

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CHIHUAHUA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

***“RECUPERACIÓN DE IMÁGENES EN
MEDIOS TURBIOS MEDIANTE
POLARIMETRÍA”***

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN CIENCIAS

EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA

PRESENTA:

ERICK ENRIQUE AMEZCUA LÓPEZ

DIRECTOR DE LA TESIS:

DR. LUIS FRANCISCO CORRAL MARTÍNEZ



SEP
SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO



CHIHUAHUA, CHIH., ENERO 2020.

CARTA A CONACYT

AGRADECIMIENTOS

RESUMEN

RECUPERACIÓN DE IMÁGENES EN MEDIOS TURBIOS MEDIANTE POLARIMETRÍA

Ing. Erick Enrique Amezcua López
Maestría en Ciencias en Ingeniería Electrónica
División de Estudios de Posgrado e Investigación del
Instituto Tecnológico de Chihuahua
Chihuahua, Chih., 2020
Director de Tesis: Dr. Luis Francisco Corral Martínez

La adquisición de imágenes con buena calidad se ha convertido en algo esencial para muchas áreas de estudio como lo son la arqueología submarina, el mantenimiento a cables bajo agua, centrales nucleares, fotografías en ambientes urbanos y el análisis de tejido biológico. En muchas ocasiones esto se ve dificultado debido a que el medio en el que se esté trabajando es turbio, como lo puede ser la atmósfera y el agua del océano, esto implica que se pierda información en las imágenes capturadas, haciendo difícil que el estudio pueda ser llevado de manera adecuada.

En años recientes ha surgido la técnica de la imagen polarimétrica como una solución para mejorar la calidad de las imágenes obtenidas en medios turbios, la cual consiste en capturar dos imágenes con distintos estados de polarización y posteriormente combinar la información entre ellas para obtener una imagen mejorada con respecto a la que se captura de manera directa con una cámara.

Esta tesis propone una técnica basada en el uso de polarización circular, a diferencia de la polarización lineal en que la se basa la mayoría de los trabajos encontrados en la literatura, con el fin de aprovechar el fenómeno de la memoria de polarización circular y así lograr obtener más información de las imágenes capturadas y con ello mejorar las técnicas existentes. Se reprodujeron los resultados de dos de los métodos más recientes y se compararon con el método propuesto empleando los mismos escenarios. Para comprobar la eficiencia de la técnica propuesta se usan métricas de calidad de la imagen para evaluarla cuantitativamente, comparar el método desarrollado con algunos de los más significativos de la literatura y con ello obtener de manera cuantitativa la eficiencia de nuestra técnica.

ABSTRACT

RECOVERY OF IMAGES ON A TURBID MEDIA BY POLARIMETRY

The acquisition of images with good quality has become something essential for a large area of study, like the submarine archeology, the maintenance of underwater cables, nuclear power plants, photographs in urban environments and the study of biological tissue. Sometimes, this can be difficult because the media which is working is turbid, like the atmosphere and the ocean, this drive to lose of information in the acquired image and making difficult that the study can be done.

In recent years the technique of polarimetric image has been developed as a solution to improve the quality of the images acquired in turbid media. This technique consists in taking two images in different states of polarization and then combine the information between them to obtain an improved image compared to the one acquired directly with the camera.

This thesis proposes a technique based on the use of circular polarization, instead of linear polarization in which most of the works of the literature are based on, in order take advantage of the circular polarization memory effect. It is intended to obtain better information from the acquired images, and with this improve the existing techniques. Also, this work reproduces two methods of the literature and compares this with the proposed method. Finally, to check the efficiency of the proposed technique, metrics of the image quality are used in order to evaluate quantitatively the results and compare them with two other implemented methods.

CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS	xi
LISTA DE TABLAS	xiv
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO II. ANTECEDENTES	3
CAPÍTULO III. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	14
3.1 Luz natural y luz polarizada	14
3.1.1 Polarización lineal	16
3.1.2 Polarización circular	16
3.1.3 Polarización elíptica	18
3.2 Elementos ópticos	19
3.2.1 Polarizador	19
3.2.2 Retardador	19
3.3 Vectores de Stokes	20
3.4 Esparcimiento elástico	21
3.4.1 Esparcimiento Rayleigh	21
3.4.1 Esparcimiento Mie	22
3.5 Turbidez del agua	23
3.6 Imagen polarimétrica	24
3.6.1 Técnica de polarización por transluminancia	24
3.6.2 Técnica de imagen por retroesparcimiento	25
3.6.3 Espectroscopia de polarización profunda	26
3.6.4 Microscopia de polarización	26
3.7 Modelos para la recuperación de imágenes en medios turbios	28
3.4.1 Modelo de Schechner	28

3.4.1	Estimación de la señal	30
3.8	Memoria de polarización circular	33
 CAPÍTULO IV. MÉTODOS DE RECUPERACIÓN DE IMÁGENES EN MEDIOS TURBIOS		 34
4.1	Técnica de Schechner	34
4.1.1	Técnica de Schechner con baja turbidez	35
4.1.2	Técnica de Schechner con alta turbidez	40
4.2	Estimación de la señal	43
4.2.1	Técnica de estimación de señal con baja turbidez	43
4.2.2	Técnica de estimación de señal con alta turbidez	44
 CAPÍTULO V. RECUPERACIÓN DE IMÁGENES EN MEDIOS TURBIOS CON POLARIZACIÓN CIRCULAR		 46
5.1	Técnica propuesta	46
5.1.1	Baja turbidez con el objeto 1	47
5.1.1.1	Método de Schechner con el objeto 1	48
5.1.1.2	Método de estimación de señal con el objeto 1	51
5.1.1.3	Método propuesto con el objeto 1	52
5.1.2	Baja turbidez con el objeto 2	53
5.1.3	Baja turbidez con el objeto 3	55
5.1.4	Alta turbidez	57
 CAPÍTULO VI. ANÁLISIS DE RESULTADOS		 59
6.1	Métricas para la calidad de la imagen	59
6.1.1	EME	59
6.1.2	Contraste de Michelson	60
6.2	Comparativa de la calidad de la imagen	63

CAPÍTULO VII. CONCLUSIONES Y TRABAJO A FUTURO	65
7.1 Conclusiones	65
7.2 Trabajo a futuro	66
REFERENCIAS	68

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO II. ANTECEDENTES

Figura 2.1.	a) Mejor estado de polarización para la recuperación de la imagen, b) peor estado de polarización, c) imagen recuperada.	3
Figura 2.2.	a) Imagen recuperada por el método de Liang, b) Imagen recuperada por el método de Schechner	5
Figura 2.3.	Modelo teórico para la recuperación bajo el agua	6
Figura 2.4	Imagen de un sitio arqueológico del mediterráneo	6
Figura 2.5	a) Imagen original, b) Imagen recuperada por el método de Hu, c) Imagen recuperada por el método de Huang	7
Figura 2.6	a) Imagen recuperada por el método de Hu , b) Imagen recuperada por el método de Schechner	7
Figura 2.7	a) Arreglo experimental, b) Imagen del objeto sin el medio turbio método de Hu	8
Figura 2.8	a) Imagen original, b) Imagen recuperada por el método de Schechner , c) Imagen recuperada por el método de Hu	9
Figura 2.9	Método de Lui. (a1) y (b1) son las imágenes originales, (a2) y (b2) son recuperadas por métodos tradicionales de imagen polarimétrica y (a3) y (b3) son las recuperadas por el método propuesto por Lui [17].	10
Figura 2.10	a) Método tradicional de captura de imágenes. b) Método propuesto de múltiples cámaras	10
Figura 2.11	a) Imágenes en el medio turbio, b) Imágenes recuperadas por la técnica de Tian	11
Figura 2.12	a) Imagen en el medio turbio. b) Imagen con el polarizador a 0° . c) Imagen con el polarizador a 90° .	12
Figura 2.13	a) Imagen recuperada mediante la imagen a 90° , b) Imagen recuperada por el método de Schechner, c) Imagen recuperada mediante la intensidad de la imagen	12
Figura 2.14	a) Imagen tomada directamente con la cámara, b) Imagen recuperada	13
Figura 2.15	a) Imagen tomada en un medio turbio azul, b) Recuperación de la imagen sin la compensación, c) Recuperación de la imagen con la compensación, d) Imagen en un medio no turbio	13

CAPÍTULO III. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

Figura 3.1.	Campo eléctrico y magnético de una onda	14
Figura 3.2	Onda vista de frente	15
Figura 3.3	Luz polarizada circularmente, con sus respectivas componentes	17
Figura 3.4	Rotación del campo eléctrico en una polarización circular	17
Figura 3.5	Elipse de polarización	18
Figura 3.6	Polarizador lineal	19
Figura 3.7	Esparcimiento Rayleigh de luz no polarizada	22
Figura 3.8	Esparcimiento Mie de luz no polarizada	23
Figura 3.9	Agua con diferentes niveles de turbidez	23
Figura 3.10	Arreglo para un análisis de imagen polarizada mediante transluminancia	24
Figura 3.11	Arreglo para análisis de imagen por retroesparcimiento	25
Figura 3.12	Arreglo experimental para espectroscopia de polarización profunda	26
Figura 3.13	Polarímetro de Mueller para la técnica MIM	27
Figura 3.14	Modelo teórico para el método de Schechner	28
Figura 3.15	Elementos de la imagen en el medio turbio	28
Figura 3.16	Modelo para la estimación de señal	30

CAPÍTULO IV. MÉTODOS DE RECUPERACIÓN DE IMÁGENES EN MEDIOS TURBIOS

Figura 4.1.	Arreglo experimental	34
Figura 4.2	a) Imagen con el polarizador 0° , b) imagen con el polarizador a 90°	35
Figura 4.3	Imagen tomada directamente con la cámara en escala de grises	36
Figura 4.4	Secciones para el cálculo de A_∞ , a) A^\parallel , b) A^\perp	37
Figura 4.5	Retroesparcimiento de la imagen $A(x,y)$	38
Figura 4.6	Transmitancia de la imagen $t(x,y)$	39
Figura 4.7	Imagen recuperada por el método de Schechner	39
Figura 4.8	Imágenes a través del polarizador a) 0° , b) 90°	40
Figura 4.9	Retroesparcimiento de la imagen $A(x,y)$	41
Figura 4.10	Transmitancia de la escena $t(x,y)$	41
Figura 4.11	Radiancia de la escena $L(x,y)$	42
Figura 4.12	Imagen original con la cámara $I(x,y)$	42
Figura 4.13	Señal de la imagen	43
Figura 4.14	Señal recuperada	44

CAPÍTULO V. MÉTODOS DE RECUPERACIÓN DE IMÁGENES EN MEDIO TURBIOS

Figura 5.1.	Polarizador circular, a) polarizador lineal, b) retardador de cuarto de onda	47
Figura 5.2	Imagen en un medio claro	48
Figura 5.3	Imagen en el medio turbio	49
Figura 5.4	a) Sección con el polarizador 0° , b) Sección con el polarizador a 90°	50
Figura 5.5	Radiancia de la imagen	50
Figura 5.6	Señal de la imagen	51
Figura 5.7	a) Sección con el mejor estado de polarización, b) Sección con el peor estado de polarización	52
Figura 5.8	Estimación de señal con polarización circular	52
Figura 5.9	a) Imagen en un medio claro, b) Intensidad de la imagen en el medio turbio	53
Figura 5.10	Comparativa de los métodos con el objeto 2, a) Método de Schechner, b) Método de estimación de señal, c) Método propuesto	54
Figura 5.11	a) Imagen en un medio claro con el objeto 2, b) Intensidad de la imagen en el medio turbio.	55
Figura 5.12	Comparativa de los métodos con el objeto 3, a) Método de Schechner, b) Método de estimación de señal, c) Método propuesto	56
Figura 5.13	a) Imagen en un medio claro, b) Intensidad de la imagen en el medio altamente turbio.	57
Figura 5.14	Comparativa de los métodos con alta turbidez, a) Método de Schechner, b) Método de estimación de señal, c) Método propuesto	58

CAPÍTULO VI. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Figura 6.1.	Sección para el EME	60
Figura 6.2	Perfil de intensidad	61
Figura 6.3	Valor máximo en la gráfica	62
Figura 6.4	Valor mínimo en la gráfica	62

LISTA DE TABLAS

CAPÍTULO III. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

Tabla 3.1.	Vectores de Stokes de varios estados de polarización	21
------------	--	----

CAPÍTULO IV. MÉTODOS DE RECUPERACIÓN DE IMÁGENES EN MEDIOS TURBIOS

Tabla 4.1.	Concentraciones	35
------------	-----------------	----

CAPÍTULO VI. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Tabla 6.1.	Objeto 1 con baja turbidez	63
------------	----------------------------	----

Tabla 6.2	Objeto 2 con baja turbidez	63
-----------	----------------------------	----

Tabla 6.3	Objeto 3 con baja turbidez	64
-----------	----------------------------	----

Tabla 6.4	Objeto 1 con alta turbidez	64
-----------	----------------------------	----

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

La adquisición de imágenes con buena calidad es de vital importancia para muchas áreas de estudio como lo son la arqueología submarina, el mantenimiento a instalaciones de cables submarinos, reactores nucleares, imagen biomédica y fotografías en ambientes urbanos [1], [2]. Sin embargo, muchas veces la imagen se ve alterada debido a que el medio en el que se está trabajando no es controlado, como lo puede ser el caso de un medio turbio.

Un medio turbio es aquel en el que existe una gran cantidad de partículas en su espacio, lo que provoca que la información que existe en él se vea afectada. Hay muchos medios turbios, entre los que se pueden mencionar la atmosfera, un ambiente urbano con contaminación, el agua del océano y el tejido biológico [3], [4], [5].

El tomar imágenes en estos medios provoca que la información obtenida muchas veces no sea la ideal, lo que lleva a que los estudios o análisis requeridos no puedan ser llevados a cabo o que los resultados estén bastantes limitados.

Por lo anterior, la adquisición de imágenes en condiciones de baja visibilidad ha adquirido importancia en los últimos años y el principal objetivo de esto es mejorar la visibilidad en estas imágenes e incluso lograr una claridad parecida a la de la luz del día [1].

Como se menciona en [3], la mayor presencia de clima con smog o con niebla es debido al incremento de la contaminación en las ciudades, por lo que tomar imágenes en estas condiciones implica obtener una muy baja visibilidad. Para dar solución a este inconveniente, uno de los métodos que ha demostrado ser más efectivo es el de la imagen polarimétrica.

Esta técnica se basa en adquirir dos imágenes con información complementaria de polarización y hacer estimaciones con ellas de algunos elementos del medio turbio, para finalmente combinarlas y obtener una mejor imagen que la que se obtiene de manera directa y con esto poder llevar a cabo el estudio deseado.

Distintas técnicas han sido desarrolladas desde el 2003 [1] para la aplicación de este principio, mejorando con el paso de los años haciendo modificaciones al modelo teórico

planteado en [1], llegando a resultados de gran calidad que pueden llegar a ser muy cercanos a los que se obtendrían al capturar la imagen en el medio sin turbidez.

Esta tesis consta de siete capítulos. El primero de ellos es una introducción al tema de la captura de las imágenes en medios turbios y su importancia en muchas áreas de estudios, aquí se mencionan algunas de las soluciones para esta problemática.

El segundo capítulo explora técnicas de imagen polarimétrica de la literatura, haciendo hincapié entre sus diferencias y mostrando los resultados obtenidos por cada una de ella.

El tercer capítulo habla de los fundamentos teóricos necesarios para la comprensión del trabajo, además se desarrollan los modelos teóricos de la imagen polarimétrica en medios turbios.

El cuarto capítulo es una revisión de dos de las técnicas más importantes de la literatura, desarrollándolas de manera experimental y replicando los resultados de los métodos.

En el quinto capítulo se desarrolla el modelo propuesto, llevándose a cabo distintos experimentos utilizando las técnicas del Schechner, de estimación de señal y la técnica propuesta, con el fin de comparar los resultados y mostrar la mejora que la técnica propuesta ofrece.

En el sexto capítulo se hace un análisis de los resultados obtenidos de una manera cuantitativa haciendo uso de distintas métricas para evaluar la calidad de las imágenes que se obtiene con las distintas técnicas y de esta manera visualizar la aportación del método propuesto.

El séptimo capítulo habla de las conclusiones a las cuales se llegan en el trabajo de investigación y ofrece un panorama de trabajo a futuro.

CAPÍTULO II

ANTECEDENTES

El principal método que se usa en la literatura es el desarrollado por Schechner [1] en el 2003 (Figura 2.1). Antes de que se publicara este trabajo no existía como tal un modelo y estudio profundo acerca de este tema, por lo que este método se convirtió en la referencia para todos los demás trabajos que se han desarrollado a lo largo de los años.

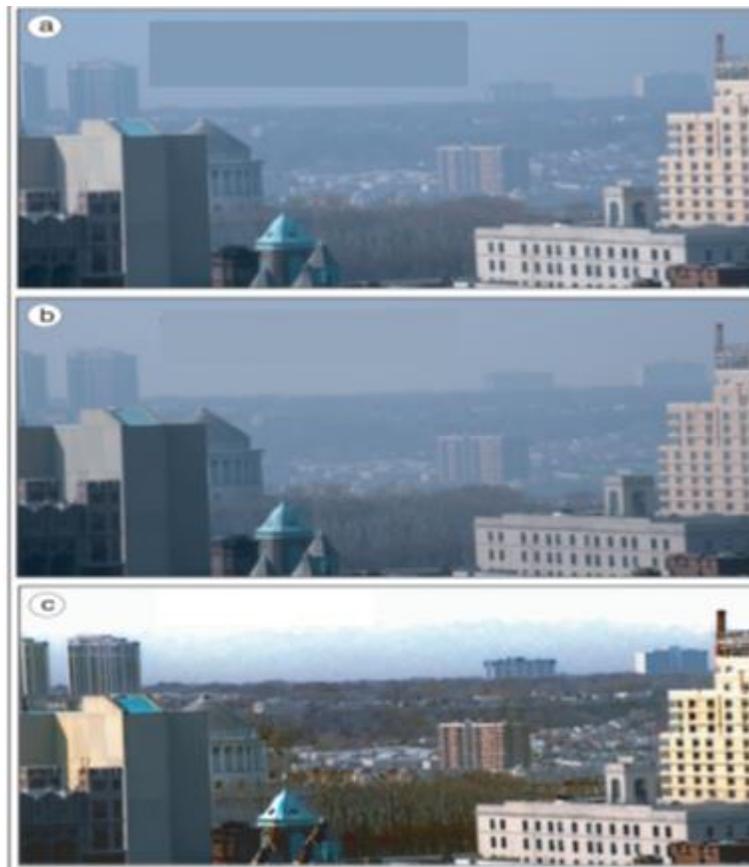


Figura 2.1 a) Mejor estado de polarización para la recuperación de la imagen, b) peor estado de polarización, c) imagen recuperada [1].

El método de Schechner [1] consiste en capturar dos imágenes con estados de polarización complementarios, para después extraer dos parámetros de éstas, el primero de ellos se refiere a la luz que se ve esparcida en el medio por las partículas contenidas en el mismo y

es conocido como *airlight* en la literatura. El segundo parámetro indica qué tan polarizado está el medio turbio en el que ocurre el fenómeno y es llamado *pscat*, para el cálculo de estos dos parámetros es necesario tomar una sección del cielo en la imagen en donde no exista ningún objeto. También Schechner hace uso del factor ϵ , el cual sirve para reducir el error de la estimación de los dos parámetros anteriores y normalmente toma un valor de entre 1 y 1.5. Con esta información se hace una combinación para llegar a una imagen mejorada.

