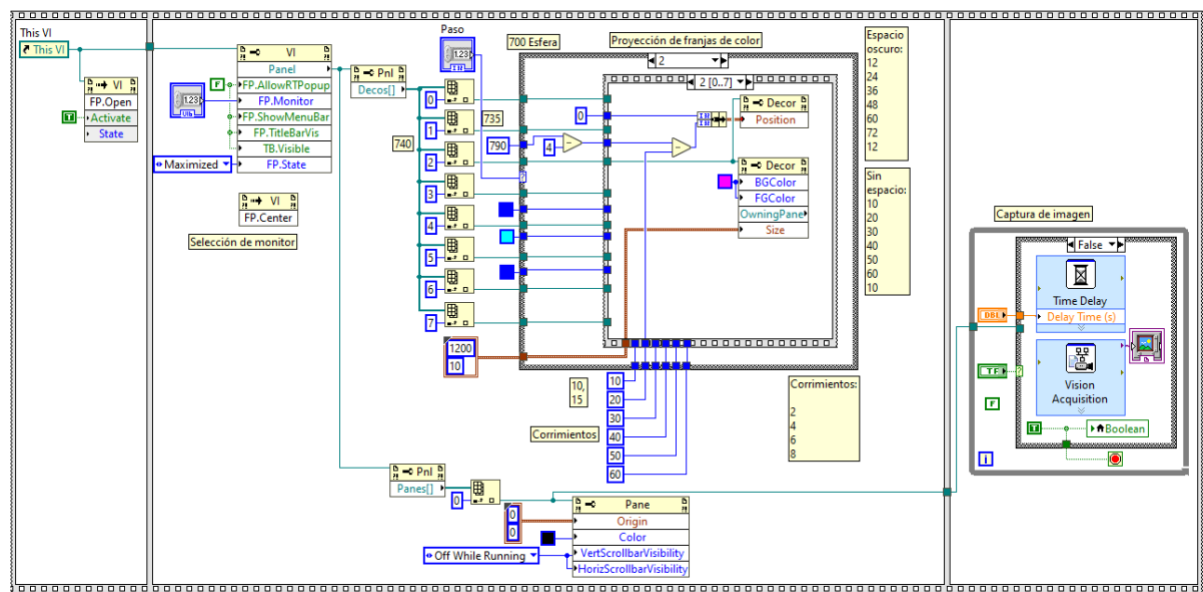
Código fuente (parte 6: fusión de mapas de alturas promediados)

Código fuente (parte 7: reconstrucción tridimensional)



