



UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO

CAMPUS IRAPUATO - SALAMANCA

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS

*“Sensor de pH usando fibra óptica plástica  
a través de un Smartphone”*

**TESIS**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRO EN INGENIERÍA ELÉCTRICA**

Instrumentación y Sistemas Digitales

PRESENTA:

***Ing. Jahir Augusto Saavedra García***

DIRECTOR:

**Dr. Edgar Alvarado Méndez**

**Dra. Mónica Trejo Durán**

# Dedicatoria & Agradecimientos

Al culminar la escritura plasmada a mi memoria llegan acontecimientos como el día q' viajamos al extranjero en búsqueda de nuevos conocimientos.

Cuando Karen, Cristian, Karly y Moncho experiencias nos compartían en el aeropuerto novatos a la perspectiva antes de partir de la patria querida.

El Dr. Avina presentó los viajeros al aterrizar en el bus de recibimiento todos estábamos a la expectativa de conocer México y el nuevo aposento.

En el laboratorio siempre se siente la algarabía del intercambio cultural tal será la riqueza hispanohablante q' Narcisse del Congo aprendió hablar.

Addys, Luis, Yanelis y Chama en la primera fiesta de maestría su coreográfica salsa Cubana con gusto nos mostrarían.

Sin embargo nosotros los asistentes con una que otra cervecita y algún traguito de tequila sin estar de más a la pista salimos a improvisar.

A memoria de mi familia por su apoyo incondicional: Aura Esther, Marco A. Tatiana, Marco F. (q.e.p.d.), Diana, Michell, Sofía y Alejandro.

El cambio de semestre a cuatrimestre es algo que conlleva gran velocidad agradecido con Algemiro, Cristhiam, Freddy y Karen paciencia al explicar.

Y es que para los que no lo saben este Ing. de Sistemas Colombiano sin querer queriendo en México a maestría en eléctrica dio a parar.

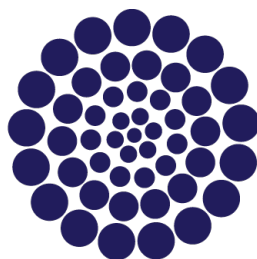
Con el Dr. Edgar, gran personaje proyecto de tesis empecé a trabajar y para relajarme al culminar el día con Gabby a biblioteca iba a platicar.

Q' no se olviden clases con la teacher, trasnochos, y uno q' otro consenso que nos permitió ir a Canadá y participar en un gran congreso.

Para no alargar mucho este cuento los dos años pasaron como el viento se trabajó y paseamos con Andrea y hasta Luis de Guatemala contento.

Disculpas a los que no haya nombrado pero esto de versear limita mucho el texto tengan en cuenta q' siempre estarán en una q' otra salida fuera de contexto.

*Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, CONACYT, por la beca otorgada con número de aprobación (CVU / Becario) 661714 / 572900.*



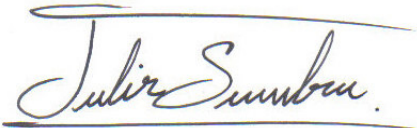
**CONACYT**

Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología

*A la División de Ingenierías del Campus Irapuato - Salamanca de la Universidad de Guanajuato, por brindarme los recursos necesarios para culminar este proyecto de tesis y parcialmente apoyado mediante el proyecto, "Universidad de Guanajuato - DAIP 2, 115 / 2016".*



*Cordialmente,*

  
Jahir Augusto Saavedra Garcia

# Contenido

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Estado del Arte</b>	<b>6</b>
<b>3. Marco Teórico</b>	<b>10</b>
3.1. Técnica Sol-Gel . . . . .	10
3.1.1. Introducción . . . . .	10
3.1.2. Antecedentes . . . . .	11
3.1.3. Conceptos y términos generales . . . . .	12
3.1.4. Etapas de la técnica Sol-Gel . . . . .	13
3.1.5. Aplicaciones técnica Sol-Gel . . . . .	14
3.1.6. Ventajas y desventajas de la técnica Sol-Gel . . . . .	15
3.2. Procesamiento Digital de Imágenes . . . . .	16
<b>4. Metodología e Implementación</b>	<b>19</b>
4.1. Arreglo Experimental . . . . .	19
4.2. Fuente de Bombeo . . . . .	20
4.3. Preparación de Optrodos . . . . .	21
4.3.1. Preparación de la Fibra Óptica Plástica . . . . .	22
4.3.2. Aplicación de la Técnica Sol-Gel . . . . .	22