La técnica de Schechner ha servido como base para los trabajos recientes en el área, de los cuales se mencionan algunos de ellos.

Las técnicas que desarrollan Liang [6], [7] y por Xia P. [8] se diferencia del de Schechner ya que éstas toman tres imágenes para la realización del estudio y se trabaja con la representación matemática de la polarización, que son los vectores de Stokes.

De manera individual, la técnica de Liang [6] introduce un parámetro llamado ángulo de polarización, el cual puede ser calculado por medio de los ya mencionados vectores de Stokes. Con esto, el método hace un mejor cálculo de los parámetros *airlight* y *pscat* lo que conlleva a una mejor calidad de la imagen al eliminar mucho del ruido que se presenta en la misma. También otra de sus mejoras es que los objetos en el campo cercano se ven mejor preservados.

El trabajo de 2015 de Liang en [7], continúa el desarrollo del trabajo visto en [6]. Se basa en el ángulo de polarización, pero en esta ocasión realiza un estudio de cómo se distribuye este ángulo de polarización y con ello realiza una mejor estimación del factor ϵ , el cual como ya se mencionó, es un factor para mejorar la imagen. Con lo anterior se logra una mejora de contraste de al menos el 74%.

En el método propuesto por Xia P. [8] se utilizan diferentes longitudes de onda (451 nm, 551 nm, 650 nm, 750 nm y 850 nm) para tomar mediciones con diferentes orientaciones de polarización (0, 90° y 135°) lo cual impacta en el contraste de los objetos en el campo lejano de la imagen, lo que está directamente relacionado con la longitud de onda utilizada, ya que, dependiendo de esta última, la luz tendrá mayor o menor capacidad de penetrar en el medio turbio. Este trabajo logra recuperar de buena manera los objetos en el campo cercano y en el campo lejano, también llega a la conclusión de que a mayor longitud de onda se obtienen mejores resultados.

Es de mencionar que estas tres técnicas requieren de una región del cielo sin objeto para la estimación de los parámetros *airlight* y *pscat*.

Otra técnica es la implementada por Qu, Y., y Zou, Z. [9], la cual no requiere de un área determinada del cielo para realizar el algoritmo, con lo cual también se puede adaptar a diferentes situaciones.

Por lo regular, todos los métodos antes mencionados se comparan con el desarrollado por Schechner para probar su eficacia. Esto se puede observar en la comparativa de la Figura 2.2. Todas las técnicas antes mencionadas se usan en exteriores y en ambientes urbanos.

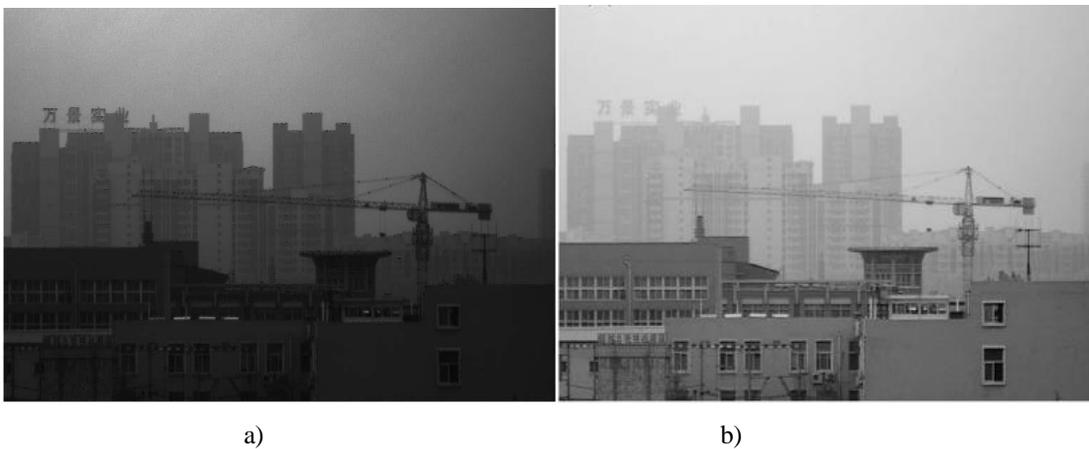


Figura 2.2. a) Imagen recuperada por el método de Liang [6]. b) Imagen recuperada por el método de Schechner [1].

Una de las aplicaciones más importantes de la imagen polarimétrica es la recuperación de imágenes bajo el agua.

Normalmente el tomar imágenes el bajo agua implica una muy pobre visibilidad, además de que muchos métodos de visión por computadora, como aquellos basados en triangulación o estructura de movimiento, no pueden ser empleados de manera directa bajo estas condiciones.

Schechner menciona que lo que hace que la visión bajo el agua sea tan problemática, es que la degradación de la imagen varía en función a la distancia a la cual está el objeto [2], por lo que debido a que los objetos están a diferentes distancias en el campo de visión de la cámara, la degradación de la imagen variará con la diferencia en la distancia, lo cual es observable en

la Figura 2.3. Por lo tanto, herramientas para mejorar la imagen como lo son la ecualización de histogramas o los filtros pasa altas, no son de utilidad, ya que son invariantes en el tiempo.

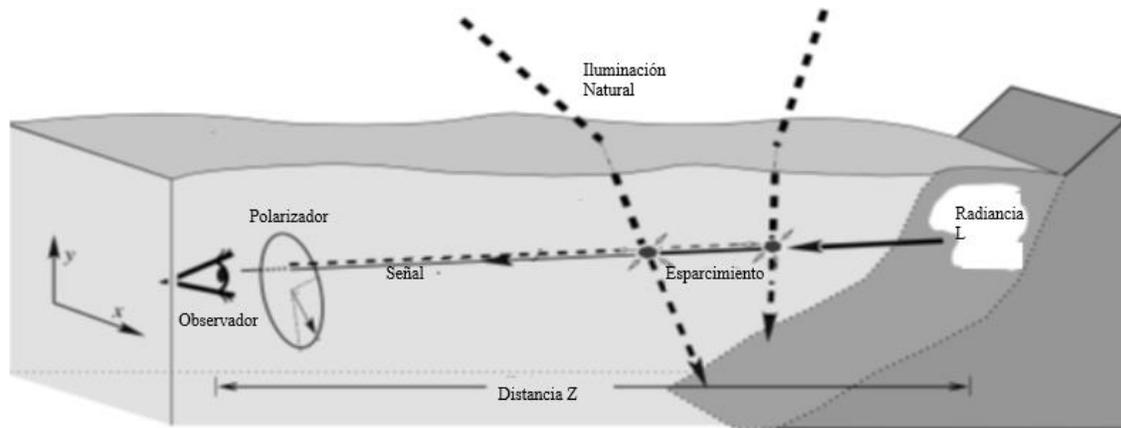


Figura 2.3. Modelo teórico para la recuperación bajo el agua [2].

Todo lo anterior ha llevado al desarrollo de métodos de mejoramiento de imágenes bajo el agua. De igual manera que los métodos de imágenes en exteriores, se utilizan diferentes consideraciones para el desarrollo de una técnica u otra.

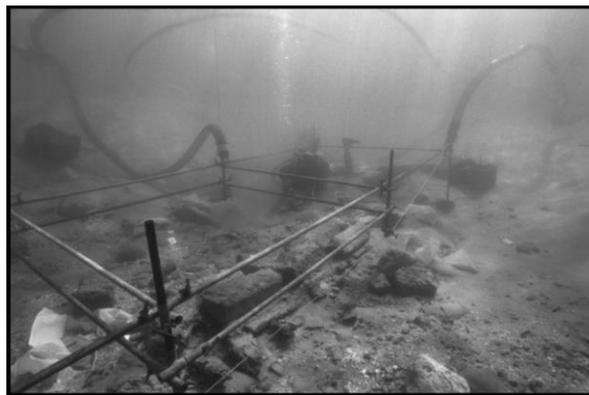


Figura 2.4. Imagen de un sitio arqueológico del mediterráneo, se observa como la calidad de la imagen de los objetos se degrada con la distancia [2].

Por ejemplo, en el método desarrollado por Huang [10], se hace la consideración de que la irradiancia del objeto posee un grado de polarización, con lo que proponen un modelo en el que se estima la diferencia polarizada de imagen del objetivo y se toma en cuenta las

contribuciones que tiene la radiancia del objeto y la luz del fondo en la luz polarizada que se analiza.

En el trabajo hecho por Hu, H. [11], la recuperación de la imagen se basa en la corrección de la transmitancia del medio en el que se hace el experimento y esto se relaciona con el grado de polarización del objeto del método de Huang [10], con lo que se logra una mejora en objetos con un grado de polarización alto, lo que se observa en la Figura 2.5.

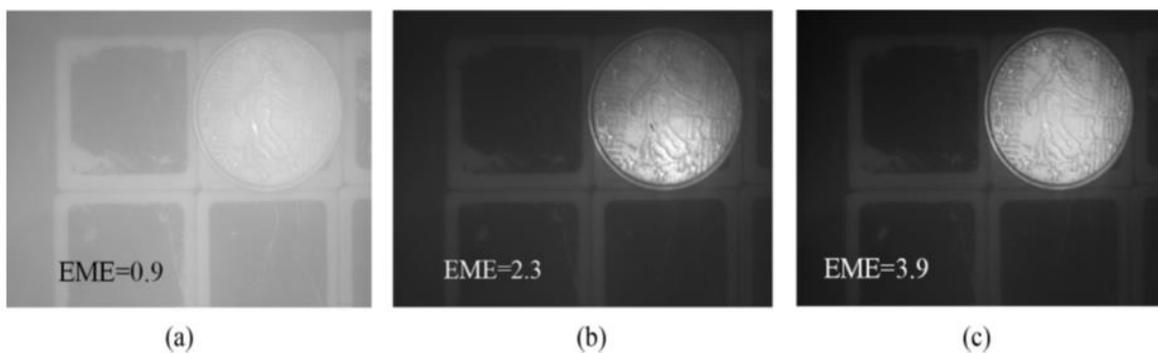


Figura 2.5. a) Imagen original, b) Imagen recuperada por el método de Hu [10], c) Imagen recuperada por el método de Huang [11].

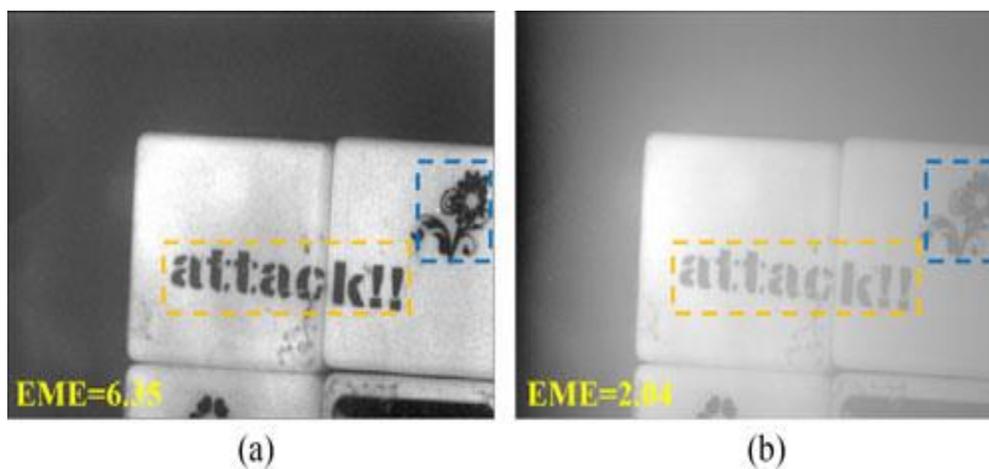


Figura 2.6. a) Imagen recuperada por el método de Hu [12], b) Imagen recuperada por el método de Schechner [1].

Uno de los trabajos más recientes en este campo fue también implementado por Hu, H. [12]. En esta técnica se hace la consideración de que una iluminación activa provoca un campo de luz no uniforme en la imagen. No considera como constante el grado de polarización del

retroesparcimiento de la escena ni tampoco la irradiancia del retroesparcimiento en infinito, lo cual sí se hace en el método Schechner [1] y en el de Hu [11], por lo que se observa una mejora sustancial en la recuperación de la imagen, como se observa en la comparativa de la Figura 2.6.

Hu realizó otro trabajo más adelante, en el cual hace una innovación que consiste en hacer uso de la llamada memoria de polarización circular [13], [14], que se indica, es la capacidad que tiene la luz polarizada circularmente para mantener sus propiedades cuando esta se propaga en un medio turbio. Esto es de importancia, ya que la luz polarizada linealmente se ve más afectada en estas condiciones, con lo cual se pierde información al utilizarla en la técnica de recuperación de la imagen, tal y como sucede en los métodos de Schechner [1], Liang [8] y el mismo Hu [11].

El arreglo experimental se observa en la Figura 2.7, así como se muestra también el objeto antes de verse inmerso en el medio turbio.

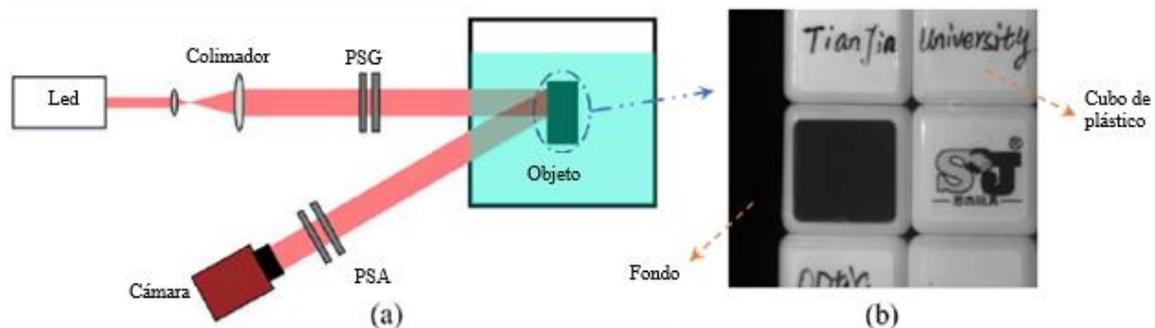


Figura 2.7. a) Arreglo experimental, b) Imagen del objeto sin el medio turbio método de Hu [13].

El arreglo experimental utilizado en este trabajo es muy similar a los implementados por Huang [10], Hu [11], Li [15] y por Guan [16], por lo que se puede decir que es el arreglo más usado en este tipo de aplicaciones.

Con esta técnica se logra una mejora sobre todo en medios muy turbios, al obtener más información de la imagen gracias a la polarización circular que se adiciona a los parámetros ya obtenidos de la polarización lineal en la imagen. La mejora del método se puede observar en la Figura 2.8.

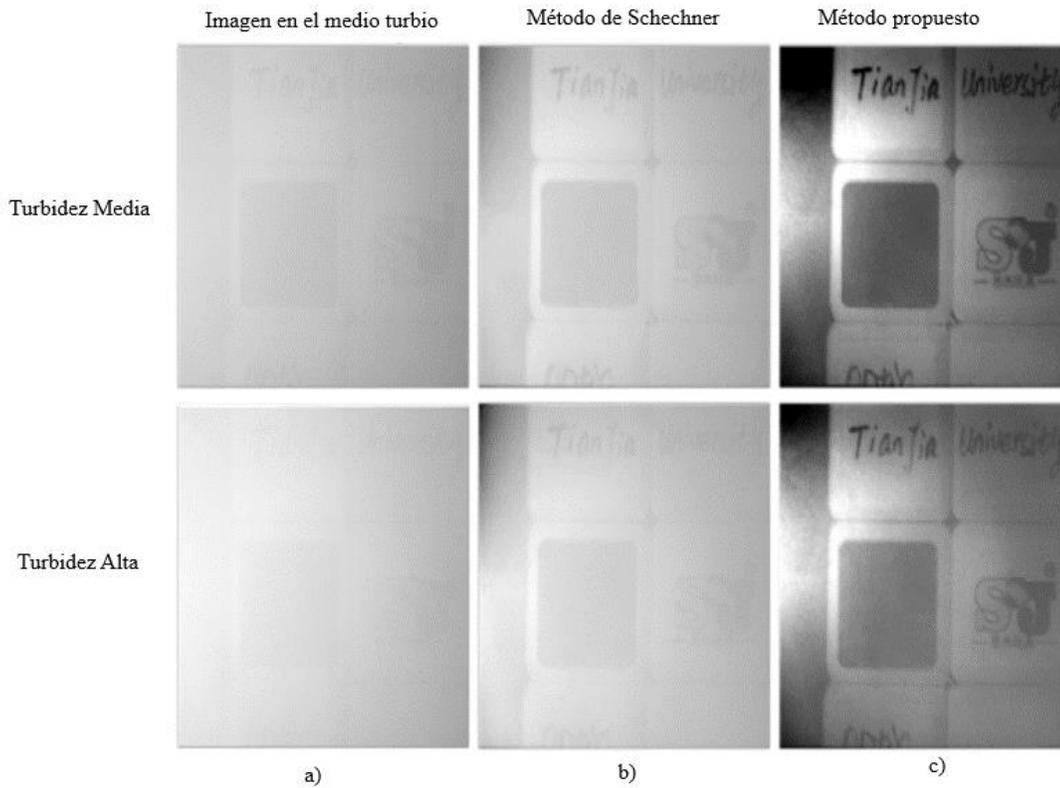


Figura 2.8. a) Imagen original, b) Imagen recuperada por el método de Schechner [1], c) Imagen recuperada por el método de Hu [13].

Como se observa en la Figura 2.8, el método Schechner [1] no es de tanta utilidad en medios muy turbios, mientras que la técnica implementada por Hu [13], logra obtener una imagen muy clara.

Otra técnica hallada en la literatura fue la que implementó Fei Lui [17]. Este método se basa en hacer una selección específica de la longitud de onda a trabajar, con el fin de reducir el esparcimiento de la luz en el medio, dado que éste queda en función de la longitud de onda. Además, se aplica un filtro Vanderlugt y una correlación de imágenes con el propósito de reducir el ruido a su mínimo. Un ejemplo de este método se muestra en la Figura 2.9.

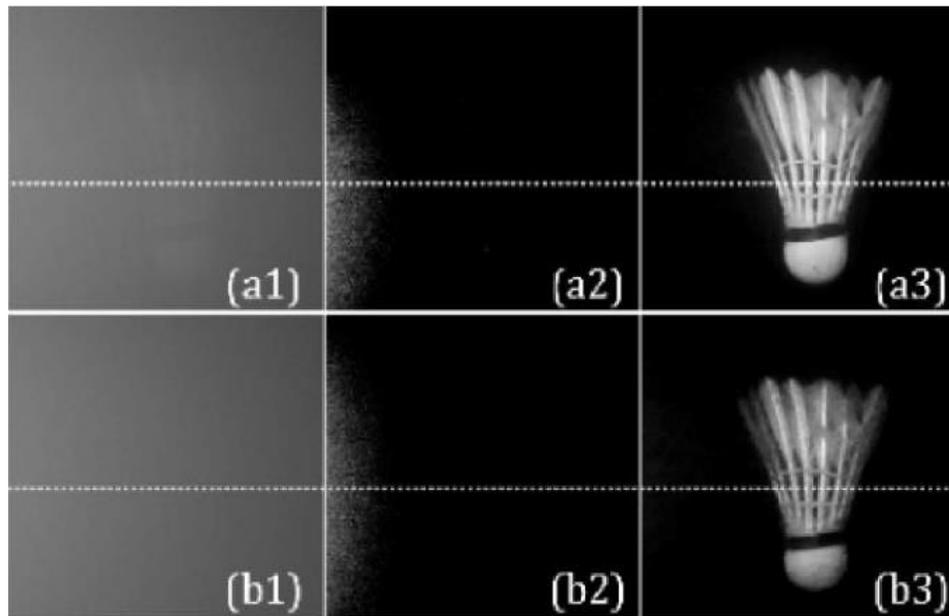


Figura 2.9. Método de Lui. (a1) y (b1) son las imágenes originales, (a2) y (b2) son recuperadas por métodos tradicionales de imagen polarimétrica y (a3) y (b3) son las recuperadas por el método propuesto por Lui [17].