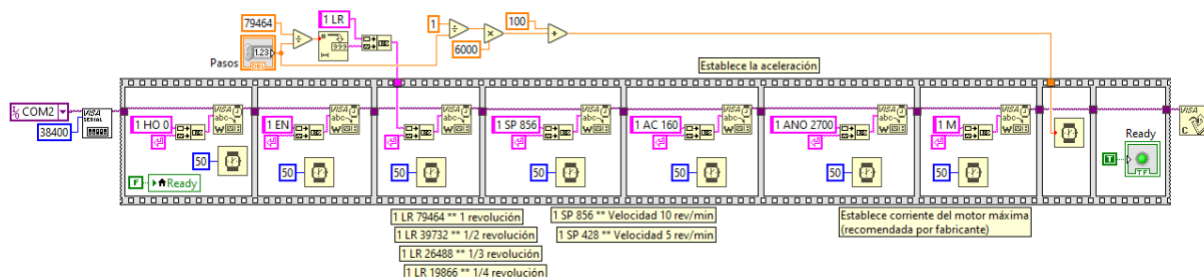
APÉNDICE C

SOFTWARE DE PROYECCIÓN DE FRANJAS EN LABVIEW®



APÉNDICE D

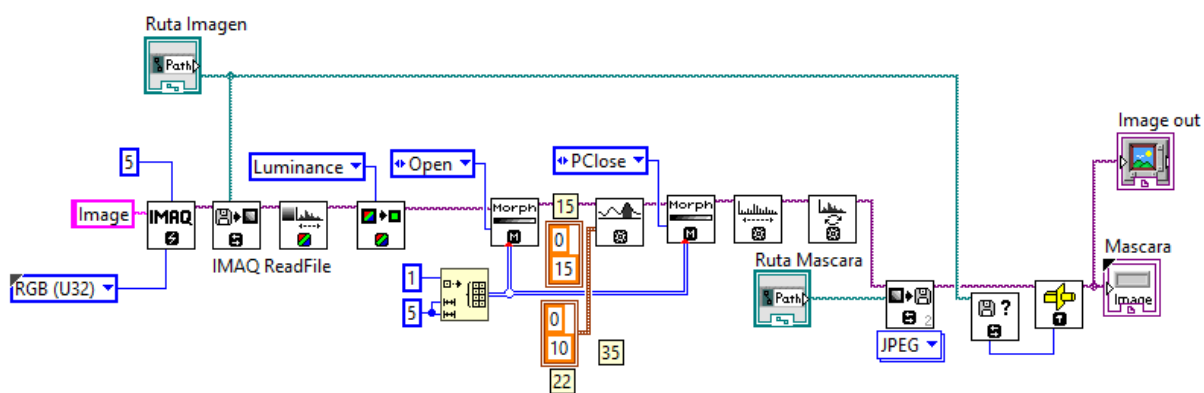
SOFTWARE DE CONTROL DE GIROS CON MONTURA ROTATORIA®