4.4. Captado de Imágenes . . . . .	26
4.4.1. Conversión de Imagen en Color RGB a Escala de Gris . . . . .	27
<b>5. Resultados</b>	<b>31</b>
5.1. Resultados Optrodo en el Extremo Final de la Fibra . . . . .	34
5.2. Resultados Optrodo en la Mitad de la Fibra . . . . .	45
<b>6. Conclusiones</b>	<b>57</b>
6.1. Trabajos Futuros . . . . .	58
<b>Bibliografía</b>	<b>59</b>
<b>Apéndice A. Dependencia de pH Respecto a Intensidad de Píxeles en la Imagen a Color RGB y Analogía con Longitud de Onda en el Espectro de Luz Visible</b>	<b>70</b>
<b>Apéndice B. Póster Photonics North 2016</b>	<b>73</b>

# Lista de Figuras

2.1. Escala de pH . . . . .	8
2.2. pH-metros comerciales . . . . .	8
3.1. Etapas Procesamiento Digital de Imágenes . . . . .	16
4.1. Arreglo experimental propuesto . . . . .	20
4.2. Espectro Flash LED Smartphone . . . . .	21
4.3. Fibras que se tuvieron en cuenta para seleccionar el mejor optrodo . . . . .	22
4.4. Fibra en Ácido Nítrico . . . . .	22
4.5. Proceso de Gelificación . . . . .	24
4.6. Deposiciones Fallidas de Sol-Gel en la Fibra . . . . .	25
4.7. Deposición del Sol-Gel en la F.O.P. . . . .	25
4.8. Procesamiento de la Imagen Captada . . . . .	27
4.9. Conversión de Imagen en Color RGB a Escala de Gris . . . . .	28
4.10. Interfaz gráfica para la recolección de datos . . . . .	29
5.1. Esquema general para biosensado . . . . .	31
5.2. Optrodos . . . . .	32
5.3. Resultado 1000 Datos Sin pH Optrodo en el Final de la F.O.P. . . . .	35
5.4. Resultado Datos Totales Optrodo en el Final de la F.O.P. . . . .	36

5.5. Curva Característica “MatLab rgb2gray” Optrodo en el Final de la F.O.P. . . . . .	37
5.6. Curva Característica “Intensity” Optrodo en el Final de la F.O.P. . . . . .	38
5.7. Curva Característica “Gleam” Optrodo en el Final de la F.O.P. . . . . .	39
5.8. Curva Característica “Luma” Optrodo en el Final de la F.O.P. . . . . .	41
5.9. Curva Característica “Luminance” Optrodo en el Final de la F.O.P. . . . . .	42
5.10. Curva Característica “Value” Optrodo en el Final de la F.O.P. . . . . .	43
5.11. Curva Característica “Luster” Optrodo en el Final de la F.O.P. . . . . .	44
5.12. Resultado 1000 Datos Sin pH Optrodo en la Mitad de la F.O.P. . . . . .	46
5.13. Resultado Datos Totales Optrodo en la Mitad de la F.O.P. . . . . .	47
5.14. Curva Característica “MatLab rgb2gray” Optrodo en la Mitad de la F.O.P. . . . . .	48
5.15. Curva Característica “Intensity” Optrodo en la Mitad de la F.O.P. . . . . .	49
5.16. Curva Característica “Gleam” Optrodo en la Mitad de la F.O.P. . . . . .	50
5.17. Curva Característica “Luma” Optrodo en la Mitad de la F.O.P. . . . . .	51
5.18. Curva Característica “Luminance” Optrodo en la Mitad de la F.O.P. . . . . .	52
5.19. Curva Característica “Value” Optrodo en la Mitad de la F.O.P. . . . . .	53
5.20. Curva Característica “Luster” Optrodo en la Mitad de la F.O.P. . . . . .	55
6.1. Espectro Electromagnético y Formación de Color en RGB . . . . .	70
6.2. Perfiles de Imagen en Color RGB para pH 4.01, 7.00 y 10.00 . . . . .	72

# Lista de Tablas

4.1. Potencia de Salida Flash LED Smartphone en F.O.P. . . . . .	26
5.1. Buffer de pH . . . . .	33
5.2. Datos Estadísticos 1000 Muestras Sin pH Optrodo en el Final de la F.O.P. . . . .	35
5.3. Resultado Datos Estadísticos Fórmula “MatLab rgb2gray” Optrodo en el Final de la F.O.P. . . . .	37
5.4. Resultado Datos Estadísticos Fórmula “Intensity” Optrodo en el Final de la F.O.P. . . . .	38
5.5. Resultado Datos Estadísticos Fórmula “Gleam” Optrodo en el Final de la F.O.P. . . . .	39
5.6. Resultado Datos Estadísticos Fórmula “Luma” Optrodo en el Final de la F.O.P. . . . .	40
5.7. Resultado Datos Estadísticos Fórmula “Luminance” Optrodo en el Final de la F.O.P. . . . .	41
5.8. Resultado Datos Estadísticos Fórmula “Value” Optrodo en el Final de la F.O.P. . . . .	43
5.9. Resultado Datos Estadísticos Fórmula “Luster” Optrodo en el Final de la F.O.P. . . . .	44
5.10. Porcentaje Ajuste de Curva Optrodo en el Final de la F.O.P. . . . .	45
5.11. Datos Estadísticos 1000 Muestras Sin pH Optrodo en la Mitad de la F.O.P. . . . .	46
5.12. Resultado Datos Estadísticos Fórmula “MatLab rgb2gray” Optrodo en la Mitad de la F.O.P. . . . .	47
5.13. Resultado Datos Estadísticos Fórmula “Intensity” Optrodo en la Mitad de la F.O.P. . . . .	48