Es de mencionar que este método es bastante efectivo en medios con mucha turbidez, aunque solo utiliza polarización lineal para su análisis. También hay que decir que el arreglo experimental es el mismo que ya se mencionó y es un estándar para este tipo de estudios.

Otro trabajo es el desarrollado por Yu Tian [18], el cual hace mención en la dificultad de hallar de manera correcta el grado de polarización de una imagen, dado que no está distribuido de manera uniforme, y para solucionar esto, se propone un sistema de visión múltiple usando varias cámaras a la vez para capturas diferentes imágenes de una misma escena con el arreglo de la Figura 2.10.

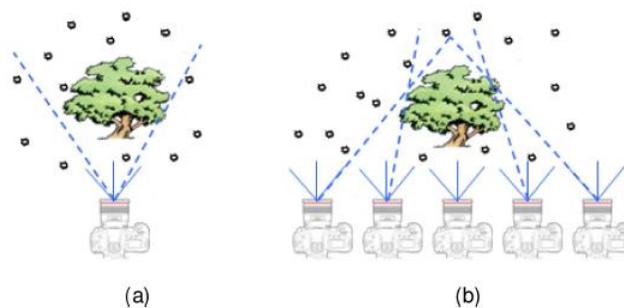


Figura 2.10. a) Método tradicional de captura de imágenes. b) Método propuesto de múltiples cámaras [18].

Con estas imágenes se estima el mapa de polarización y se llegan a los resultados mostrados en la Figura 2.11.

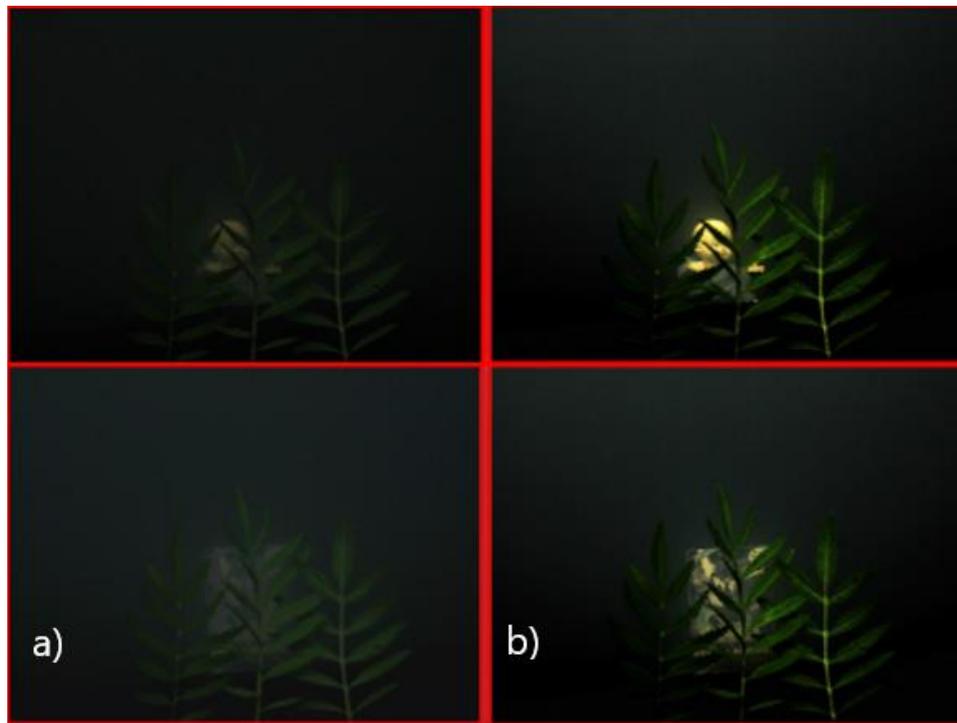


Figura 2.11. a) Imágenes en el medio turbio. b) Imágenes recuperadas por la técnica de Tian [18].

Uno de los métodos más recientes es el desarrollado por Xiaobo Li [19], el cual propone capturar únicamente una imagen en un estado de polarización y de ahí derivar dos sub-imágenes por medio de un análisis de la escena. La justificación de este método es que la polarización del medio turbio está más contenida en la luz del retroesparcimiento que en el objeto, por lo que analizándola es posible estimar bastante información para la recuperación, además de que el método es más rápido al solo necesitar una imagen de la escena.

En primera instancia se muestra en la Figura 2.12 las tres imágenes capturadas con la cámara. De estas 3 imágenes, se toma la imagen con el polarizador a 90° para obtener las sub-imágenes para el análisis, llegando a los resultados de la Figura 2.13. También se muestran los resultados de tomar la intensidad de la imagen directamente del medio turbio.

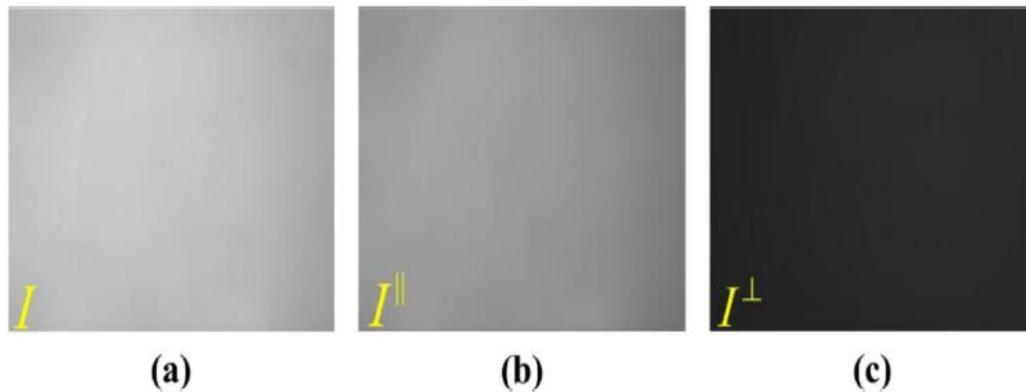


Figura 2.12. a) Imagen en el medio turbio. b) Imagen con el polarizador a 0° . c) Imagen con el polarizador a 90° [19].

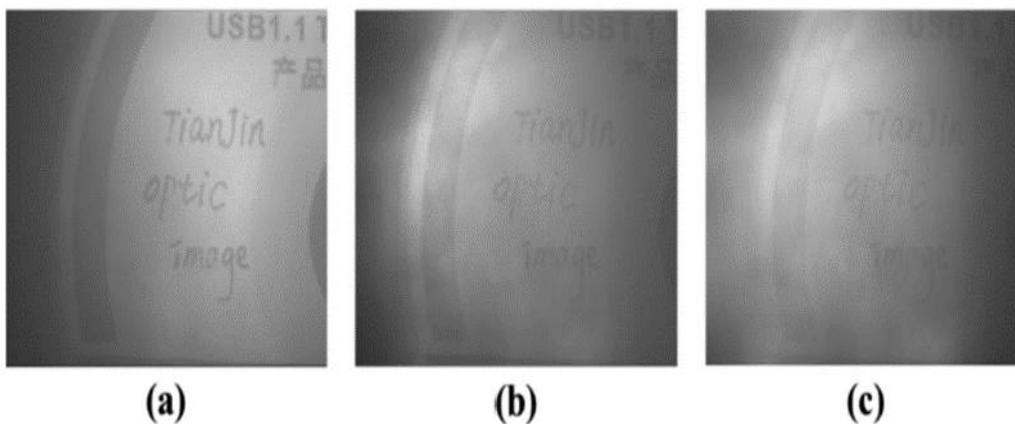


Figura 2.13. a) Imagen recuperada mediante la imagen a 90° , b) Imagen recuperada por el método de Schechner [1], c) Imagen recuperada mediante la intensidad de la imagen [19].

El método que propone Fei Lui [20], considera únicamente la iluminación natural del sol y en base a ésta hace un modelo de la imagen bajo agua, tomando en cuenta que la luz del sol se polariza al interactuar con las partículas del agua de mar. Otro aspecto importante de esta técnica es que toma la longitud de onda como una variable más para la formulación de las ecuaciones del modelo, dado que el agua esparce de manera diferente la luz en función de la longitud de onda. Los resultados de esta técnica se muestran en la Figura 2.14. El paradigma de la técnica va enfocado a no necesitar iluminación artificial para hacer la recuperación de las imágenes en el agua.

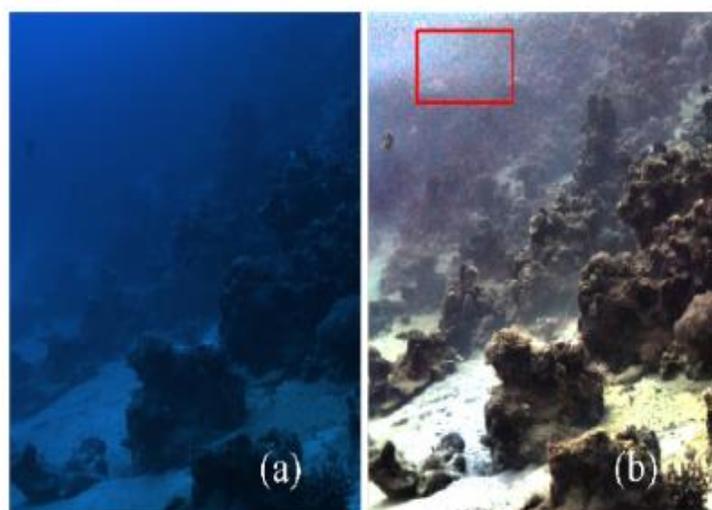


Figura 2.14. a) Imagen tomada directamente con la cámara, b) Imagen recuperada [20].

Como se observa, el paradigma de la técnica va enfocada a no necesitar iluminación artificial para hacer la recuperación de las imágenes en el agua.

La última técnica hallada en la literatura es la desarrollada por Tiegeng Lui [21], esta técnica se enfoca en recuperar imágenes en color mediante una compensación en cada una de las bandas RGB, su innovación radica en que prácticamente todas las técnicas vistas en este capítulo trabajan en escala de grises. Los resultados del método se observan en la Figura 2.15.



Figura 2.15 a) Imagen tomada en un medio turbio azul, b) Recuperación de la imagen sin la compensación, c) Recuperación de la imagen con la compensación, d) Imagen en un medio no turbio [21].

CAPÍTULO III

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

3.1 Luz natural y luz polarizada

La luz es una onda electromagnética transversal que tiene una componente eléctrica y otra magnética ortogonales entre sí (Figura 3.1). La luz natural es aquella en la cual el campo eléctrico varía de manera aleatoria e indefinida. Por otro lado, la luz polarizada es aquella en la que la luz mantiene fija la orientación del campo eléctrico, aunque su magnitud y signo varíen. En este caso el campo eléctrico reside en lo que se conoce como plano de vibración [22].

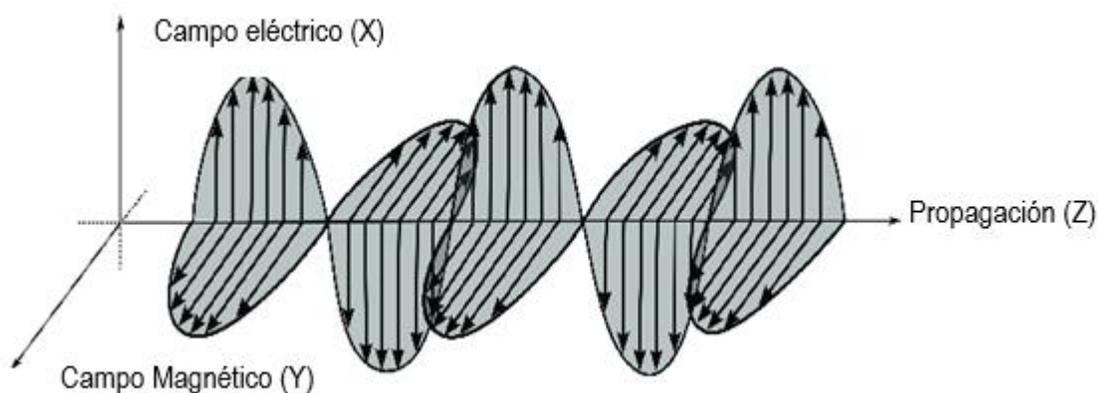


Figura 3.1 Campo eléctrico y magnético de una onda [23].

Una vez establecido el sistema de referencia de tal modo que la dirección de propagación sea a lo largo del eje Z, es posible descomponer la radiación en sus componentes a lo largo de los ejes X y Y. Dichas componentes pueden ser escritas de la forma:

$$\mathbf{E}_x(\mathbf{z}, t) = \mathbf{i} E_{0x} \cos(kz - \omega t) \quad (3.1)$$

Y

$$\mathbf{E}_y(\mathbf{z}, t) = \mathbf{j} E_{0y} \cos(kz - \omega t + \varepsilon) \quad (3.2)$$

Esto se puede observar en la Figura 3.1.

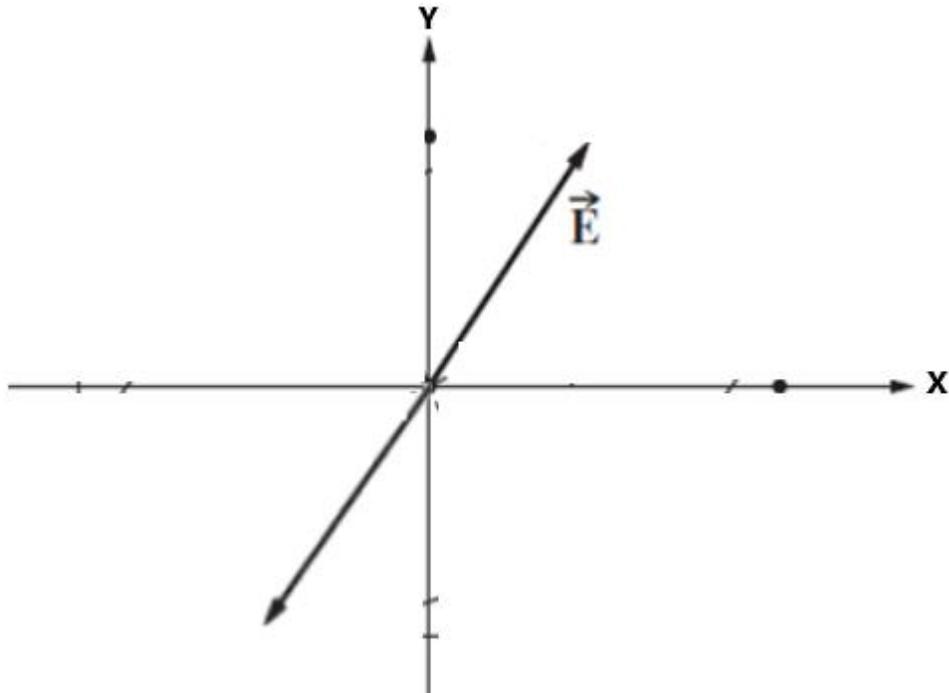


Figura 3.2 Onda vista de frente.

Donde E_{0x} y E_{0y} son las amplitudes de campo eléctrico de cada componente, k es el número de onda, z es la dirección de propagación de la onda, ω es la frecuencia angular, t es el tiempo y finalmente ε es el desfase relativo entre ambas ondas. El agregar ε a la ecuación (3.2), hace que el valor de la ecuación (3.1) sea diferente, si la diferencia de fase relativa es diferente de cero o a un múltiplo par de 2π . Dado lo anterior es posible escribir la radiación polarizada de la forma:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_x(z, t) + \mathbf{E}_y(z, t) \quad (3.3)$$

Dependiendo del valor de desfase, es posible obtener varios casos de polarización: luz linealmente polarizada, circularmente polarizada y elípticamente polarizada.

3.1.1 Polarización Lineal

Si ε es cero o un múltiplo entero de $\pm 2\pi$, se dice que las ondas están en fase, de esta forma se puede reescribir la ecuación (3.3) como:

$$\mathbf{E} = (\mathbf{i} E_{0x} + \mathbf{j} E_{0y}) \cos(kz - \omega t) \quad (3.4)$$

Como se puede observar en la ecuación (3.4), la amplitud del campo está fijada por el término $(\mathbf{i} E_{0x} + \mathbf{j} E_{0y})$, por lo que se encuentra linealmente polarizada.

Si ahora se supone que ε es un múltiplo entero impar de $\pm\pi$, las ondas estarán desfasadas 180° y:

$$\mathbf{E} = (\mathbf{i} E_{0x} - \mathbf{j} E_{0y}) \cos(kz - \omega t) \quad (3.5)$$

Esta onda está de nuevo polarizada linealmente, pero su plano de oscilación se ha girado.

Dado lo anterior, dependiendo de la amplitud de E_{0x} y E_{0y} se pueden obtener los distintos estados de polarización, como lo son horizontal, vertical, diagonal o elíptica.

3.1.2 Polarización circular

En caso de que ambas componentes de la onda tengan igual amplitud (es decir $E_{0x} = E_{0y}$) y además la diferencia relativa de fase $\varepsilon = -\pi/2 + 2m\pi$, donde $m = \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots$ por lo que las ecuaciones son:

$$\mathbf{E}_x(\mathbf{z}, t) = \mathbf{i} E_{0x} \cos(kz - \omega t) \quad (3.6)$$

Y

$$\mathbf{E}_y(\mathbf{z}, t) = \mathbf{j} E_{0x} \sin(kz - \omega t) \quad (3.7)$$

Resultando de su suma:

$$\mathbf{E} = E_0[\mathbf{i} \cos(kz - \omega t) + \mathbf{j} \sin(kz - \omega t)] \quad (3.8)$$

Se puede observar que ahora la amplitud escalar de E es una constante. Pero la dirección de E es variable con el tiempo y en esta ocasión, no está restringida a un solo plano como lo fue el caso de la polarización lineal. La representación de la polarización circular se muestra en las Figuras 3.3 y 3.4.

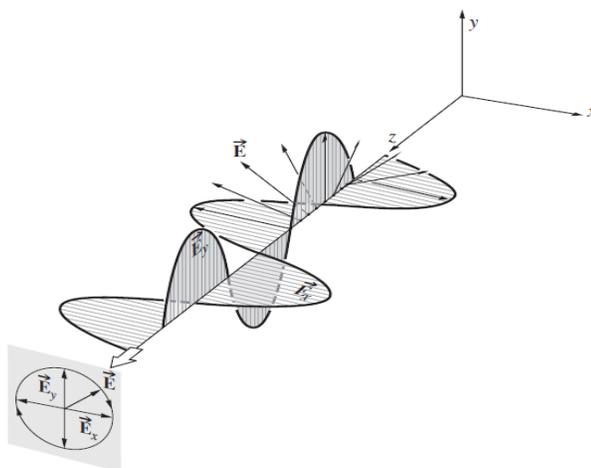


Figura 3.3 Luz polarizada circularmente, con sus respectivas componentes [22].