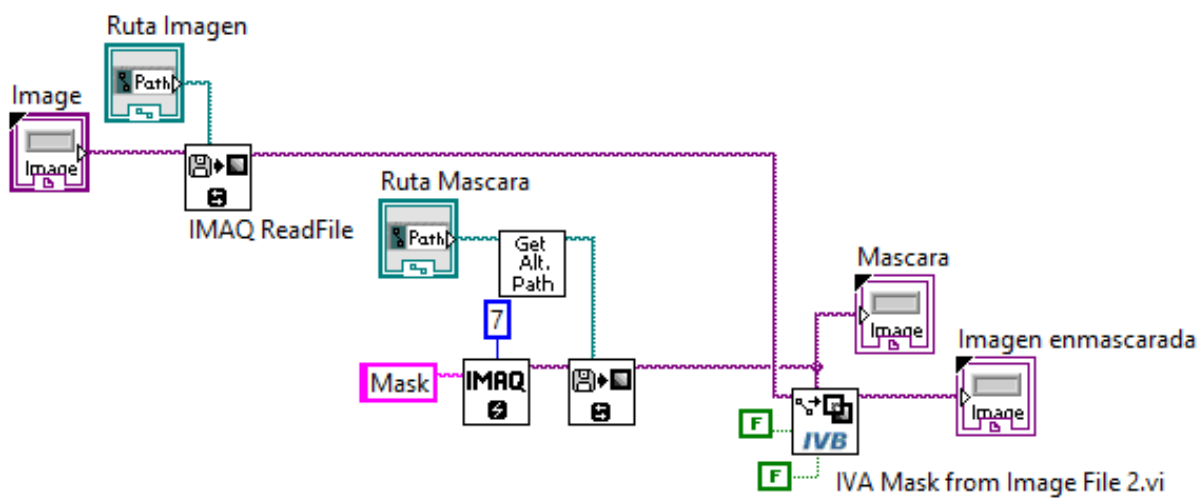
APÉNDICE E

SOFTWARE DE GENERACIÓN Y APLICACIÓN DE MÁSCARA EN LABVIEW®

Generación de máscara

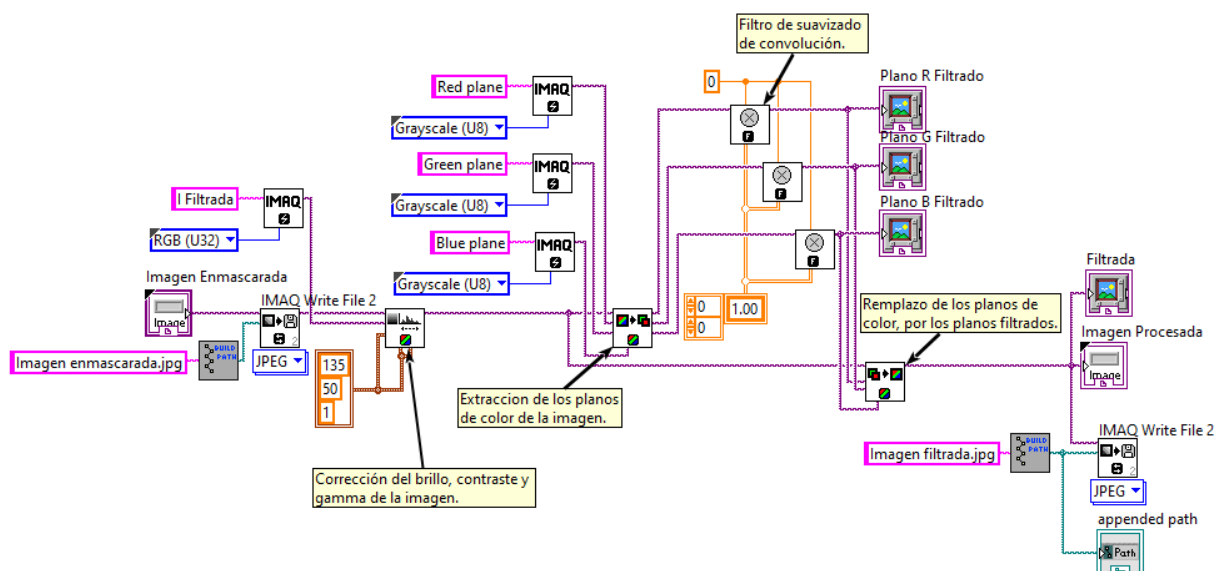


Aplicación de máscara