5.14. Resultado Datos Estadísticos Fórmula “Gleam” Optrodo en la Mitad de la F.O.P. . . . . .	50
5.15. Resultado Datos Estadísticos Fórmula “Luma” Optrodo en la Mitad de la F.O.P. . . . . .	51
5.16. Resultado Datos Estadísticos Fórmula “Luminance” Optrodo en la Mitad de la F.O.P. . . . . .	52
5.17. Resultado Datos Estadísticos Fórmula “Value” Optrodo en la Mitad de la F.O.P. . . . . .	53
5.18. Resultado Datos Estadísticos Fórmula “Luster” Optrodo en la Mitad de la F.O.P. . . . . .	54
5.19. Porcentaje Ajuste de Curva Optrodo en la Mitad de la F.O.P. . . . . .	55

# Capítulo 1

## Introducción

En el último siglo, el sensado de pH se ha convertido en una necesidad importante para la ciencia. En 1909 aparece por primera vez el concepto de pH, propuesto por Sören Peter Lauritz Sørensen (1868 - 1939) en consecuencia a la necesidad de tener una medida clara y precisa de la acidez o alcalinidad de una sustancia [1], a partir de ese momento se consolidó el concepto como el logaritmo negativo de la concentración del ion de hidrógeno ( $\text{pH} = -\log [\text{H}^+]$ ), perpetuando en nuestros días en la medición y control de pH en fluidos, alimentos, agroindustria, medicina, cosméticos, químicos, áreas ambientales, entre otros.

Para medir el pH utilizamos sensores como dispositivos que reciben y responden a una señal o estímulo, obteniendo como resultado valores medibles. Entre la clasificación de los sensores se encuentran los biosensores, dispositivos de medida que se basan en materiales biológicos para obtener una respuesta específica a sustancias determinadas. La composición de un biosensor consta básicamente de un biocatalizador y un transductor, donde el biocatalizador reacciona con las sustancias analizadas, generando una señal recibida por el transductor. Dependiendo de las características del transductor, podemos encontrar biosensores potenciométricos, amperométricos, piezo-eléctricos, inmunosensores, calorimétricos, nanomecánicos y ópticos [2, 3].

En los biosensores ópticos (también conocidos como optodos u optrodos), la luz es un factor esencial donde es posible evaluar la absorbancia, la reflectancia, la fluorescencia, la polarización, la dispersión, el cambio de fase, el índice de refracción o los cambios de intensidad, permitiendo tener características como alta sensibilidad, tiempo de respuesta, portabilidad, manejo sencillo, multi-análisis, inmunidad a interferencia electromagnética y bajo costo. Comúnmente para este tipo de sensores se utiliza fibra óptica, donde se encuentra inmovilizado el material biológico que actúa como elemento de reconocimiento y detección.

Para este trabajo de tesis proponemos un sistema de detección de pH usando fibra óptica plástica, para ello, se preparan optrodos con indicadores adecuados para medir el pH utilizando la técnica Sol-Gel. Adicionalmente, utilizaremos el flash led y la cámara de un smartphone, el flash led como fuente de bombeo del haz de luz y la cámara, como receptor de la señal para finalmente analizar la media en escala de gris de la imagen captada.

# Objetivos

## Objetivo General

Analizar la implementación de un sensor de pH utilizando fibra óptica plástica a través de un Smartphone, preparando optrodos para la detección de pH haciendo uso de la técnica Sol-Gel.

## Objetivos Específicos

- Preparar optrodos para la detección de pH haciendo uso de la técnica Sol-Gel.
- Captar en una imagen la señal obtenida del haz de luz transmitido por la fibra óptica plástica, utilizando la cámara del smartphone.
- Analizar las imágenes captadas mediante el software MatLab.
- Analizar los resultados obtenidos.

# Justificación

Los sensores ópticos ofrecen muchas ventajas respecto a los ya establecidos. Por ejemplo, inmunidad a interferencia electromagnética, alta precisión debido a la resolución que se resuelve del orden de longitud de onda expresada en nanómetros (nm), accesibilidad a ambientes peligrosos, así como bajos costos.