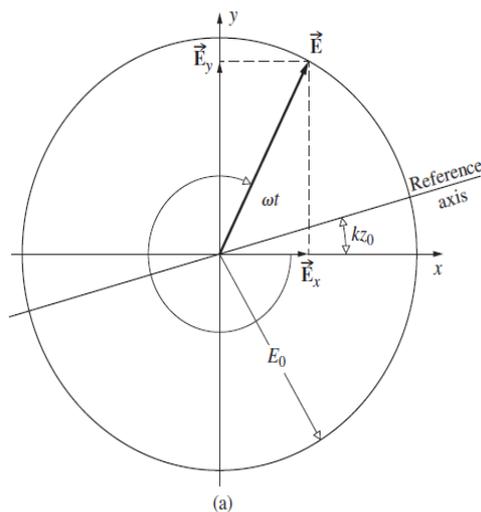


Figura 3.4 Rotación del campo eléctrico en una polarización circular [22].

3.1.3 Polarización elíptica

Por su descripción matemática, podemos considerar la luz linealmente polarizada y la luz circularmente polarizada como casos especiales de la luz elípticamente polarizada. Esto quiere decir que el vector de campo eléctrico \mathbf{E} resultante girará cambiando también su magnitud. En este caso el extremo de \mathbf{E} dibujará una elipse en un plano fijo perpendicular a \mathbf{k} , cuando la onda avanza. Para observarla mejor, se puede escribir una ecuación para la curva trazada por \mathbf{E} , partiendo de:

$$\mathbf{E}_x(z, t) = \mathbf{i} E_{0x} \cos(kz - \omega t) \quad (3.9)$$

Y

$$\mathbf{E}_y(z, t) = \mathbf{j} E_{0y} \cos(kz - \omega t + \varepsilon) \quad (3.10)$$

Se puede desarrollar algebraicamente y equipararla a la ecuación de la elipse llegando finalmente a la siguiente ecuación:

$$\left(\frac{E_y}{E_{0y}}\right)^2 + \left(\frac{E_x}{E_{0x}}\right)^2 - 2 \left(\frac{E_x}{E_{0x}}\right) \left(\frac{E_y}{E_{0y}}\right) \cos \varepsilon = \sin^2 \varepsilon \quad (3.11)$$

Esta es la ecuación de una elipse que forma un ángulo α con el sistema coordenado (E_x, E_y) (Figura 3.5), llegando a la ecuación (3.12).

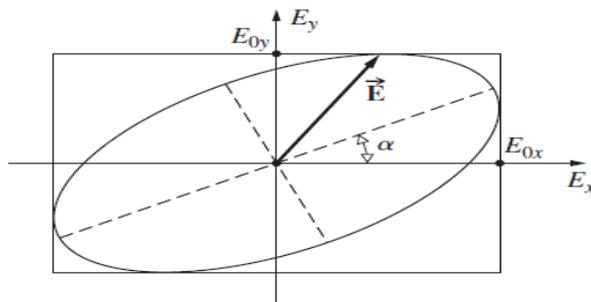


Figura 3.5. Elipse de polarización [22].

$$\tan 2\alpha = \frac{2E_{0x}E_{0y} \cos \varepsilon}{E_{0x}^2 - E_{0y}^2} \quad (3.12)$$

3.2 Elementos ópticos

Los elementos ópticos son aquellos objetos que permiten modificar el estado de la luz que incide en ellos, como lo puede ser cambiando sus propiedades, impidiendo su paso a través del elemento, desviando la dirección de los rayos o incluso absorbiendo luz con ciertas características para de esta manera filtrarla.

3.2.1 Polarizador

El polarizador se define como un elemento óptico cuya energía de entrada es luz natural y cuya salida es alguna forma de luz polarizada (Figura 3.6). Un instrumento que separa las componentes de la luz y solo deja pasar una de las dos se conoce como polarizador lineal [22]. Dependiendo de la forma de la salida de la luz, se pueden también tener polarizadores circulares o elípticos.

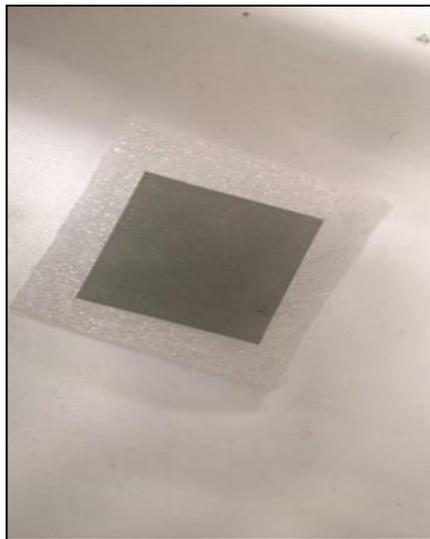


Figura 3.6 Polarizador lineal.

3.2.2 Retardador

El retardador es una clase de elemento óptico que sirve para cambiar la polarización de una onda, si esta incide de una manera adecuada [22]. El principio bajo el cual trabaja el retardador es que posee dos ejes, uno rápido y uno lento. La función del eje rápido es permitir que la componente que incida en su plano no se vea afectada en su polarización, mientras que el eje lento provoca un retardo de fase en la componente incidente, lo cual hace que exista un cambio de fase en la onda, provocando un cambio de estado de polarización. Existen tres tipos principales de retardadores: de onda completa, media onda y $\frac{1}{4}$ de onda.

3.3 Vectores de Stokes

Los vectores de Stokes son una forma de representar la polarización de una onda, basándose en sus características de campo eléctrico y desfaseamiento de la siguiente manera [22]:

$$S_0 = E^2_{0x} + E^2_{0y} \quad (3.13)$$

$$S_1 = E^2_{0x} - E^2_{0y} \quad (3.14)$$

$$S_2 = 2E_{0x}E_{0y} \cos \varepsilon \quad (3.15)$$

$$S_3 = 2E_{0x}E_{0y} \sin \varepsilon \quad (3.16)$$

El parámetro S_0 indica la intensidad del haz incidente, que por lo regular se normaliza a 1, el parámetro S_1 indica la preferencia del haz a una polarización horizontal (0°), el parámetro S_2 indica la preferencia del haz a un estado de polarización diagonal (45°) y finalmente S_3 indica la preferencia del haz a tener una polarización circular derecha o izquierda.

De los parámetros de Stokes hay que considerar también lo siguiente:

$$(S_0)^2 = (S_1)^2 + (S_2)^2 + (S_3)^2 \quad (3.17)$$

Aunque esto solo se cumple cuando se considera luz completamente polarizada.

Los parámetros Stokes pueden ser escritos como un vector, como se muestra a continuación.

$$\mathbf{s} = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

Escritos de esta manera, se pueden representar varios de los estados de polarización que se han visto anteriormente, como se observa en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Vectores de Stokes de varios estados de polarización

Estado de polarización						
Horizontal	Vertical	Diagonal positiva	Diagonal negativa	Circular derecha	Circular izquierda	Luz natural
$\begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$

3.4 Esparcimiento elástico

El esparcimiento elástico es el fenómeno por el cual los fotones son absorbidos por las moléculas y después reemitidos en diferentes direcciones, debido a que las moléculas están orientadas al azar, esto implica que no exista pérdida de energía en el proceso. Es de mencionar que los fotones se reemiten conservando su frecuencia y longitud de onda [22]. Existen dos tipos de esparcimiento: el esparcimiento Rayleigh y el esparcimiento Mie.

3.4.1 Esparcimiento Rayleigh

Este esparcimiento se da cuando la partícula es mucho más pequeña que la longitud de onda del haz incidente. La partícula absorbe todos los fotones y luego los reemite de forma aleatoria dada la distribución aleatoria de las partículas. Por esto último es que se obtiene un haz incoherente del esparcimiento Rayleigh [24].

El esparcimiento Rayleigh se puede describir con la ecuación (3.19), la cual se ilustra también en la Figura 3.7.

$$I(\theta_x) = I_0 \text{Sen}^2 \theta_y \quad (3.19)$$

Donde I_0 es la irradiancia inicial, θ_y es el ángulo entre el rayo esparcido y el eje Y, y finalmente $I(\theta_x)$ es la irradiancia en el eje X.

Uno de los fenómenos que se explica por el esparcimiento Rayleigh es el color del cielo, dado que la luz azul se ve mucho más esparcida que la luz roja [24].

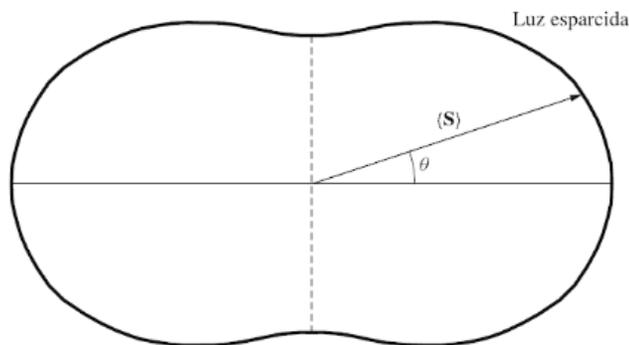


Figura 3.7 Esparcimiento Rayleigh de luz no polarizada [24].

3.4.2 Esparcimiento Mie

Para la situación en la que la partícula es más grande que la longitud de onda de la luz incidente, el esparcimiento Rayleigh es inadecuado para describir el fenómeno. En este caso lo que se presentará es que la luz esparcida por la partícula interferirá de distintas formas con la luz que también fue esparcida por otra partícula cercana ella, esta interferencia bien puede ser constructiva o destructiva. Por lo anterior, lo que se obtiene de este esparcimiento es una superposición de las ondas esparcidas por cada fracción de las partículas [3]. Sin embargo, la diferencia de fase entre las ondas secundarias tiende a ser pequeña, lo que provoca que la irradiancia sea grande, como se observa en la Figura 3.8.

El estudio de este tipo de esparcimiento es sumamente importante, ya que se presenta en una gran cantidad de fluidos, como en las nubes, el humo y el agua turbia [24]. Un fenómeno que puede explicarse gracias al esparcimiento Mie es el color blanco de las nubes en el cielo.

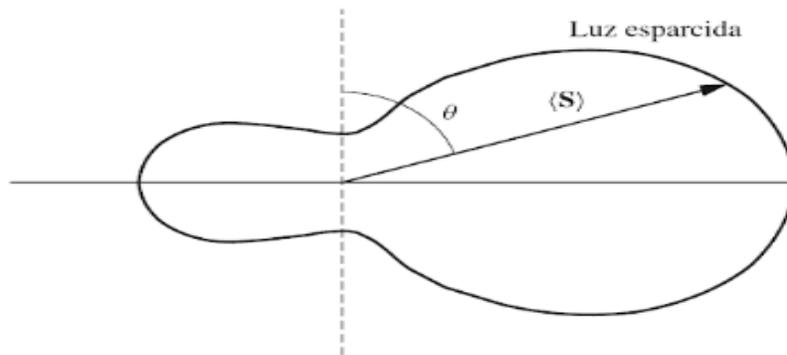


Figura 3.8 Esparcimiento Mie de luz no polarizada [24].

3.5 Turbidez del agua

La turbidez en el agua indica qué tan poco clara es el agua. A mayor turbidez, es más complicado ver a través de ella. La forma en la que se mide la turbidez del agua es por medio de la Unidad Nefelométrica de Turbidez (NTU por sus siglas en inglés *Nephelometric Turbidity Unit*) [25].

Con el ojo desnudo, una persona es capaz de ver a partir de 5 NTU hasta 2000 NTU, que es cuando el agua se vuelve completamente opaca [25]. En la Figura 3.9 se muestran concentraciones de agua con diferente turbidez. La turbidez del agua se debe a diferentes partículas en el agua como pueden ser bacterias, algas, químicos, etc.

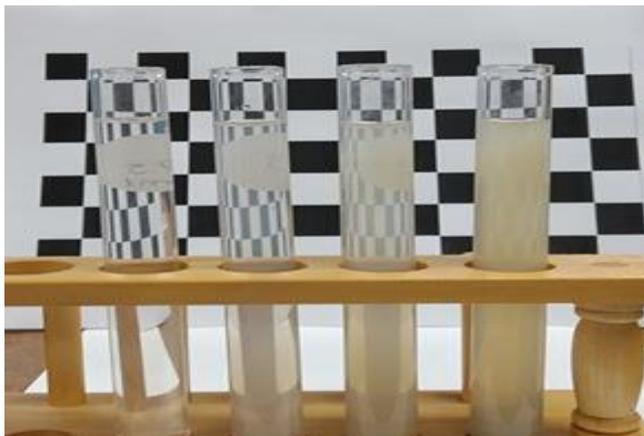


Figura 3.9. Agua con diferentes niveles de turbidez.

La turbidez en el agua se puede medir de diferentes formas, pero las dos más usuales son con el nefelómetro o turbidímetro y el disco de Secchi. El nefelómetro funciona con un rayo de luz que se hace pasar a través de la muestra y en el que después se mide la cantidad de luz que fue esparcida a 90° . Como ventajas tiene que es de muy alta precisión y puede medir turbidez de una escala bastante pequeña [26]. Su principal desventaja es que se pueden dañar fácilmente. Un ejemplo de este instrumento es el nefelómetro PCE-TUM 20L de la marca PCE [26].

Por su parte el disco de Secchi, es un disco de color blanco y negro, el cual se sumerge en agua y se mide cuál es la distancia máxima a la cual aún es posible observar el disco. Como ventajas tiene que es muy barato y fácil de utilizar; sin embargo, esto mismo provoca que sea de baja precisión y que no pueda utilizarse en muestras pequeñas [25].

3.6 Imagen polarimétrica.

La técnica de imagen polarimétrica ha sido aplicada a diferentes medios turbios con el fin de lograr obtener mejores imágenes. Uno de los medios en donde se aplica es en el tejido biológico, en donde han surgido diversas técnicas de las cuales se mencionan algunas a continuación.

3.6.1 Técnica de polarización por transluminancia.

Una de las técnicas de imagen polarimétrica es la llamada polarización por transluminancia y su cual su arreglo experimental se muestra en la figura 3.10.

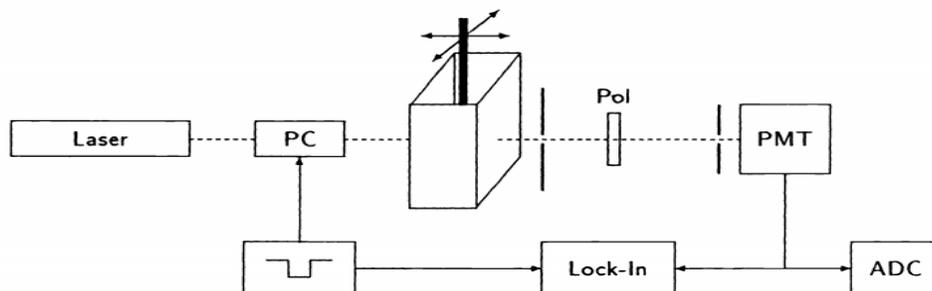


Figura 3.10 Arreglo para un análisis de imagen polarizada mediante transluminancia [5].

El arreglo se compone de un láser de Helio-Neón, una celda de Pockels (PC), un recipiente de vidrio, una muestra translúcida, un polarizador, un fotomultiplicador (PTM) y un medidor (ADC).

El modo en que funciona esta técnica consiste en llenar con un medio turbio el recipiente de vidrio dentro del cual se coloca la muestra. A continuación, se ilumina con luz polarizada modulada por la celda de Pockels y esta luz llega a la muestra la cual absorbe cierta parte de la radiación. Con la información de la luz que absorbe y de la luz que se ve esparcida en el medio se puede realizar un análisis para obtener las características de una muestra [4], esta técnica se utiliza para realizar diafonografía [4].

3.6.2 Técnica de imagen por retroesparcimiento

La técnica de polarización por luz que se ve esparcida de manera múltiple ha sido usada por muchos grupos que trabajan en análisis morfológico y la visualización de capas subsuperficiales en un medio altamente turbio. Esta técnica se basa en analizar cómo cambia la imagen variando los estados de polarización en el medio turbio. Un ejemplo de esta técnica se muestra en la Figura 3.11.

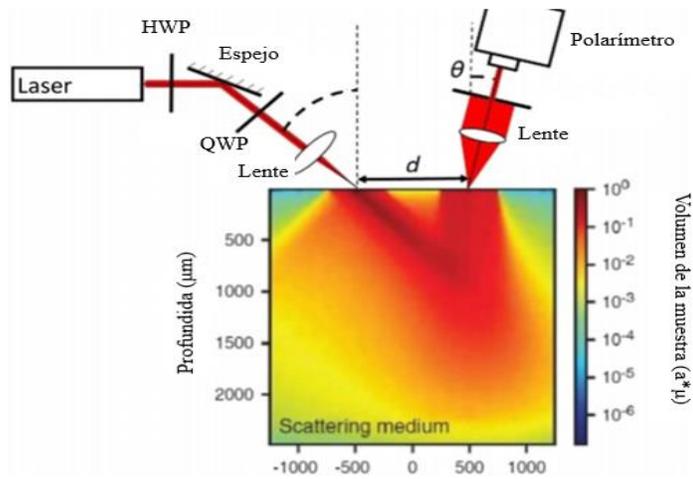


Figura 3.11. Arreglo para análisis de imagen por retroesparcimiento [5].

3.6.3 Espectroscopia de polarización profunda

Si se analiza un tejido que se ilumina con luz blanca linealmente polarizada y además se mide el cambio en la respuesta espectral al ser analizada ante estados ortogonales de polarización, es posible estimar el contenido y distribución profunda de los cromóforos del tejido [4].

El arreglo experimental para este tipo de técnicas se muestra en la Figura 3.12.

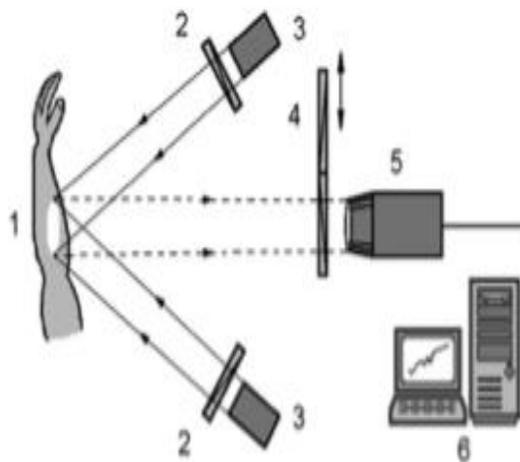


Figura 3.12. Arreglo experimental para espectroscopia de polarización profunda [5].

El arreglo se compone de una fuente, de un tejido a estudiar (1), polarizadores lineales (2), una fuente de iluminación de luz blanca (3), polarizadores y filtros de interferencia (4), una cámara CCD monocromática (5) y una computadora (6).

3.6.4 Microscopia de polarización

La microscopia de luz polarizada tiene mucho tiempo utilizándose con el fin de estudiar estructuras anisotrópicas en tejidos, ya que muchas veces es la única forma de estudiarlos, dado que otros métodos utilizados no son eficaces. Con este método de luz polarizada es posible detectar diferencias de camino óptico de hasta 0.1 nm [4].

Una de las técnicas más recientes es la imagen multispectral polarimétrica (MIM por sus siglas en inglés) que permite detectar la birrefringencia de la capa peripapilar de la fibra del nervio retinal en un diagnóstico de glaucoma [4].