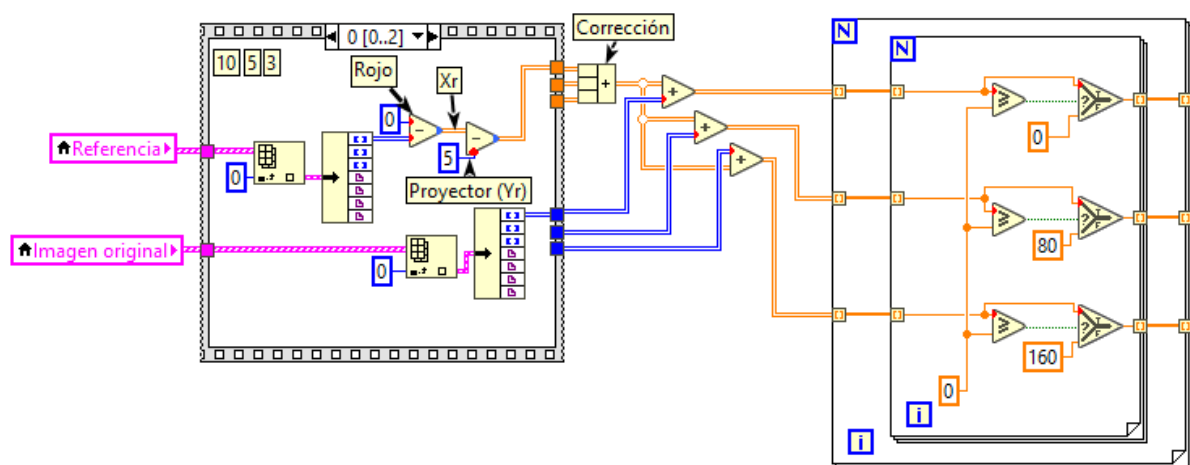
APÉNDICE F

SOFTWARE DE FILTRADO DE LA IMAGEN EN LABVIEW®

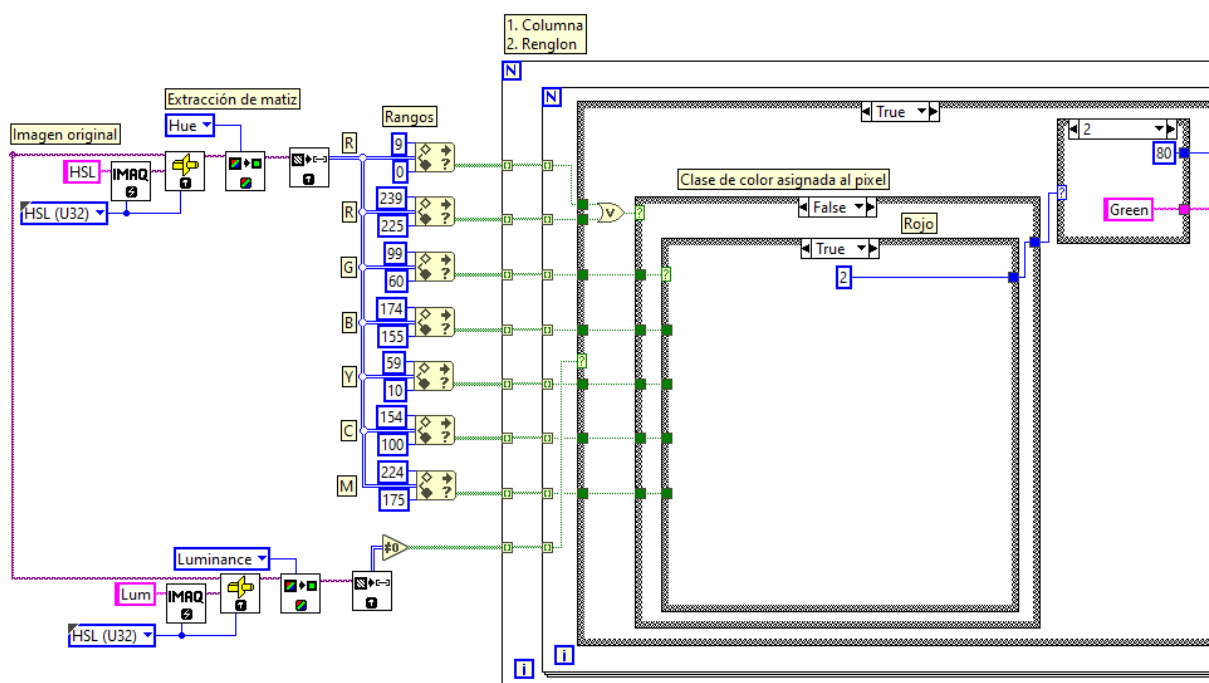


APÉNDICE G

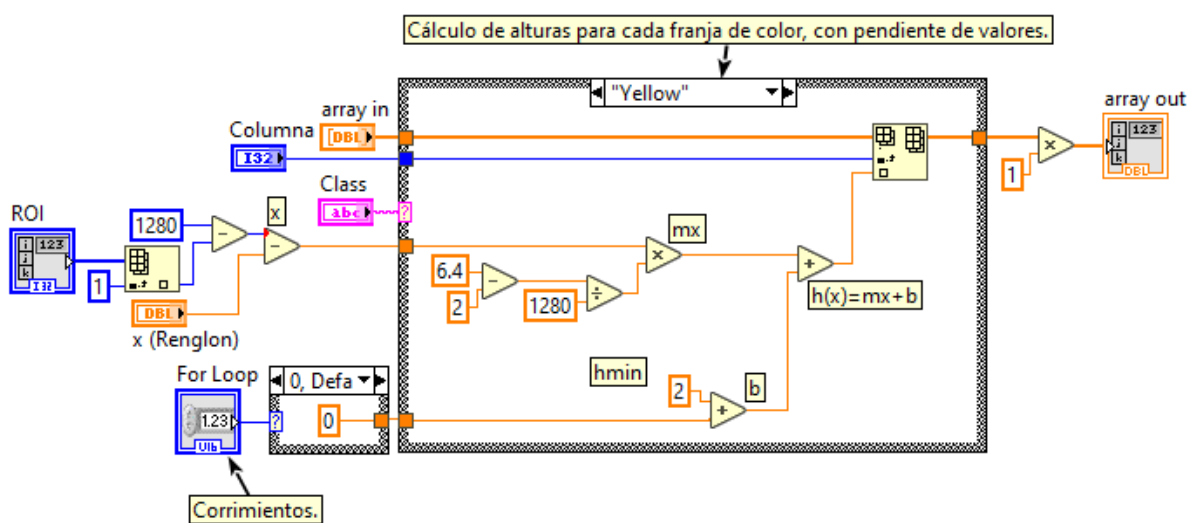
SOFTWARE DE CALIBRACIÓN DE MATIZ EN LABVIEW®