Para determinar el diseño de un sensor, debemos comprender las propiedades físicas de la luz. Los sensores ópticos se basan en la interacción radiación-materia, algunas propiedades para diseñar un sensor bajo estas variables son: absorción, intensidad, índice de refracción, fluorescencia, transmitancia, etc. En particular, el desarrollo de sensores biológicos o también llamados biosensores ha cobrado mucho auge debido a la importancia de medición in situ de parámetros como pH, glucosa, oxígeno, proteínas, entre otros.

Algunos investigadores del Cuerpo Académico de Optoelectrónica han estado trabajando en el área de sensado de pH con fibra desde hace más de 10 años [4], obteniendo con ello amplia experiencia en esta área. Teniendo en cuenta esa experiencia, es que ahora, se propone un sistema de medición de pH basado en fibra pero con 4 diferencias primordiales y novedosas comparado con otros sensores de pH con fibra ya desarrollados:

- 1) El optrodo consistirá en la deposición de películas delgadas de Sol-Gel con los indicadores de pH inmersos en la parte lateral cubriendo la fibra, a diferencia de otros donde la deposición del Sol-Gel se realiza en la cara frontal de los extremos de la fibra.
- 2) El rango de medición en este nuevo sensor será más amplio debido a que va de 3 a 10 unidades de pH.
- 3) La medición del pH estará basado en las variaciones del promedio de intensidad de píxeles de una imagen en escala de gris como resultado del procesamiento de la señal.
- 4) Se utilizará un smartphone donde estará integrada la fuente de bombeo (flash led) y el receptor de la señal (cámara), el cual permitirá obtener los datos de estas variaciones para el análisis de resultados.

# Antecedentes

El trabajo realizado por Alvarado Méndez et al. [4] involucra el diseño y caracterización de un sensor de pH, basado en un colorante sensible al pH depositado sobre la punta o extremo de una fibra óptica plástica. El sensor se prepara mediante la fijación de la fibra óptica sobre una superficie de bloque fundido de ortosilicato con azul de bromofenol, dicho proceso se denomina sol-gel de sílice. La carga superficial de sílice y el índice de refracción, juegan un rol importante en la fibra, modifica las condiciones de propagación de la luz en la fibra óptica, utilizando la transmitancia para medir el pH de una solución o líquido en un rango entre cinco (5) y siete (7). La ventaja de este sensor es que en sólo dos centímetros (2 cm) de fibra dopada es suficiente para medir el pH de un fluido en tiempo aproximado de diez segundos (10 s).

El sensor de pH de fibra óptica se basa en detectar cambios en las propiedades ópticas y espectroscópicas tales como la absorbancia, reflectancia, transmitancia, fluorescencia, transferencia de energía, etc. Su principal ventaja sobre otros tipos de sensores, como la electrónica, es la inmunidad a la interferencia electromagnética, tamaño pequeño, a prueba de explosión, la teledetección, posibilidad de multiplexación, entre otros.

Continuando con el trabajo previo, se amplía el rango de medición de unidades de pH, así como la inclusión de un smartpone, utilizando el flash led como fuente de bombeo del haz de luz y la cámara como receptor de la señal.

# Capítulo 2

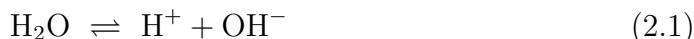
## Estado del Arte

El presente trabajo inicia con una revisión bibliográfica en los campos o áreas donde se utiliza la medición de pH, encontrándose que desde el punto de vista práctico, es de gran interés la medición y el control de pH en fluidos, alimentos, agroindustria, medicina, bacteriología, organismos, cosméticos, químicos, áreas ambientales, entre otros. Estos campos de aplicación dan importancia para investigar en el diseño e implementación de sensores económicos, precisos y con tiempo de respuesta corta para obtener resultados in situ [4–88].

Almécica y Muñoz [1], en su proyecto de maestría que lleva por título “*pH, historia de un concepto. Análisis en textos de educación superior*”, afirman que el concepto de pH parte de los conceptos de ácido y base que se utilizaron como referencia para su consolidación teórica. Así, en 1810 Humphry Davy demostró y definió que todos los ácidos contenían hidrógeno. Posteriormente, en 1814 Joseph-Louis Gay-Lussac afirmó que los ácidos y las bases no debían definirse por separado sino uno en función del otro, hipótesis completada por Justus Liebig, al confirmar que los ácidos son compuestos hidrogenados; sin embargo, fue hasta 1909 cuando el profesor danés Sören Peter Lauritz Sørensen propuso el concepto de pH en consecuencia a la necesidad de tener una medida clara y precisa de la acidez, cuya investigación se centraba en la incidencia de la acidez en el funcionamiento de las encimas en la fermentación de la cerveza, debido a que los ácidos contienen mayor concentración de iones de hidrógeno ( $H^+$ ) y menor concentración de iones hidroxilo ( $OH^-$ ), y a su vez, el ácido puede disminuir su acidez pasando a ser una base al disminuir la concentración de iones  $H^+$  y aumentar la concentración de iones  $OH^-$ , o viceversa, una base puede disminuir su alcalinidad pasando de ser un ácido al aumentar la concentración de iones  $H^+$  y disminuir la concentración de iones  $OH^-$ , en consecuencia a reacciones químicas.