El arreglo experimental para este tipo de estudios se muestra en la Figura 3.13.

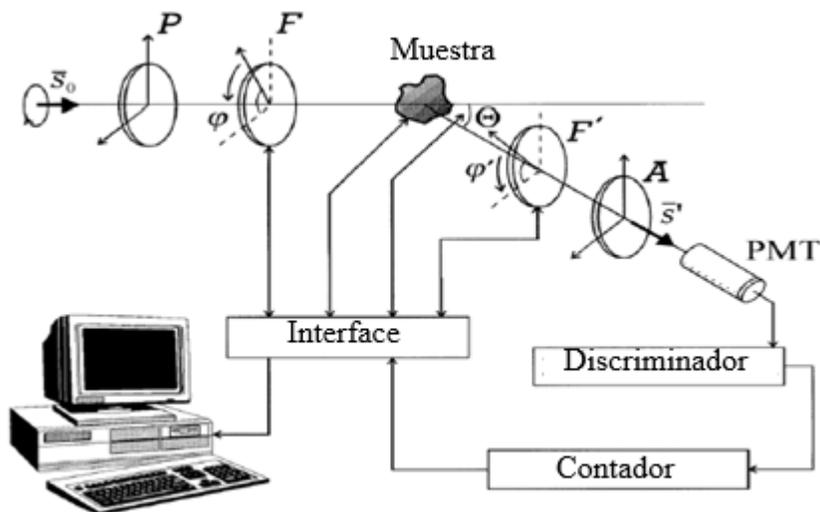


Figura 3.13. Polarímetro de Mueller para la técnica MIM [4].

El arreglo se compone de una fuente de iluminación S_0 que puede ser un láser o una lámpara de halógeno, un conjunto de polarizador-retardador de cuarto de onda en el cual el

retardador gira a cierta velocidad angular ρ , un tejido a analizar, otro conjunto retardador de cuarto de onda-polarizador en el que de nueva cuenta gira a una velocidad angular ρ' y finalmente un fotomultiplicador (PMT) [4].

El modo en que opera este polarímetro consiste en obtener una señal de intensidad modulada gracias a la relación 5:1 de las velocidades angulares ρ y ρ' de los retardadores de cuarto de onda. Con la señal modulada se hace un análisis de Fourier y se obtiene la matriz de Mueller de tejido a estudiar [27].

3.7 Modelos para la recuperación de imágenes en medio turbio

3.7.1 Modelo de Schechner

Partiendo de la Figura 3.14, cuando se observa una imagen obtenida en un medio turbio se pueden medir dos fuentes de radiación, en primer lugar, la radiancia del objeto L que se ve atenuada debido al esparcimiento en el medio cuya señal se denomina transmisión directa D. Por otro lado, se encuentra la luz del aire A (*airlight*), la cual se compone de la iluminación del ambiente que se ve esparcida en el medio. Todas estas señales se pueden modificar al pasar por un filtro polarizador, lo que brindará diferente información de la escena [1].

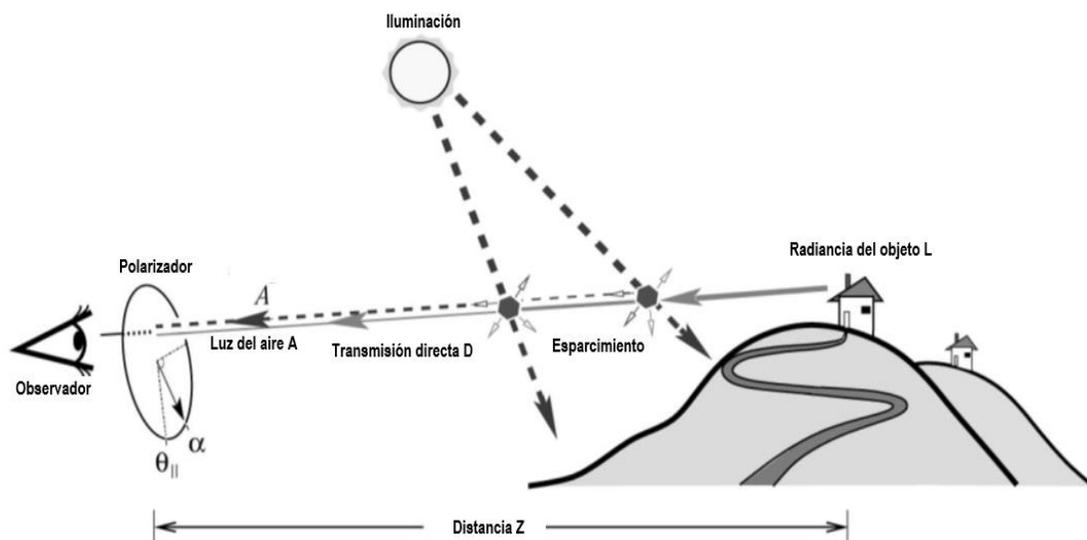


Figura 3.14. Modelo teórico para el método en [1].

El modelo anterior se puede expresar también como en la siguiente figura:

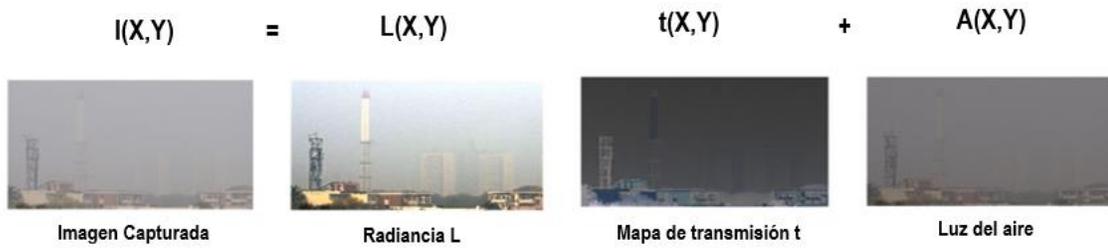


Figura 3.15 Elementos de la imagen en el medio turbio [15].

Donde $I(x,y)$ es la imagen que se captura con la cámara, la cual a su vez tiene tres elementos en los que se puede descomponer la imagen. El primero de ellos es la *clear scene* $L(x,y)$ la cual es la radiancia de la escena. La segunda es el *transmisión map* $t(x,y)$ la cual es la transmitancia del medio turbio, al multiplicar $L(x,y)$ por $t(x,y)$ se obtiene el elemento D de la Figura 3.14. El último elemento es el *airlight* $A(x,y)$, el cual también es parte de la Figura 3.14.

También es de notar que si obtenemos tanto $I(x,y)$, $A(x,y)$ y $t(x,y)$ es posible recuperar la imagen $L(x,y)$ y es bajo esta premisa mediante la cual el método se basa.

En primera instancia se obtienen dos imágenes rotando el polarizador a su estado paralelo y perpendicular de polarización frente al detector, obteniéndose lo siguiente:

$$I^{\parallel}(x,y) = \frac{D(x,y)}{2} + A^{\parallel}(x,y) \quad (3.20)$$

$$I^{\perp}(x,y) = \frac{D(x,y)}{2} + A^{\perp}(x,y) \quad (3.21)$$

El grado de polarización de la luz de retroesparcimiento A esta dado por:

$$P_{scat} = \frac{A^{\parallel} - A^{\perp}}{A^{\parallel} + A^{\perp}} \quad (3.22)$$

Después se estima la luz de retroesparcimiento para cada píxel por medio de:

$$A(x, y) = \frac{I^{\parallel}(x, y) - I^{\perp}(x, y)}{P_{scat}} \quad (3.23)$$

A continuación, la transmitancia es calculada por:

$$t(x, y) = 1 - \frac{A(x, y)}{A_{\infty}} \quad (3.24)$$

Finalmente se calcula L de la ecuación que se observa en la Figura 3.15:

$$L(x, y) = \frac{I^{\parallel}(x, y) - I^{\perp}(x, y) - A(x, y)}{t(x, y)} \quad (3.25)$$

3.7.2 Estimación de la señal

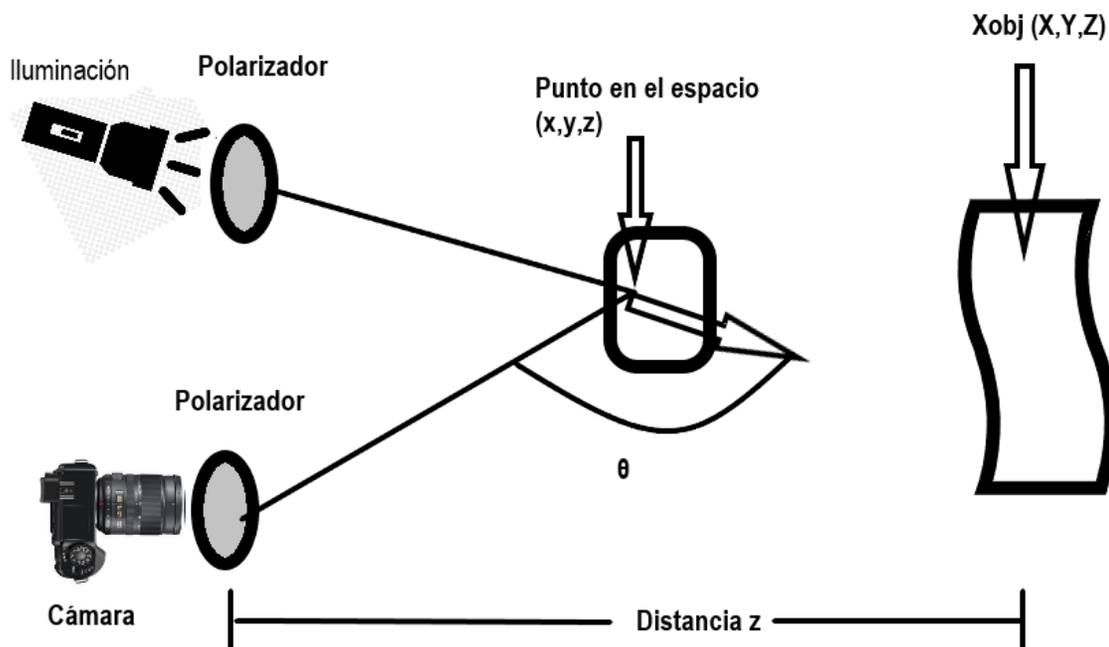


Figura 3.16. Modelo para la estimación de señal.

El método de estimación de la señal fue desarrollado por Schechner en el 2009 [28], como mejora al método presentado en el 2003 [1]. Partiendo de la Figura 3.16, Si se considera la perspectiva de la cámara bajo agua, es posible considerar $X = (X, Y, Z)$ como el sistema coordinado para un punto en el agua. Se colocan las coordenadas globales (X, Y) para ser paralelas a las coordenadas de la imagen (x, y) , mientras que Z está alineada al eje óptico de la cámara y el sistema de origen está en el centro de origen de la cámara [28].

Basados en lo anterior, un punto del objeto en X_{obj} corresponde a un punto de la imagen x_{obj} . Por lo que la línea de visión hacia el objeto es:

$$LOS = \left\{ X : Z \in [0, Z_{obj}], X = \left(\frac{Z}{f}\right) x_{obj}, Y = \left(\frac{Z}{f}\right) y_{obj} \right\} \quad (3.26)$$

Donde f es la distancia focal de la cámara. La imagen medida es dada por:

$$I(x_{obj}) = S(x_{obj}) + B(x_{obj}) \quad (3.27)$$

Donde $S(x_{obj})$ es la señal del objeto y $B(x_{obj})$ es el retroesparcimiento.

Al igual que en los métodos ya mencionados anteriormente, se toman dos imágenes a estados ortogonales de polarización, como lo pueden ser con el polarizador a 0° y 90° respectivamente, con esto es posible tener un mínimo de retroesparcimiento en una de las imágenes, esta imagen se denota I^{min} mientras que la ortogonal es llamada I^{max} . Con lo anterior es posible reescribir la ecuación (3.27) de la siguiente forma:

$$I_{max}(x_{obj}) = S_{max}(x_{obj}) + B_{max}(x_{obj}) \quad (3.28)$$

$$I_{min}(x_{obj}) = S_{min}(x_{obj}) + B_{min}(x_{obj}) \quad (3.29)$$

Para determinar el grado de polarización de la señal, denominada p_{obj} y el grado de polarización del retroesparcimiento p_{scat} se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$p_{obj}(x_{obj}) = \frac{S_{max}(x_{obj}) - S_{min}(x_{obj})}{S_{max}(x_{obj}) + S_{min}(x_{obj})} \quad (3.30)$$

$$p_{scat}(x_{obj}) = \frac{B_{max}(x_{obj}) - B_{min}(x_{obj})}{B_{max}(x_{obj}) + B_{min}(x_{obj})} \quad (3.31)$$

De aquí en adelante, se omite (x_{obj}) por simplicidad. Finalmente se acaba con dos ecuaciones con dos incógnitas para S y B :

$$I_{max} + I_{min} = \mathbf{B} + \mathbf{S} \quad (3.32)$$

$$I_{max} - I_{min} = p_{scat}\mathbf{B} + p_{obj}\mathbf{S} \quad (3.33)$$

La última ecuación se obtiene al sustituir la ecuación (30) en la ecuación (28) llegando a lo siguiente:

$$\hat{S} = \frac{1}{p_{scat} - p_{obj}} [I_{min} (1 + p_{scat}) - I_{max}(1 - p_{scat})] \quad (3.34)$$

$$\hat{B} = \frac{1}{p_{scat} - p_{obj}} [I_{min} (1 - p_{obj}) - I_{max}(1 + p_{obj})] \quad (3.35)$$

Como se observa en la ecuación (34), el término p_{obj} únicamente contribuye como factor de escalamiento para señal \hat{S} , por lo que se asume que $p_{obj} = 0$, dado que este valor es constante en toda la escena, pero es desconocido. Sin embargo, esta suposición permite mayor

simpleza y conlleva de igual forma a un desempeño adecuado del algoritmo. De esta forma las ecuaciones (34 y (35) quedan de la siguiente manera:

$$\hat{S} = \frac{[I_{min}(1 + p_{scat}) - I_{max}(1 - p_{scat})]}{p_{scat}} \quad (3.36)$$

$$\hat{B} = \frac{(I_{max} - I_{min})}{p_{scat}} \quad (3.37)$$

3.8 Memoria de polarización circular

Es un efecto de la luz polarizada circularmente que fue descrito en 1989 por Mackintosh [14]. Este fenómeno se describe como la conservación de las propiedades de la polarización circular cuando esta pasa a través de un medio turbio. Esta memoria se debe a que la helicidad de la onda es aleatorizada más lentamente que su dirección, esto quiere decir que se requieren más eventos de esparcimiento para la helicidad de la onda que para cambiar su dirección [14], [29]

Esta propiedad es más notable en medios turbios de partículas grandes, como lo puede ser la niebla, las nubes e incluso el tejido biológico [30], [4].

Varios trabajos muestran las ventajas de usar este tipo de polarización para la mejora de las características de la imagen [31].

CAPÍTULO IV MÉTODOS DE RECUPERACIÓN DE IMÁGENES EN MEDIO TURBIOS

4.1 Técnica de Schechner

La principal técnica de referencia en la literatura fue la desarrollada por Schechner en el 2003 [1], la cual ya fue explicada de forma teórica.

A continuación, se muestran dos experimentos realizados bajo distintas concentraciones de medio turbio.

El arreglo experimental se muestra en la Figura 4.1, el cual consta de un LED rojo de 5 mW (a), dos polarizadores lineales del tipo HN-38 de la marca Edmund Optics (b y c), una cámara de 12MP de un teléfono móvil Xioami A2 lite (d) y un objeto de estudio (e).

Para la recreación de un medio turbio se utilizó como base 4 ml de leche entera sobre 2.5 litros de agua en un tanque de vidrio de 24 cm x 12 cm x 15 cm, basándonos en la concentración usada en [32]. Además, en la Tabla 4.1 se muestran diferentes concentraciones utilizadas en la literatura.

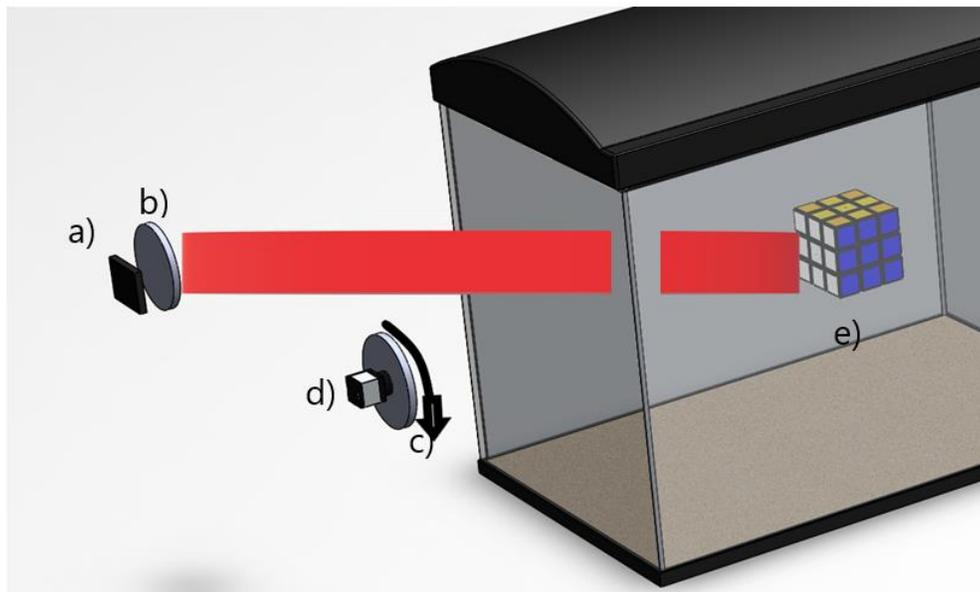


Figura 4.1. Arreglo experimental.

Tabla 4.1. Concentraciones

Autor	Cantidad de leche	Cantidad de agua	Concentración
Xiaobo Li [19]	15 mL	30 L	0.0005
Khadidja Amer[32]	20 mL	15 L	0.0001
Haofeng Hu[15]	25 mL	30 L	0.0008
Yu Tian[18]	80 mL	131 L	0.0005
Propuesta 1	4 mL	2.5 L	0.0016
Propuesta 2	6 mL	2.5 L	0.0024

4.1.1. Técnica de Schechner con baja turbidez

El primer experimento se realizó con una concentración de 4 ml de leche en 2.5 L de agua.

El primer paso para la recuperación de la imagen es la obtención de dos imágenes a estados de polarización ortogonales, como se muestran en la Figura 4.2.



a) b)
Figura 4.2 a) Imagen con el polarizador 0°, b) imagen con el polarizador a 90°.

Además, se captura la imagen que ve directamente la cámara sin polarizador para que sirva de referencia para observar la mejora de la técnica y cuya foto se muestra en la Figura 4.3.