APÉNDICE H

SOFTWARE DE IDENTIFICACIÓN DE COLOR POR RANGOS DE MATIZ EN
LABVIEW®

APÉNDICE I

SOFTWARE PARA CÁLCULO Y ASIGNACIÓN DE VALORES DE ALTURA EN
LABVIEW®

APÉNDICE J

CÓDIGO EN MATLAB® PARA FUSIÓN DE MAPAS DE ALTURA PROMEDIADOS

```
A = imread('Mapa promediado0_0.jpg');
AA = A; %% Imagen A
DD = immultiply(A,0); %% Imagen en blanco del mismo tamaño
M = DD;
IM3 = M;
IM4 = M;
Giros=6;
if Giros == 1
    G = imread(['Mapa promediado0_0.jpg']);
    % Figure
    % imshow(G)
    return
end
for i=1:Giros-1 %% Ciclo para fusión de todos los mapas
% %           MÉTODO 1           % %
    B = imread(['Mapa promediado0_',num2str(i),'.jpg']); %% Imagen B
    AB = imsubtract(A,B);
    BA = imsubtract(B,A);
    C = imadd(AB,BA); % Imagen sin solapamiento
    MASK = immultiply(A,B); % Genera máscara de las zonas solapadas
    MASK = MASK/255; % Máscara binaria
    M = imadd(M,MASK); % Guarda máscara completa
    MASK2 = imcomplement(MASK*255);
    D = immultiply(C,MASK2/255); % Guarda la imagen sin solapamiento
    %% D = immultiply(A,MASK*0.00197); % Zonas solapadas
    IM1 = immultiply(A,MASK); % Region solapada de imagen anterior
    IM2 = immultiply(B,MASK); % Region solapada de imagen
    IM5 = max(IM1,IM2);
    DD = imadd(D, IM5); % Guarda imagen completa
    if ((Giros-1)==(i+1)) %% Una sola imagen capturada
        AA = imread('Mapa promediado0_0.jpg');
        AA = imadd(AA,B);
    else
        AA = B;
    end
    end
    GG = imfuse(A,B,'montage','Scaling','joint');
    figure
    imshow(GG)
%     figure
%     imshow(C)
%     figure
%     imshow(DD)
    A=DD;
end
%GG = imfuse(C,DD,'montage','Scaling','joint');
imwrite(DD,'MapaCompleto.jpg');
%Imagen=imread('MapaCompleto.jpg');
figure
imshow(DD)
```

APÉNDICE K

CÓDIGO EN MATLAB® PARA CÁLCULO DE MODELOS ESTADÍSTICOS, PRUEBA CHI-CUADRADA, ERROR, EXACTITUD Y PRECISIÓN

```
%% Valores de altura medidos para P1
x= [2.87041 2.97755 2.95034 2.89014 2.93231 2.91429 2.93844 2.90578 2.92415
2.93469 ...
2.90952 2.90136 2.76599 2.93299 2.95408 2.88265 2.95238 2.92211 2.91871 2.91633...
2.94286 2.91395 2.94014 2.88163 2.94082 2.93707 2.88537 2.94558 2.85782 2.94218...
2.88946 2.90578 2.8949 2.90476 2.92823 2.90986 2.91054 2.91156 2.87177 2.92177...
2.90612 2.85034 2.89354 2.94014 2.90374];

%% Cálculo de media, mediana y desviación estándar
Media=mean(x)
Mediana=median(x)
Desviacion=std(x)

%% Histograma de datos medidos
figure;
histogram(x);
ylabel('Frecuencia');
xlabel('Valores medidos');
title('Histograma de frecuencia de alturas.');
```

```
%% Histograma con curva de distribución normal
figure;
histfit(x,6);
ylabel('Frecuencia');
xlabel('Valores medidos');
title('Histograma de frecuencia de alturas con curva de distribución normal.');
```

```
%% Grafica de la distribución acumulada
figure;
norm=normcdf(sort(x),Media, Desviación);
plot(sort(x),norm);
ylabel('Probabilidad');
xlabel('Valores medidos');
title('Distribución acumulada');
```

```
%% Grafica de la probabilidad normalizada de los datos
figure;
normplot(x);
ylabel('Probabilidad');
xlabel('Valores medidos');
title('Probabilidad normalizada');
```

```
%% Prueba de bondad de ajuste chi-cuadrada
[chi,p,st]=chi2gof(x)

%% Calculo del error de medición
error=x-2.8;
```

```
% Grafica de diferencia entre valor real y valores medidos
figure;
plot(x, '*');
hold on
plot([0 45],[2.8 2.8]);
axis([0 45 0 30]);
ylabel('Altura (milímetros)');
xlabel('Muestras');
title('Diferencia entre alturas obtenidas y la altura real.');
```