“Como en esta época (1909) ya se conocía que la medida de la constante de disociación del agua era de  $1 \times 10^{-14}$  a 25 °C, e igualmente que el agua se componía

de iones  $H^+$  y  $OH^-$ , Sørensen deduce que el cálculo de la concentración de iones hidrógeno e iones hidroxilo en soluciones acuosas puede ser establecido, en el primer caso el valor de la concentración de iones hidrógeno por el ion de hidrógeno en la forma de potencia negativa de 10, nombrándolo como  $P_H$  ‘hydrogen ion exponent’ y de iones hidroxilo si se conocían los de hidrógeno:”



$$1 \times 10^{-14} = 1 \times 10^{-7} \times 1 \times 10^{-7} \quad (2.2)$$

“En agosto de 1919, el científico danés Kaj Ulrik Linderstrom-Lang se convirtió en ayudante del profesor Sørensen en la sección de Química del Laboratorio Carlsberg, y juntos en 1924, proponen una nueva definición de pH como el logaritmo negativo de la actividad del ion Hidrógeno:”

$$pH = -\log aH = -\log (m_H g_H / m^\circ) \quad (2.3)$$

“donde,  $a$  es la actividad relativa,  $m$  es la molalidad,  $g$  el coeficiente de actividad molal, y  $m^\circ$  es la molalidad estándar que equivale a  $1 \text{ mol kg}^{-1}$ .”

“Posteriormente, para mayor facilidad se simplificó como:”

$$pH = -\log [H^+] \quad (2.4)$$

“donde,  $[H^+]$  es la concentración del ion de hidrógeno.”

En 1877 [1], el alemán Wilhelm Pfeffer produce la primera membrana semipermeable, con la cual, la proporcionalidad entre la presión osmótica y la concentración de la solución, permitió más adelante el desarrollo de los electrodos para medir potenciométricamente el pH. La primera forma de medir el pH fue utilizando membranas de vidrio que proporcionan una diferencia de potencial que depende de la concentración de los iones hidrógeno en las disoluciones puestas en contacto con cada una de las membranas. Sin embargo, fue hasta 1930 cuando McInnes y Dole [89] obtuvieron el primer material de vidrio adecuado que pudo utilizarse para determinar el pH. Posteriormente, se desarrollaron electrodos de vidrio microcapilares para las medidas de pH sanguíneo en un sistema de temperatura controlada.

En consecuencia, la escala de pH se define de 0 (cero) a 14 unidades, especificándose los rangos entre 0 y menor que 7 unidades como ácido, 7 como neutro, y mayor que 7 a 14 unidades como alcalino o base, como se muestra en la Figura 2.1.