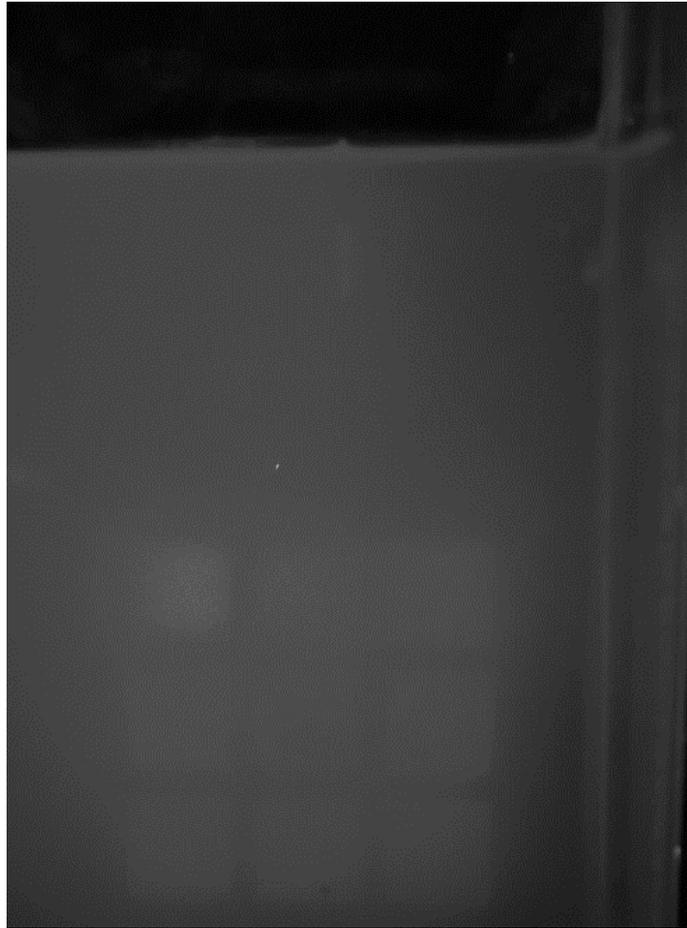


Figura 4.3 Imagen tomada directamente con la cámara en escala de grises.

Al comparar ambas figuras, es observable la mejora que implica el uso de un polarizador al mejorar la visibilidad. También es notable que la imagen a 0° es mejor que la de 90° , lo cual es congruente con la literatura.

Con estas dos imágenes se procede a obtener los parámetros A^{\parallel} y A^{\perp} de las imágenes. La forma de obtenerlos es seleccionar una sección de la imagen sin el objeto y después obtener el nivel de gris de esa sección [1]. Para este experimento se eligió la región que se muestra en la Figura 4.4.



a) b)
 Figura 4.4 Secciones para el cálculo de A_{∞} , a) A^{\parallel} , b) A^{\perp} .

Una vez seleccionadas las regiones, se calculan los parámetros A^{\parallel} y A^{\perp} resultando en 55.49 y 70.81 respectivamente.

A continuación, se calcula el valor de A_{∞} con la siguiente ecuación:

$$A_{\infty} = A^{\parallel} + A^{\perp} \quad (4.1)$$

Resultando en 126.30.

El siguiente paso es calcular el valor de P_{scat} con la ecuación (3.22), dando un valor de 0.12.

Ahora es necesario calcular la imagen del retroesparcimiento utilizando la ecuación (3.23), llegando a la imagen de la Figura 4.5.



Figura 4.5 Retroesparcimiento de la imagen $A(x,y)$.

Es importante mencionar que para el cálculo de $A(x,y)$ y el de $t(x,y)$ se agregó un valor ε en los denominadores de las ecuaciones, con el fin de compensar el error. Este error es debido a que el valor del retroesparcimiento no es constante en toda la imagen y podría llevar a una inadecuada recuperación de la imagen. En la literatura el valor de ε se toma entre 1 y 1.5, por lo que se decidió tomar el valor de 1.5 para los experimentos, ya que fue el que permitió la mejor recuperación de la imagen

Una vez calculado este parámetro, es posible definir la transmitancia de la imagen con la ecuación (3.24), obteniéndose la imagen que se observa en la Figura 4.6. Es de mencionar que, para calcular la transmitancia, se pasaron los valores de las imágenes de un entero de 8 bits a un tipo doble, con el fin de evitar que los valores se truncaran.

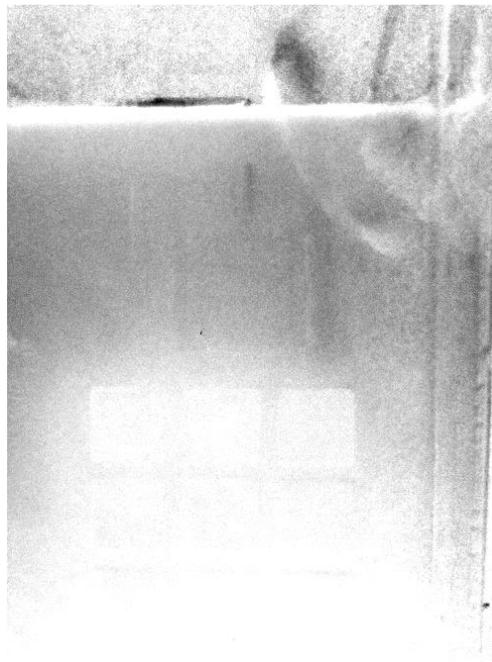


Figura 4.6, transmitancia de la imagen $t(x,y)$.

Finalmente se calcula la radiancia de la escena con la ecuación (3.25), llegando a la imagen de la Figura 4.7.



Figura 4.7 Imagen recuperada por el método de Schechner.

Como se puede observar, la mejora de la Figura 4.7 con respecto a la Figura 4.3 es notable y es acorde a lo visto en la literatura.

4.1.2 Técnica de Schechner con alta turbidez

Para el siguiente experimento se cambió a una concentración de 6 ml en 2.5 L de agua. Las demás condiciones del experimento fueron las mismas.

Nuevamente se tomaron 2 imágenes con el polarizador a 0° y 90° respectivamente, quedando las imágenes de la Figura 4.8.



a) b)
Figura 4.8 Imágenes a través del polarizador a) 0° , b) 90° .

En estas imágenes de nueva cuenta se buscó obtener los parámetros A^{\parallel} y A^{\perp} , para ello se seleccionaron las secciones de las imágenes que se muestran en la Figura 4.9. Los valores obtenidos fueron de $A^{\parallel}= 55.21$ y $A^{\perp}= 74.16$.

Ahora se calcula de nueva cuenta el valor de A_{∞} , arrojando un valor de 129.37.

A continuación, se calcula el valor de polarización del retroesparcimiento P_{scat} , llegando a un valor de 0.14.

Con los valores anteriores se obtiene $A(x,y)$ de la misma forma que la sección anterior, llegando a la imagen de la figura 4.9.



Figura 4.9 Retroesparcimiento de la imagen $A(x,y)$.

Se prosigue con el cálculo de la transmitancia $t(x,y)$, la cual se muestra en la Figura 4.10.



Figura 4.10 Transmitancia de la escena $t(x,y)$.

Finalmente con todos los valores calculados, se obtiene la radiancia de la escena $L(x,y)$, obteniendo la imagen recuperada de la Figura 4.11. Además, en la Figura 4.12 se muestra la

imagen tomada directamente con la cámara sin polarizadores, con el objetivo de observar la diferencia entre la imagen original y la recuperada con la técnica de Schechner.



Figura 4.11 Radiancia de la escena $L(x,y)$.



Figura 4.12 Imagen original con la cámara $I(x,y)$.

Como se puede notar, el método permite una correcta recuperación de la imagen, sin embargo, el método de original Schechner se ve limitado cuando la turbidez aumenta.

4.2 Estimación de señal

En el 2009, Schechner desarrollo un nuevo modelo [1], el cual resultó más eficaz que el implementado en el año 2003 [28], por lo que se decidió utilizar esta técnica como base para el trabajo de tesis. Por ello fue necesario en primera instancia replicar los resultados de la literatura con diferentes experimentos.

4.2.1 Técnica de estimación de señal con baja turbidez

Para el desarrollo de esta técnica, solamente es necesario conocer los parámetros p_{scat} y p_{obj} .

De nueva cuenta y como en la técnica anterior, se obtienen dos imágenes a estados ortogonales de polarización, las cuales son las mismas que se observan en la Figura 4.13.

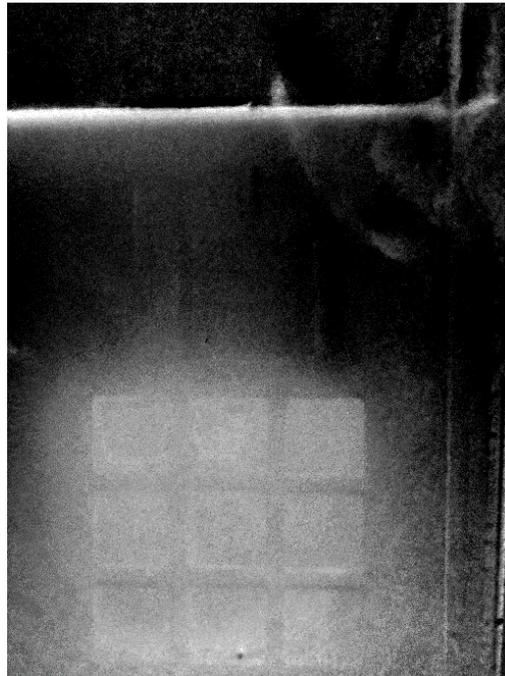


Figura 4.13 Señal de la imagen.

Después se realizan los mismos pasos que en el método anterior para obtener el valor de p_{scat} , que en este experimento fue de 0.12.

Para el valor de p_{obj} se tomó la consideración de tomarlo como cero, ya que se ha demostrado en la literatura que este término solamente sirve para escalar el término de p_{scat} [18], por lo que por simplicidad se le dará el valor de cero.

Con estos valores se procede a calcular el valor de la señal \hat{S} con la ecuación (3.34), llegando a la imagen de la Figura 4.13.

Comparando las Figuras 4.3, 4.7 y 4.13 es notable la mejora que existe, ya que pese a que la Figura 4.8 logra aclarar la escena, no logra eliminar del todo la presencia del medio turbio en la imagen, cosa que si ocurre en la Figura 4.14.

4.2.2 Técnica de estimación de señal con alta turbidez.

Para este experimento se repitieron los pasos del apartado anterior y también los valores de la sección 4.1.2, siendo estos el $p_{scat} = 0.14$, las imágenes de la Figura 4.8 y un $p_{obj} = 0$.



Figura 4.14 Señal recuperada.

Volviendo a utilizar la ecuación (3.34) con los valores del párrafo anterior, se obtiene la imagen de la Figura 4.14.

Como se observa en la Figura 4.14, el método no logra una adecuada recuperación de la imagen, por lo que en el capítulo siguiente se detallará el método propuesto para mejorar la imagen en condiciones similares.

CAPÍTULO V

RECUPERACIÓN DE IMÁGENES EN MEDIOS TURBIOS CON POLARIZACIÓN CIRCULAR

Una vez desarrollados los métodos del capítulo IV, se procedió a proponer una técnica propia para la recuperación de las imágenes en un medio turbio.

5.1 Técnica propuesta.

Para la técnica se propuso usar el arreglo experimental utilizado en la Figura 4.1 pero en esta ocasión se partió de la hipótesis que propone MacKintosh [14], en la cual menciona que la polarización circular mantiene mejor sus características al propagarse en un medio turbio que la polarización lineal [13].

Una de las modificaciones que se realizó al arreglo experimental es la de trabajar a una distancia de 7 cm desde el borde de la pecera hasta el objeto, ya que después de diversos experimentos se encontró que ésta era la distancia ideal para la comprobación de la técnica, ya que a esta distancia las características del objeto ya no son distinguibles en el medio turbio, pero tampoco es tan profundo como para que la técnica resulte imposibilitada de funcionar.

La otra modificación es un cambio de cámara a una Basler aca-2500 del tipo CMOS con una resolución de 5 MP.

A diferencia del trabajo en [13], se propuso en primera instancia usar un polarizador circular derecho para generar los estados de polarización y después analizar esta polarización circular con un conjunto de retardador de $\frac{1}{4}$ de onda con un polarizador lineal para tener la capacidad de obtener a voluntad un analizador circular derecho o izquierdo según se requiera. La base de la técnica consiste en colocar el primer polarizador como se muestra en la Figura 5.1.

Al colocar el polarizador de esta manera, la polarización lineal de la primera parte va a ver retardada una de sus componentes con respecto a la otra, lo que dará una polarización circular.

A continuación, se gira el retardador de $\frac{1}{4}$ de onda de onda para buscar dos estados de polarización complementarios, dejándose fijo el polarizador lineal, de tal manera que únicamente se esté variando la retardancia.

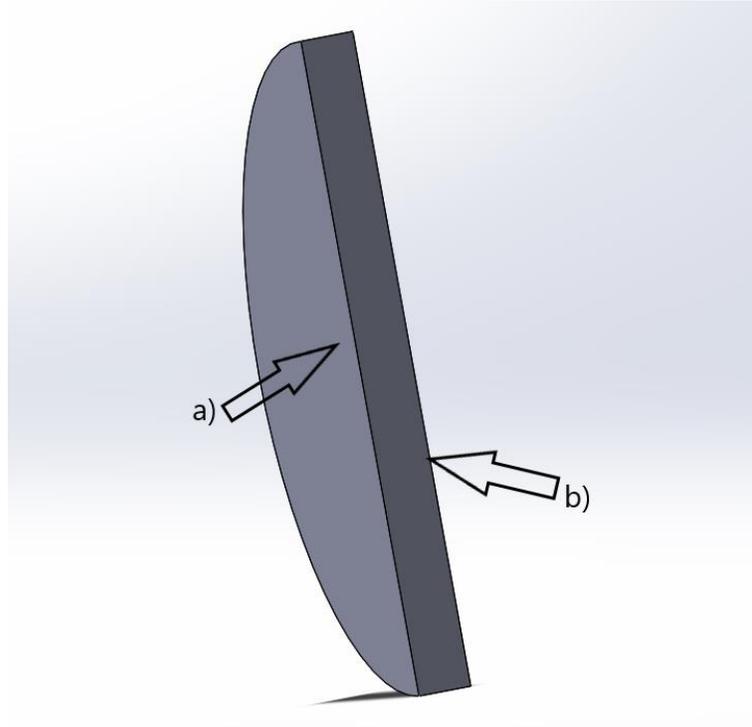


Figura 5.1 Polarizador circular, a) polarizador lineal, b) retardador de cuarto de onda.

Otra diferencia es que se trabajó únicamente con dos imágenes para la recuperación del objeto en el medio turbio.

La última diferencia es que el trabajo se basa en el modelo de estimación de la señal [28] en lugar del modelo tradicional de Schechner [1], lo cual hace más rápido el recuperar la imagen, al requerir hacer menos cálculos como ya se vio en el capítulo IV.

5.1.1. Baja turbidez con el objeto 1

Para comprobar la efectividad de la técnica, se decidió hacer con cada una de las configuraciones tres experimentos, desarrollando en primera instancia el método de Schechner [1], dado que es el principal método de referencia en la literatura y contra el que la mayoría de

los trabajos se comparan. También se implementó la técnica de estimación de señal con polarización lineal [28], dado que es uno de los métodos más efectivos y rápidos en la literatura. Para ello se decidió utilizar como objeto el cubo de Rubik, dado que es el objeto más usado en este tipo de estudios. Finalmente, se mostrarán los resultados de la técnica propuesta con polarización circular.

5.1.1.1 Método de Schechner con el objeto 1

Para el primer experimento se volvió a desarrollar la técnica vista en el capítulo III, usando la configuración nueva para el experimento, como lo fue la cámara CMOS y la distancia de 7 cm.

En primera instancia se capturó una imagen de referencia para con ella tener la imagen con la mejor calidad posible, al no estar el objeto en un medio turbio, esta imagen se observa en la Figura 5.2.



Figura 5.2. Imagen en un medio claro.

A continuación, se generó el medio turbio con 4.5 ml de leche.

El siguiente paso fue capturar la imagen en este medio turbio, como se ilustra en la Figura 5.3 para poder hacer la comparación contra las imágenes que se obtienen de las técnicas de mejoramiento de la imagen, dado que el objeto es prácticamente imposible de observar.



Figura 5.3. Imagen en el medio turbio.

Después se procedió a la toma de dos imágenes en dos estados de polarización complementarios.

Enseguida se tomó la sección de la imagen sin objeto de la Figura 5.4 y se calculó el P_{scat} , siendo este de un valor de 0.2927. Con este valor se procedió a realizar todo el procedimiento para llegar a la radiancia L del objeto, la cual se muestra en la Figura 5.5.



a) b)
Figura 5.4 a) Sección con el polarizador 0° , b) Sección con el polarizador a 90° .

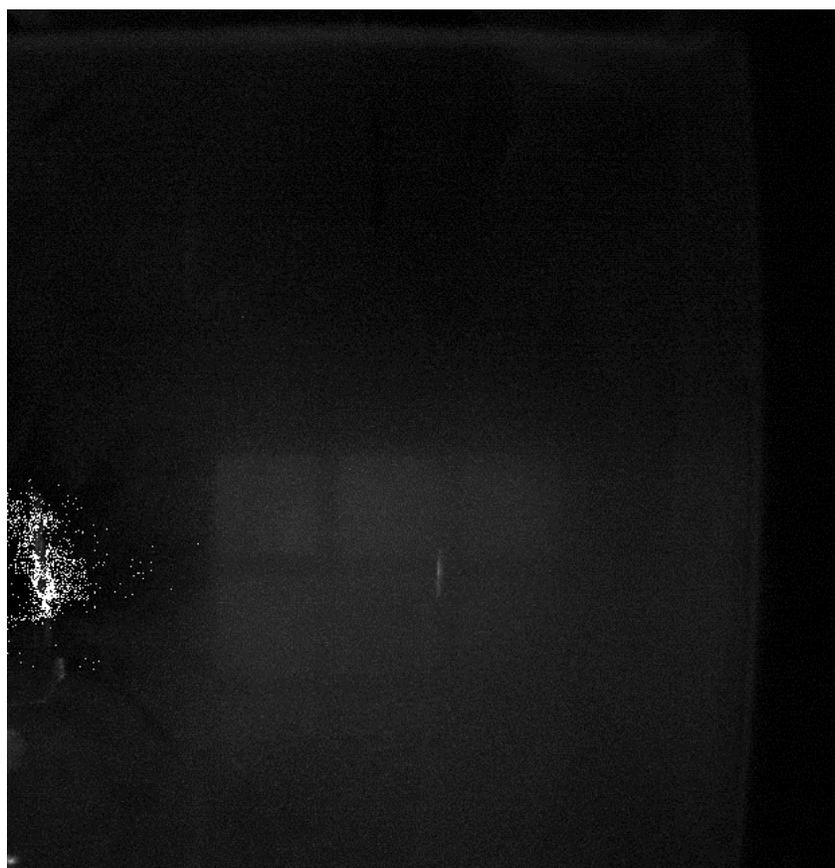


Figura 5.5. Radiancia de la imagen.

Como se muestra, la imagen tiene ruido debido a la turbidez del medio, aunque es notable la mejora en comparación con la Figura 5.3, ya que es posible distinguir el objeto en la imagen.

5.1.1.2 Método de estimación de señal con el objeto 1

A continuación, partiendo de las imágenes de la figura 5.4 y con el valor de $P_{scat} = 0.2829$, se propuso el valor de $P_{obj} = 0$ y se utilizó la ecuación (3.34) para calcular \hat{S} , con lo que se obtiene la Figura 5.6.



Figura 5.6 Señal de la imagen.

Como se logra apreciar, la estimación de señal logra quitar el ruido y parte de la luz retroesparcida, lo que permite detectar un poco mejor el objeto, sin embargo, no son aún apreciables las características del objeto.