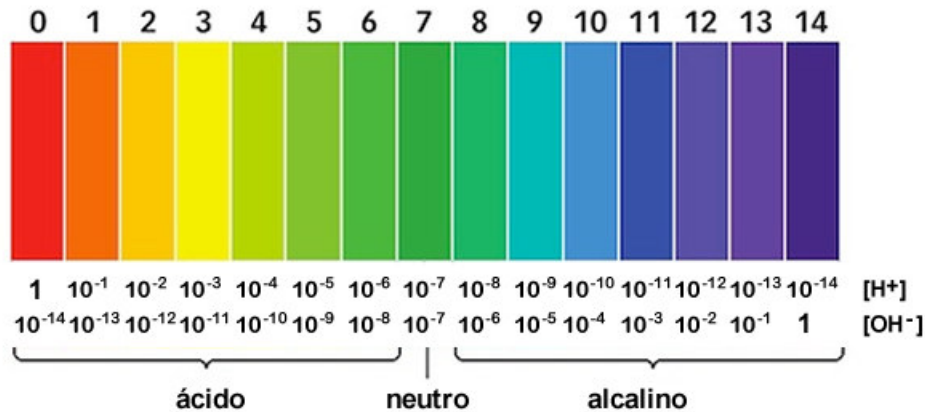
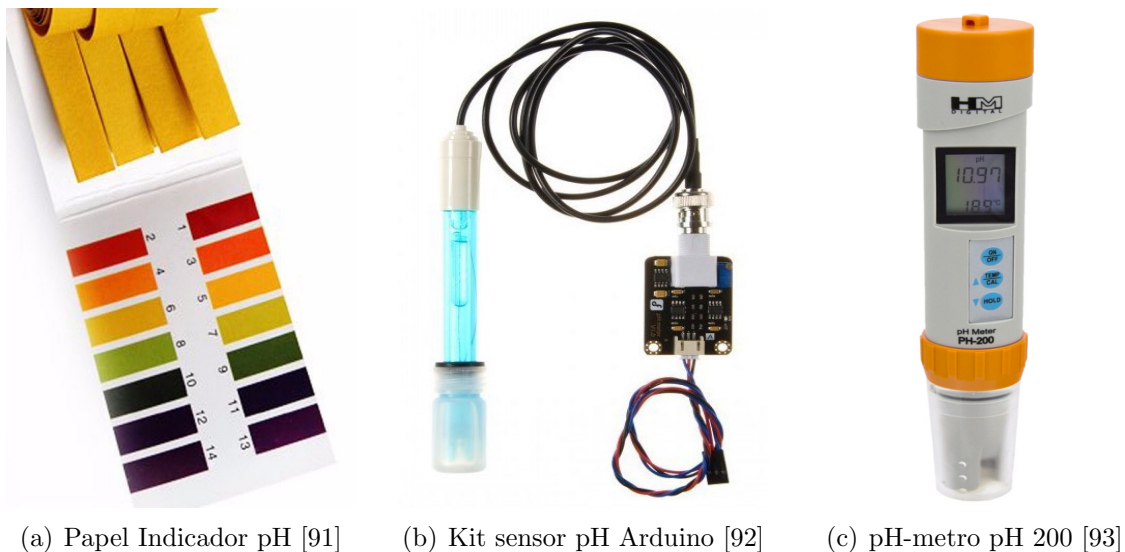


Figura 2.1: Escala de pH [90]

Entre los pH-metros comerciales podemos encontrar desde el más básico como son las tiras de papel, las cuales reaccionan mostrando un color específico a cada unidad de pH; pasando por el kit sensor de pH para programar y utilizar con Arduino; hasta los pH-metros digitales de diferentes marcas que integran compensación de temperatura como el pH-metro pH 200 ofrecido por HM Digital. Algunos de los pH-metros mencionados se muestran en la Figura 2.2.



(a) Papel Indicador pH [91]

(b) Kit sensor pH Arduino [92]

(c) pH-metro pH 200 [93]

Figura 2.2: pH-metros comerciales

Dutta et al. [94] en su trabajo “Dye-Assisted pH Sensing Using a Smartphone”, diseñan un sensor de pH utilizando un teléfono inteligente (smartphone), dicho sensor mide en un rango entre 6 y 8 niveles de pH, funcionando como un mini espectrómetro. El sensor consta de una fibra óptica con diámetro de 50 micras, utilizada para propagar una señal de

luz de una fuente óptica de banda ancha (modelo LS-1, Ocean Optics 350 – 1050 nm). La señal de luz que sale de la fibra óptica es colimado por una lente plano-convexa de longitud focal de 73 mm. El haz de luz colimado luego cae en la cara de la hipotenusa de un prisma de vidrio en ángulo derecho y se somete a la reflexión interna total. Este haz de luz reflejada internamente se centra en un haz de línea por una lente cilíndrica de longitud focal de 50 mm, posteriormente se encuentra una rejilla de transmisión de 1200 líneas/mm, colocada en el plano focal de la lente cilíndrica que dispersa el haz en sus componentes constituyentes. La rejilla está unida a la cámara del teléfono inteligente. El espectro disperso se puede ver en la unidad de visualización del teléfono inteligente.

Bremer y Roth [95], presentan un sistema de sensores de fibra óptica de resonancia de plasmón superficial (SPR por sus siglas en inglés) para teléfonos inteligentes (smartphone), utilizados para medir la concentración de los líquidos. El sensor se fabricó mediante el uso de una técnica de recubrimiento de plata en una fibra óptica de cuatrocientos micrómetros (400  $\mu\text{m}$ ). Para la excitación y recepción del sistema sensor SPR se empleó la luz del flash y la cámara de la parte trasera del teléfono inteligente, respectivamente.

Una ventaja de este dispositivo es que no se requiere componentes eléctricos externos para la operación del sistema sensor desarrollado, por otra parte tienen las ventajas de ser de tamaño miniatura, de permitir el acoplamiento sencillo y alineación óptica. Además, el sensor de SPR se implementó mediante el recubrimiento de aproximadamente diez milímetros (10 mm) del núcleo de fibra óptica con una capa de plata fina y una rejilla de difracción, aplicada con el fin de dispersar la luz en un espectro de línea, que permite el seguimiento del cambio de longitud de onda de la SPR debido a un cambio del índice de refracción (RI por sus siglas en inglés) circundante.

La rejilla de difracción del sistema sensor se basa en una difracción holográfica reflectante, en cuyo caso es una rejilla de 1200 líneas/mm. Para cada medición se capta un video mp4 (480 x 640 píxeles) y posteriormente procesados mediante el uso de MatLab. El procesamiento de la señal incluye la segmentación del video en varias imágenes que luego se convierten en escala de grises y normalizado utilizando las funciones estándar de MatLab. La rejilla de transmisión dispersa la luz del sensor en un espectro de líneas, las imágenes en escala de grises resultantes pueden ser interpretados como espectro sensor.

Para el diseño e implementación de este proyecto se consideró el trabajo realizado por Bremer y Roth, en combinación con la experiencia en trabajos previos realizados por investigadores del Cuerpo Académico de Optoelectrónica utilizando la técnica Sol-Gel en biosensores ópticos [4, 96–103].

# Capítulo 3

## Marco Teórico

En este capítulo se hará una breve presentación de dos de los elementos principales de esta tesis: la técnica Sol-Gel y el Procesamiento Digital de Imágenes, iniciando en la sección 3.1, con algunos conceptos que ayudarán a entender el proceso de la técnica Sol-Gel, la sección 3.1.1 con una breve introducción. La sección 3.1.2 contiene algunos antecedentes. En la sección 3.1.3 se mencionan las etapas del proceso Sol-Gel. En la sección 3.1.4 se presentan algunas aplicaciones. La sección 3.1.5, presenta las ventajas y desventajas que conlleva la aplicación de esta técnica. Finalmente, la sección 3.2 presenta los principios y las etapas básicas del Procesamiento Digital de Imágenes (PDI).

### 3.1. Técnica Sol-Gel

#### 3.1.1. Introducción

La técnica Sol-Gel ha sido usada en los últimos años para preparar un amplio rango de materiales. Este método es atractivo debido a que involucra procesos a baja temperatura, además de la alta pureza y homogeneidad a su preparación en sistemas multicomponentes [96–103]. La técnica Sol-Gel ha sido explotada para elaborar nuevas composiciones de cristales, nuevos sistemas cerámicos y compuestos de útiles propiedades.

Avances recientes en la tecnología de cerámicas han hecho posible moldear el sílice y otros óxidos metálicos a temperatura ambiente, mediante la técnica Sol-Gel, y además, se ha demostrado la posibilidad de atrapar compuestos orgánicos en matrices inorgánicas al introducir el compuesto deseado con los precursores del Sol-Gel [104]. Esta técnica se ha extendido también a compuestos biológicos. La técnica Sol-Gel permite la síntesis de cerámicas homogéneas tanto de grano fino como de grado grueso y ofrece control de pureza

química y cristalina [105].

Dicho proceso, también permite, a partir del gel, la preparación de productos en diversas formas físicas tales como: polvos ultrafinos, monodispersos y muy reactivos, piezas monolíticas de formas definidas (ópticamente limpias), recubrimientos y fibras.

El material final es más homogéneo con respecto a especies químicas obtenidas por procesos en los cuales, difusión en estado sólido o fase fundida, es necesario para la formación del compuesto, además de ser más versátil que los demás métodos no convencionales en el procesamiento de cerámicas avanzadas.

### 3.1.2. Antecedentes

El proceso Sol-Gel se descubrió a finales del siglo XIX, aunque no se estudió de manera intensa hasta los años 30's. Posteriormente se perdió interés de la técnica y no fue hasta principios de los años 70's cuando se sintetizaron geles de sales inorgánicas que fueron transformados en vidrios sin necesidad de altas temperaturas ni fusión. Con ello se conseguía un óxido inorgánico con las propiedades deseadas de dureza, transparencia óptica, estabilidad química, porosidad y una buena resistencia térmica a baja temperatura.

Posteriormente, el método Sol-Gel permitió desarrollar rápidamente la fabricación de películas, fibras y polvos con un tamaño de partícula nanométrico. También permitió el desarrollo de muchas aplicaciones específicas, entre las cuales se incluyen las ópticas, protección y películas porosas, capas, aislantes de ventanas, dieléctricos, películas de interés electrónico, superconductores, fibras de refuerzo y catalizadores.

Se considera a Badini [106] como el pionero en proponer la aplicación de la técnica Sol-Gel en la obtención de sensores químicos (1991), constituyendo el principio de un sensor de pH. Gracias a esto se observó la ruptura producida por los geles, que más tarde permitiría a MacCraith [107], en 1998, perfeccionar el procedimiento.