5.1.1.3 Método propuesto con el objeto 1

Para probar el método propuesto se sustituyen los polarizadores lineales por polarizadores circulares y se procede de manera similar a los experimentos de estimación de señal, obteniéndose dos imágenes, buscando un mejor y un peor estado de polarización circular.

Después es necesario calcular el valor de P_{scat} en la imagen partiendo de las secciones de la Figura 5.7.

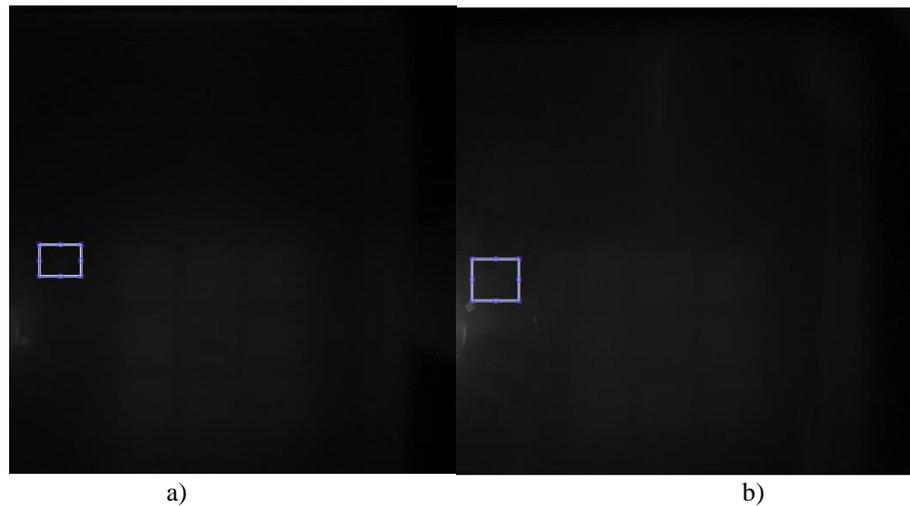


Figura 5.7 a) Sección con el mejor estado de polarización, b) Sección con el peor estado de polarización.

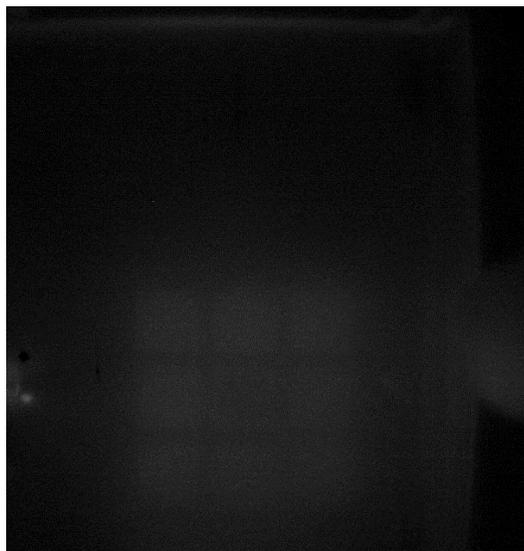


Figura 5.8. Estimación de señal con polarización circular.

Llegando a un valor de $P_{scat} = 0.3658$, el cual se nota es más elevado que el del método anterior, ya que la polarización circular se mantuvo más en el medio que la polarización lineal.

Con este valor y considerando $P_{obj} = 0$, se procedió a nuevamente calcular la ecuación (3.34) para obtener \hat{S} , de donde se obtiene la imagen que se muestra en la Figura 5.8.

5.1.2. Baja turbidez con el objeto 2

Para el siguiente experimento, se colocó una moneda de 50 centavos en una de las caras del cubo, esto con el objetivo de observar qué tan efectivo era el método en un material con mayor reflectancia a la de una de las caras del cubo. También se hizo una inscripción con letras negras en algunas caras del cubo, para ver si era posible observar las letras al hacer la recuperación de la imagen. También es de mencionar que este experimento se realizó sobre la cara amarilla del cubo, dado que la irradiancia de este color es diferente a la del blanco, y se deseaba notar qué influencia tendría esto en la técnica.



Figura 5.9. a) Imagen en un medio claro, b) Intensidad de la imagen en el medio turbio.

Realizando el mismo procedimiento, se obtiene un valor de $P_{scat} = 0.3115$ para la polarización lineal y un $P_{scat} = 0.3960$ para el caso de la polarización circular, llegando a las imágenes de la Figura 5.10

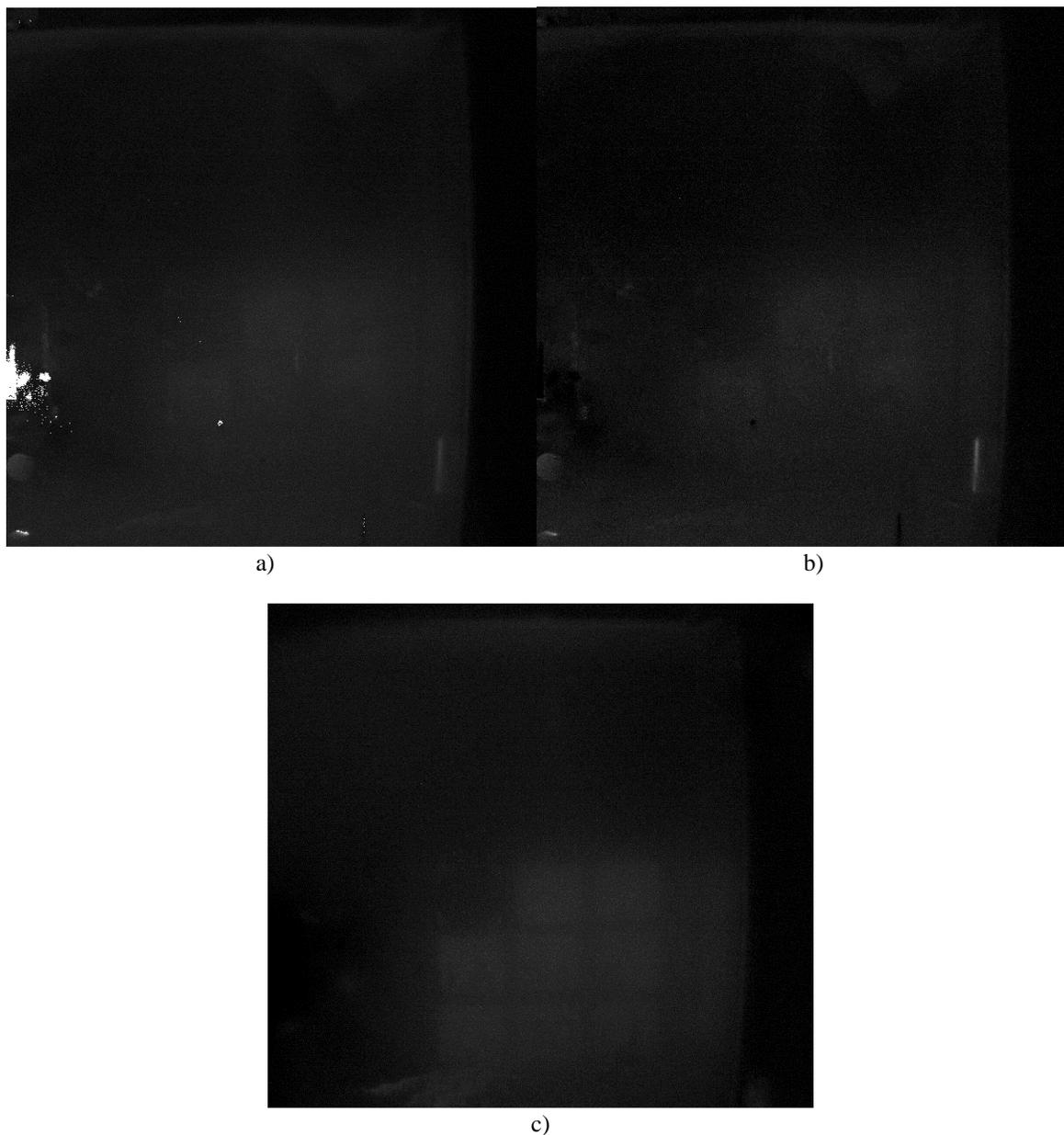


Figura 5.10. Comparativa de los métodos con el objeto 2, a) Método de Schechner, b) Método de estimación de señal, c) Método propuesto.

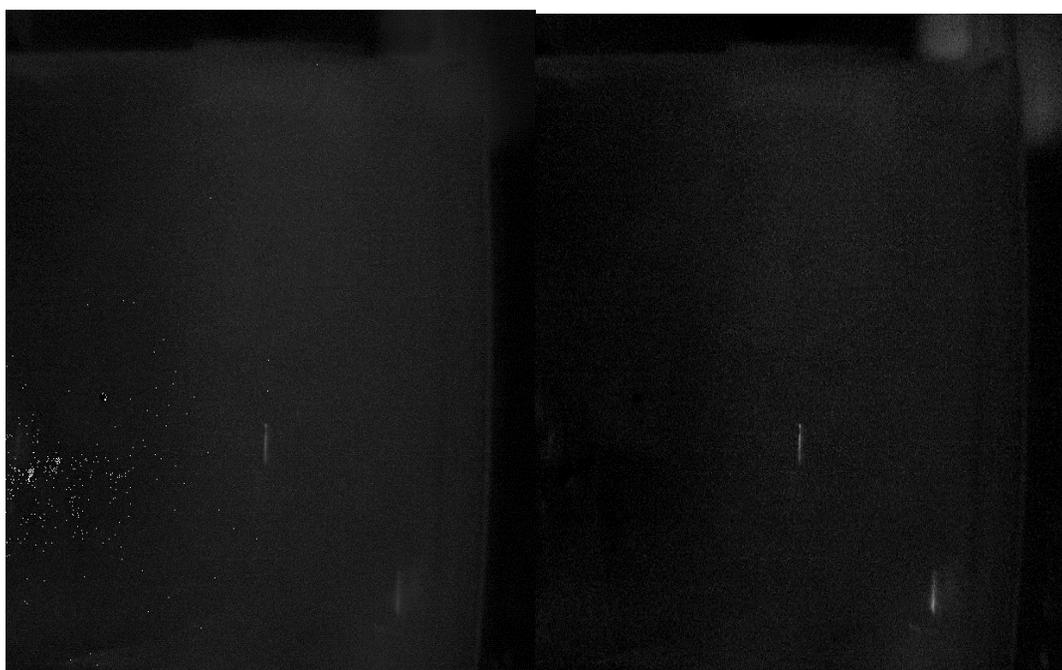
5.1.3 Baja turbidez con el objeto 3

Para el siguiente experimento, se probó la técnica en un trozo de madera a la cual se le hizo una inscripción de letras de manera similar al experimento anterior. Esto se realizó con el objetivo de probar la técnica en un material que tiene muy poca reflectancia. En la Figura 5.11 se muestra el objeto en el medio claro y el mismo en un medio turbio.



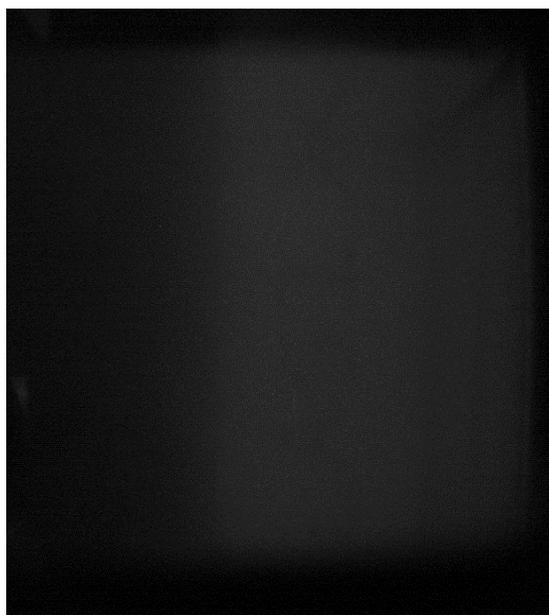
Figura 5.11. a) Imagen en un medio claro con el objeto 2, b) Intensidad de la imagen en el medio turbio.

Ahora se obtiene un valor de $P_{scat} = 0.2459$ con la polarización lineal y de $P_{scat} = 0.3376$ con la polarización circular, y se calculan las imágenes recuperadas que se muestran en la Figura 5.12.



a)

b)



c)

Figura 5.12. Comparativa de los métodos con el objeto 3, a) Método de Schechner, b) Método de estimación de señal, c) Método propuesto

5.1.4 Alta turbidez

Para el último experimento se cambió la concentración de leche en el agua, con el fin de aumentar la turbidez en el medio, lo que causó mayor esparcimiento de la luz y una mayor dificultad para lograr la recuperación. Dado que en las primeras pruebas se notó que con esta turbidez la distancia de 7 cm era demasiada para las técnicas utilizadas, se decidió modificar la distancia 4.5 cm, en donde se obtuvieron resultados similares a los 7 cm con una mezcla de 4 ml de leche en 2.5L de agua.



Figura 5.13. a) Imagen en un medio claro, b) Intensidad de la imagen en el medio altamente turbio.

De nueva cuenta se calcularon los valores de P_{scat} , llegando a un valor de $P_{scat} = 0.2658$ en la polarización lineal y a un $P_{scat} = 0.3117$ en el caso del método propuesto. Partiendo de esto se calcularon las imágenes que se muestran en la Figura 5.14.

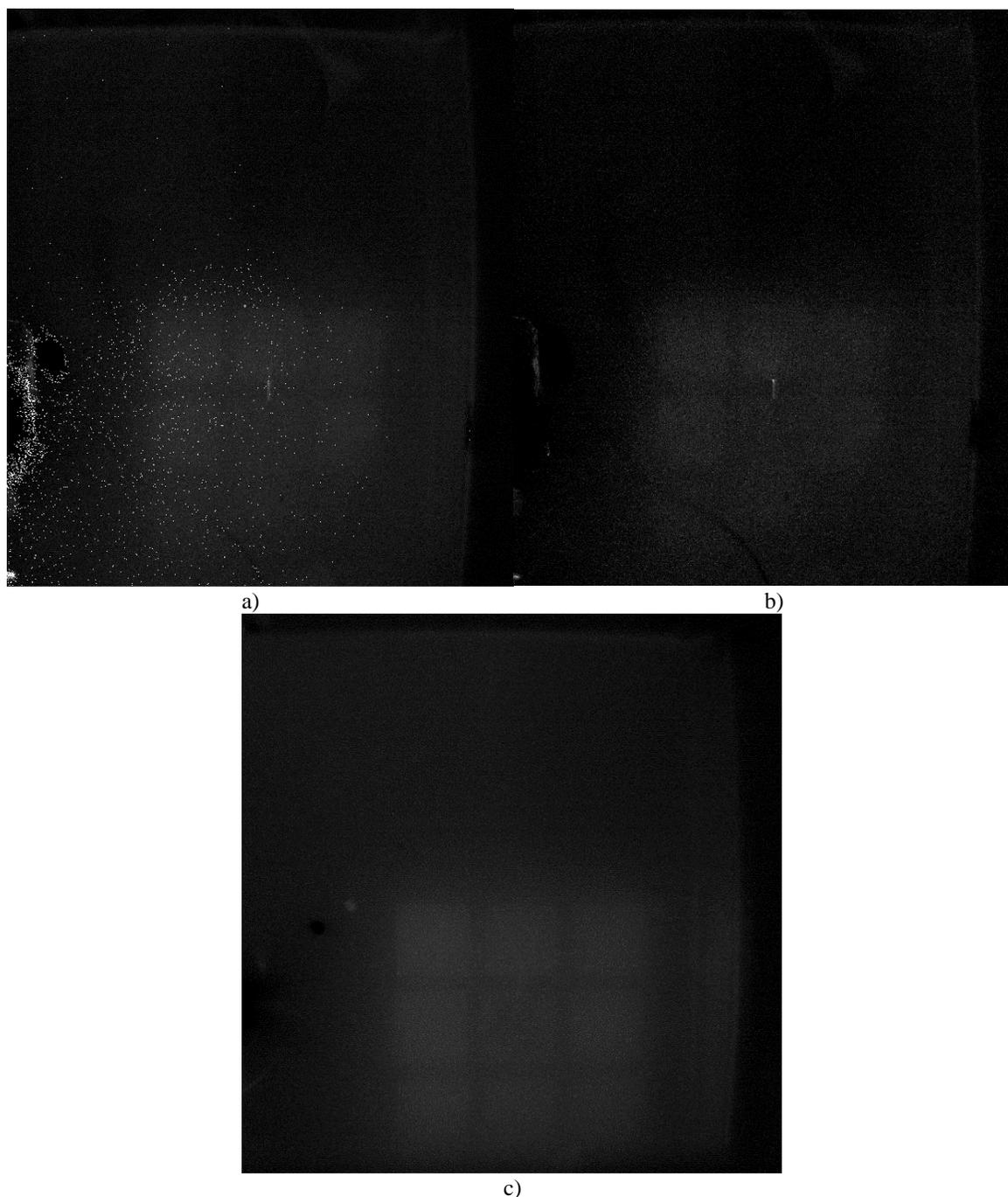


Figura 5.14. Comparativa de los métodos con alta turbidez, a) Método de Schechner, b) Método de estimación de señal, c) Método propuesto.

CAPÍTULO VI

ANÁLISIS DE RESULTADOS

6.1 Métricas para la calidad de la imagen

Con la finalidad de conocer la efectividad de la técnica de una manera cuantitativa, se buscaron métricas las cuales pudieran medir la calidad de una imagen y con ello comparar los resultados del método propuesto contra los de la literatura.

Se eligieron métricas que fueran más acordes a la percepción visual humana en lugar de aquellas que estuvieran sujetas a la percepción de mejora de una computadora, dado que la técnica está enfocada en que las imágenes sean analizadas por personas.

6.1.1 EME

El EME (*effective measure of enhance*) traducido como “medida efectiva de mejora” es una métrica de calidad de la imagen desarrollada en el año 2000 [33] y está relacionado con los conceptos de visión humana establecidos en la Ley de Weber [34].

La métrica parte de dividir la imagen $X(m,n)$ en una sección de interés de la misma o en una cantidad de N bloques dada por el producto $K_1 K_2 w_{k,l}(i,j)$ de tamaño $l_1 * l_2$.

$$EME = \left| \frac{1}{k_1 k_2} \sum_{l=1}^{k_2} \sum_{k=1}^{k_1} 20 \log \frac{I_{max;k,l}^w}{I_{min;k,l}^w} \right| \quad (6.1)$$

Donde $I_{max;k,l}^w$ y $I_{min;k,l}^w$ son el mínimo y máximo de la imagen $X(n,m)$ respectivamente dentro del bloque $w_{k,l}$.

Este parámetro de medición ha sido usado ampliamente en la literatura para evaluar la calidad de las técnicas para el mejoramiento de la imagen como se puede observar en los siguientes trabajos del área: Huang [10], Hu [11], [12], [13], Li [15] y Liu [21]. También se observa su uso en investigaciones que son de un campo diferente como por ejemplo en los trabajos de Pelli [35] y Agaian[36].

Para el caso de esta métrica, un mayor valor de EME es indicativo de una mejor calidad de la imagen. Hay que mencionar que el valor del EME es independiente, dado que solo sirve

cuando hay una comparativa con la misma imagen y no con otras de características completamente diferentes.

Para ejemplificar el uso del EME, se parte de la Figura 5.29. En esta figura se toma la sección que se muestra en la Figura 6.1.

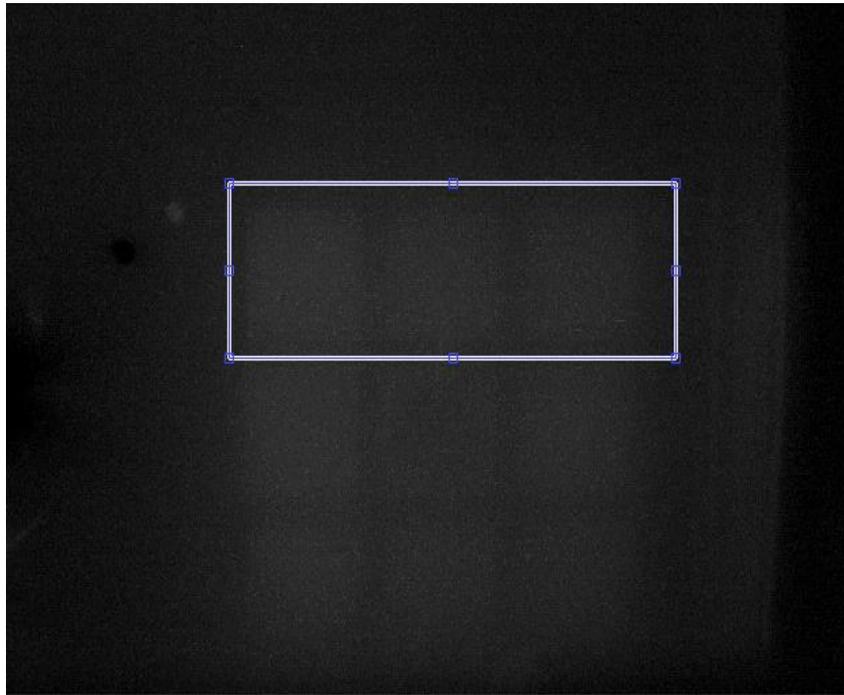


Figura 6.1 Sección para el EME.

La decisión de tomar la sección de la imagen fue con el motivo de analizar solamente la región de interés y así únicamente calcular la calidad de la recuperación del objeto.

A continuación, esta sección de la imagen se procesó con un código en Matlab utilizando la ecuación (6.1), resultando en un valor de $EME = 5.15$.

6.1.2 Contraste de Michelson

Como una métrica complementaria a la EME, se propuso utilizar el contraste de Michelson, el cual es usado para medir la visibilidad en imágenes que solo tienen patrones en blanco y negro.

Existen dos tipos de contraste [37]:

- El contraste físico, el cual es la diferencia de luminancia entre dos áreas vecinas.
- El contraste perceptivo, que se refiere a percibir la diferencia en claridad de áreas adyacentes.

Este estudio se basa en el contraste físico que existe en el área a analizar. Por lo que se utilizó el contraste de Michelson dado por [38]:

$$C = \frac{L_{figura} - L_{fondo}}{L_{figura} + L_{fondo}} \quad (6.2)$$

Siendo L la radiancia para el objeto y en su caso para el fondo de la imagen. El valor del contraste va desde 0 hasta 1, siendo un valor mayor el que indique mayor contraste y por lo tanto una mejor calidad de la imagen.

Esta métrica se utiliza en la literatura en trabajos como el de Hu [13], Li [19] y Agaian [35]. El contraste de Michelson también se puede utilizar para obtener el contraste de las franjas observadas de una señal sinusoidal que está en el dominio espacial, este valor corresponderá a la amplitud de la señal dada [22].

Para el cálculo del contraste de Michelson, de nueva cuenta se utilizó la sección de la Figura 6.1.

De esta sección se graficó un perfil de intensidad de grises de una línea de un píxel ancho de la parte central de la sección que se eligió, obteniéndose la gráfica de la Figura 6.2

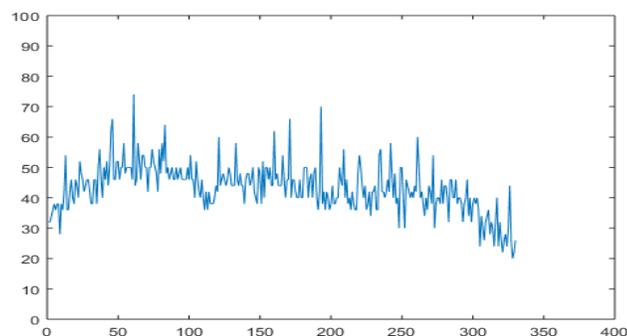


Figura 6.2. Perfil de intensidad.

Como se observa, las partes centrales del perfil corresponden a la parte de la imagen con color blanco y los picos de más bajo valor al fondo negro del cubo.

De este perfil se tomó un valor máximo y un valor mínimo, buscando que fueran valores estables dentro de la gráfica, como se muestra en las Figuras 6.3 y 6.4. Por ejemplo, en la Figura 6.3, pese a que existe un valor mayor en la gráfica, no se consideró éste debido a que era un pico demasiado inestable en la gráfica.

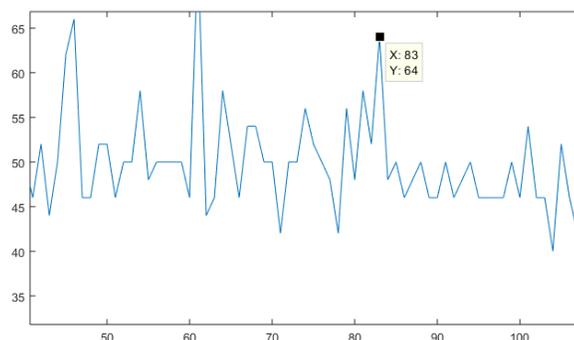


Figura 6.3 Valor máximo en la gráfica.

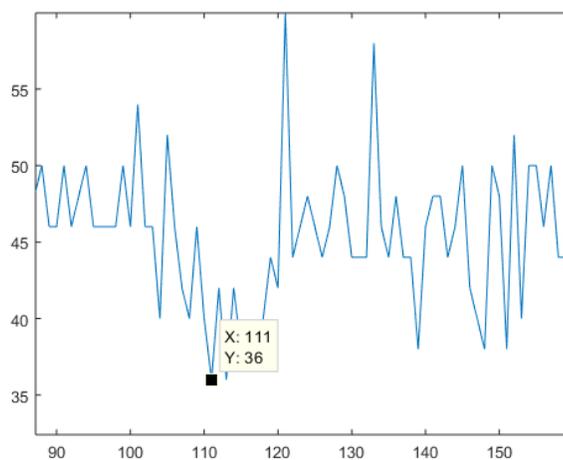


Figura 6.4 Valor mínimo en la gráfica.

Con estos valores de píxel, se utilizó la ecuación (6.2), siendo L_{figura} el valor del píxel máximo y L_{fondo} el valor del píxel mínimo, dando esto como resultado un contraste de 0.28.

6.2 Comparativa de la calidad de la imagen

Con el fin de evaluar la calidad de nuestra técnica en comparación con las de la literatura, se evaluó a cada una de las imágenes obtenidas durante el capítulo IV con las métricas que ya se han revisado en este capítulo.

De esta evaluación, se obtuvieron cuatro tablas distintas, cada una correspondiente a un experimento del capítulo V.

Tabla 6.1 Objeto 1 baja turbidez.

Imagen	EME	Contraste de Michelson
Medio claro (Referencia)	6.06	0.52
Método propuesto	5.2	0.31
Método estimación de señal	4.53	0.3
Método Schechner	4.46	0.28
Medio turbio	3.1	0.083

Tabla 6.2 Objeto 2 baja turbidez.

Imagen	EME	Contraste de Michelson
Medio claro (Referencia)	5.35	0.44
Método propuesto	4.14	0.33
Método estimación de señal	3.86	0.29
Método Schechner	3.24	0.16
Medio turbio	2.62	0.056

Tabla 6.3 Objeto 3 baja turbidez.

Imagen	EME	Contraste de Michelson
Medio claro (Referencia)	4.19	0.41
Método propuesto	2.63	0.31
Método estimación de señal	2.37	0.29
Método Schechner	2.4	0.3
Medio turbio	1.95	0.06

Tabla 6.4 Objeto 1 alta turbidez.

Imagen	EME	Contraste de Michelson
Medio claro (Referencia)	6.2	0.58
Método propuesto	4.97	0.28
Método estimación de señal	4.32	0.25
Método Schechner	4.21	0.22
Medio turbio	2.68	0.057

CAPÍTULO VII.

CONCLUSIONES Y TRABAJO A FUTURO

En este capítulo se presentan las conclusiones del presente trabajo. En primera instancia se mencionan los objetivos alcanzados. También se analizan las mejoras y el trabajo a futuro que se pueda realizar, con el fin de mejorar y optimizar la técnica que se ha propuesto en el trabajo.

7.1 Conclusiones

Se logró desarrollar una técnica adecuada para la recuperación de imágenes en medios turbios mediante polarización circular, mediante el análisis de la polarización usando un elemento analizador general de estados de polarización general compuesto por un retardador de $\frac{1}{4}$ de onda en conjunto con un polarizador lineal.

Para el arreglo experimental se eligió el uso de iluminación del tipo LED debido a su menor costo y mayor facilidad de manejo en el montaje. Otro detalle importante por lo que se usó el LED, fue para evitar el fenómeno de moteado que causa el utilizar iluminación laser, dado que se está trabajando en un medio turbio.

También durante la investigación se trabajó con una concentración de medio turbio más alta que las que se reportan en la literatura, por lo que se logró explorar una sección más amplia de los trabajos reportados anteriormente y probar que el método era eficiente aun en medios muy turbios. Además, se establecieron algunas distancias de trabajo bajo las cuales, el método resultaba efectivo cuando las concentraciones se variaban.

Otro aspecto que se analizó fue el de usar diferentes tipos de objetos a los que se utilizan normalmente en la literatura, como lo fue madera y una moneda; con el fin de ver la influencia de la reflectancia del objeto en la recuperación de la imagen, encontrándose que los materiales de baja reflectancia no son adecuados para ser recuperados con la técnica propuesta, mientras que los de media y alta reflectancia como lo puede ser el metal y el plástico, son posibles de recuperar aun en medios de turbidez elevada mediante la técnica desarrollada.

Se logró observar que el método desarrollado a diferencia de los estudiados de la literatura, recupera detalles finos en los experimentos, tales como bordes y letras que estaban

inscritas en el objeto, permitiendo distinguir de una manera más clara el objeto que se estaba estudiando.

Pese a que el trabajo se enfoca en que las imágenes recuperadas sean analizadas por humanos con el fin de encontrar detalles en los objetos o distinguir los mismos, también se buscó que la mejora de calidad de la imagen quedara reflejada en forma cuantitativa. Con el fin de poder comparar los distintos métodos existentes con el propuesto, se eligieron las métricas EME y el contraste de Michelson. El primero de ellos es una métrica estándar en este tipo de trabajos y el segundo pese a no ser utilizado tanto como el anterior, también está presente en algunos métodos de la literatura, además de que es utilizado en otras áreas de estudio. Otra de las razones por las que se eligieron estas métricas es que están diseñadas para ser similares a la percepción humana, lo cual empata con el objetivo del trabajo. Métricas tales como el error cuadrático medio y la proporción máxima de señal a ruido son bastante utilizadas en el área de imágenes, sin embargo, para el tipo de trabajo desarrollado se encontró que estas métricas no resultaban adecuadas, ya que su evaluación era más cercana a la percepción de una máquina, por lo que se podía tener una imagen que a vista del observador humano fuera mejor, pero en la evaluación de la métrica ésta indicara lo contrario.

Con lo planteado en el párrafo anterior se realizaron varias tablas comparando el método desarrollado con otras dos técnicas, encontrándose que esta propuesta produce mejores resultados en cada uno de los diferentes experimentos planteados durante la investigación.

7.2 Trabajo a futuro

Como trabajo a futuro se proponen los siguientes puntos:

- Caracterizar de manera completa el medio turbio, con factores como el índice de esparcimiento, con lo cual poder hacer una comparación entre diferentes medios turbios.
- Automatizar el proceso de la captura de las imágenes, esto pudiera realizarse con el empleo de motores a pasos.
- Encontrar una forma de medir la turbidez del medio en base al esparcimiento de la luz.

- Realizar un prototipo que integre la iluminación, la cámara y los elementos ópticos, de tal manera que pueda ser portable para la adquisición de las imágenes.

REFERENCIAS

- [1] Schechner, Y. Y., Narasimhan, S. G., & Nayar, S. K. (2003). Polarization-based vision through haze. *Applied Optics*, 42(3), 511-525.
- [2] Schechner, Y. Y., & Karpel, N. (2005). Recovery of underwater visibility and structure by polarization analysis. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 30(3), 570-587.
- [3] Liang, J., Ren, L., Qu, E., Hu, B., & Wang, Y. (2014). Method for enhancing visibility of hazy images based on polarimetric imaging. *Photonics Research*, 2(1), 38-44
- [4] Tuchin, V. V. (2007). Tissue optics: light scattering methods and instruments for medical diagnosis.
- [5] Tuchin, V. V. (2016). Polarized light interaction with tissues. *Journal of biomedical optics*, 21(7), 071114.
- [6] Liang, J., Ren, L., Qu, E., Hu, B., & Wang, Y. (2014). Method for enhancing visibility of hazy images based on polarimetric imaging. *Photonics Research*, 2(1), 38-44
- [7] Liang, J., Ren, L., Ju, H., Zhang, W., & Qu, E. (2015). Polarimetric dehazing method for dense haze removal based on distribution analysis of angle of polarization. *Optics Express*, 23(20), 26146-26157.
- [8] Xia, P., & Liu, X. (2016). Image dehazing technique based on polarimetric spectral analysis. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 127(18), 7350-7358.
- [9] Qu, Y., & Zou, Z. (2017). Non-sky polarization-based dehazing algorithm for non-specular objects using polarization difference and global scene feature. *Optics Express*, 25(21), 25004-25022.
- [10] Huang, B., Liu, T., Hu, H., Han, J., & Yu, M. (2016). Underwater image recovery considering polarization effects of objects. *Optics Express*, 24(9), 9826-9838.

REFERENCIAS

- [11] Hu, H., Zhao, L., Huang, B., Li, X., Wang, H., & Liu, T. (2017). Enhancing visibility of polarimetric underwater image by transmittance correction. *IEEE Photonics Journal*, 9(3), 1-10.
- [12] Hu, H., Zhao, L., Li, X., Wang, H., & Liu, T. (2018). Underwater Image Recovery Under the Nonuniform Optical Field Based on Polarimetric Imaging. *IEEE Photonics Journal*, 10(1), 1-9.
- [13] Hu, H., Zhao, L., Li, X., Wang, H., Yang, J., Li, K., & Liu, T. (2018). Polarimetric image recovery in turbid media employing circularly polarized light. *Optics Express*, 26(19), 25047-25059.
- [14] MacKintosh, F. C., Zhu, J. X., Pine, D. J., & Weitz, D. A. (1989). Polarization memory of multiply scattered light. *Physical Review B*, 40(13), 9342.
- [15] Li, X., Hu, H., Zhao, L., Wang, H., Yu, Y., Wu, L., & Liu, T. (2018). Polarimetric image recovery method combining histogram stretching for underwater imaging. *Scientific Reports*, 8(1), 12430.
- [16] Guan, J., Ren, W., & Cheng, Y. (2018). Stokes vector-based interpolation method to improve the efficiency of bio-inspired polarization-difference imaging in turbid media. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 51(14), 145402.
- [17] Liu, F., Han, P., Wei, Y., Yang, K., Huang, S., Li, X. & Shao, X. (2018). Deeply seeing through highly turbid water by active polarization imaging. *Optics Letters*, 43(20), 4903-4906.
- [18] Tian, Y., Liu, B., Su, X., Wang, L., & Li, K. (2019). Underwater Imaging Based on LF and Polarization. *IEEE Photonics Journal*, 11(1), 1-9.
- [19] Li, X., Hu, H., Zhao, L., Wang, H., Han, Q., Cheng, Z., & Liu, T. (2019). Pseudo-polarimetric Method for Dense Haze Removal. *IEEE Photonics Journal*, 11(1), 1-11.

REFERENCIAS

- [20] Liu, F., Wei, Y., Han, P., Yang, K., Bai, L., & Shao, X. (2019). Polarization-based exploration for clear underwater vision in natural illumination. *Optics express*, 27(3), 3629-3641.
- [21] Liu, T., Guan, Z., Li, X., Cheng, Z., Han, Y., Yang, J. & Hu, H. (2019). Polarimetric underwater image recovery for color image with crosstalk compensation. *Optics and Lasers in Engineering*, 124, 105833.
- [22] Hecht, E. (2016). *Optics*. Pearson Education.
- [23] Nogales, S. O., Núñez, J. L. F., & Gómez, J. A. M. Algoritmo Iterativo Eficiente para el Análisis de Interferogramas con Corrimiento de Fase Aleatorio. Tesis de Maestría. México. 2005.
- [24] Malacara, D. (2015). *Óptica básica*. Fondo de cultura económica.
- [25] Myre, E., & Shaw, R. (2006). The turbidity tube: simple and accurate measurement of turbidity in the field. Michigan Technological University. Artículo.
- [26] Instrumentación, P. (2018). Turbidímetro PCE-TUM 20L | PCE Instruments. [online] Pce-instruments.com. Available en: <https://www.pce-instruments.com/espanol/instrumento-medida/medidor/turbidimetro-pce->
- [27] Goldstein, D. H. (2016). *Polarized light*. CRC press.
- [28] Treibitz, T., & Schechner, Y. Y. (2008). Active polarization descattering. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 31(3), 385-399.
- [29] Cameron, R. P., Barnett, S. M., & Yao, A. M. (2014). Optical helicity of interfering waves. *Journal of Modern Optics*, 61(1), 25-31.
- [30] Ni, X., & Alfano, R. R. (2004). Time-resolved backscattering of circularly and linearly polarized light in a turbid medium. *Optics letters*, 29(23), 2773-2775.
- [31] Nothdurft, R., & Yao, G. (2006). Applying the polarization memory effect in polarization-gated subsurface imaging. *Optics express*, 14(11), 4656-4661.

REFERENCIAS

- [32] Amer, K. O., Elbouz, M., Alfalou, A., Brosseau, C., & Hajjami, J. (2019). Enhancing underwater optical imaging by using a low-pass polarization filter. *Optics express*, 27(2), 621-643.
- [33] Aghaian, S. S., Panetta, K., & Grigoryan, A. M. (2000, September). A new measure of image enhancement. In *IASTED International Conference on Signal Processing & Communication* (pp. 19-22).
- [34] Pelli, D. G., & Bex, P. (2013). Measuring contrast sensitivity. *Vision research*, 90, 10-14.
- [35] Aghaian, S. S., Panetta, K., & Grigoryan, A. M. (2001). Transform-based image enhancement algorithms with performance measure. *IEEE Transactions on Image Processing*, 10(3), 367-382.
- [36] Kumar, S. (2015). Measure of image enhancement by parameter controlled histogram distribution using color image. - *International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology*, (2), pp.268-272.
- [37] Antonio Aznar Casanova. Ub.edu. (2019). 3.2 El contraste. [online] Available at: <http://www.ub.edu/pa1/node/contraste> [Accessed 7 Oct. 2019].
- [38] Wiebel, C. B., Singh, M., & Maertens, M. (2016). Testing the role of Michelson contrast for the perception of surface lightness. *Journal of vision*, 16(11), 17-17.