MacCraith utilizó una fibra óptica, a la cual le retiró la protección y le adhirió una capa delgada de sílice con fluoresceína, que es una sustancia colorante amarilla que produce un color fluorescente verde intenso, en soluciones alcalinas ( $\text{pH} > 7$ ). Fue cuando Ding [106], propuso un sensor de fibra óptica donde el núcleo se encontraba dopado con una película delgada de gel de sílice que contenía bromofenol azul. A partir de entonces la técnica Sol-Gel es ampliamente utilizada en la fabricación de sensores químicos y biosensores.

### 3.1.3. Conceptos y términos generales

La técnica Sol-Gel permite obtener un compuesto sólido a partir de una solución líquida. Recibe este nombre debido a que durante el proceso se lleva el cambio de un sol a un gel mediante la condensación. Esta técnica ha sido enfocada hacia la obtención de óxidos.

La técnica Sol-Gel, es un método donde uno o varios elementos son utilizados en la forma de sol y/o gel, con el fin de obtener un sólido homogéneo, principalmente de policristalino a amorfo. En una dispersión coloidal, se llama fase dispersa o dispersoide a la sustancia disuelta que se encuentra en menos proporción, y medio de dispersión al medio en que se hallan dispersas las partículas. Las suspensiones coloidales más importantes tienen un líquido como medio de dispersión aunque también puede servir como tal un gas o un sólido, con fase dispersa sólida, líquida o gaseosa.

La dispersión coloidal recibe el nombre genérico de sol. Cuando el medio líquido es el agua, el sistema se denomina hidrosol y si es un alcohol, entonces se denomina alcosol. Las soluciones coloidales o soles, contienen ya sea grandes (macromoléculas), agregados moleculares o pequeñas partículas, que ocupan una pequeña posición intermedia entre soluciones de especies de bajo peso molecular, y dispersiones.

Se consideran partículas coloidales aquellas que tienen al menos una dimensión en el rango de 1 nm - 1  $\mu\text{m}$  [108]. La química coloidal forma un vínculo continuo entre la química molecular y el estado sólido. Algunos soles pierden gradualmente algo de su líquido por evaporación y forman masas gelatinosas que se llaman gel. Los hidrosoles dan lugar a hidrogel, mientras que los alcosoles dan lugar a alcogel.

Un gel es una forma de materia entre líquido y sólido. Un gel polimérico es una red macromolecular infinita que está hinchada por solvente, el cual puede ser creado cuando la concentración de la especie dispersa aumenta. Una transición Sol-Gel se observa cuando la viscosidad se incrementa notoriamente sobre lo normal. El solvente es atrapado en la red de partículas, así, la red polimérica impide que el líquido se separe, mientras el líquido previene que el sólido colapse en una masa compacta.

### 3.1.4. Etapas de la técnica Sol-Gel

La técnica Sol-Gel se puede definir como una ruta química para preparar una gran variedad de materiales inorgánicos a través de una amplia gama de procedimientos. Este proceso está basado en la formación de redes inorgánicas empezando con soluciones de precursores moleculares, el sol, tendiendo por la gelificación a formar una red sólida continua en una fase líquida continua, el gel.

A continuación se describen los pasos a seguir, para el proceso de la preparación de la técnica Sol-Gel [109]:

- 1) Preparación del sol: Existen dos formas básicas, los sistemas acuosos y los sistemas orgánicos.
  - a) En los sistemas acuosos se utilizan como precursores óxidos coloidales, hidróxidos y sales tanto orgánicos (acetatos), como inorgánicos (nitratos), estos compuestos se dispersan o se disuelven en agua.
  - b) En los sistemas orgánicos se obtienen a partir de compuestos metalorgánicos (principalmente alcóxidos) disueltos en un solvente orgánico, que generalmente es un alcohol.
- 2) Hidrólisis [110]: Se lleva a cabo la descomposición de sustancias orgánicas e inorgánicas complejas en otras más sencillas por acción de agua.
- 3) Gelificación: Las reacciones de hidrólisis y condensación del proceso anterior, conducen a la formación de agregados (grupos), que se enlazan hasta formar un único conjunto gigante denominado gel [111]. En el momento de formación del gel hay muchos grupos en el sol que se unen entre sí para formar una red sólida, responsable de la elasticidad, y ocurre un cambio abrupto de la viscosidad [104].
- 4) Envejecimiento: Luego de la gelificación el sistema continúa reaccionando, produciendo cambios químicos y estructurales, mediante acoplamientos covalentes y evolución estructural con cambios en el tamaño de los poros y las fuerzas de las paredes de dichos poros [111].
- 5) Polimerización: Proceso químico por el cual mediante el calor, la luz o un catalizador, donde se unen varias moléculas de un compuesto para formar una cadena de múltiples eslabones de estas y obtener una macromolécula. Durante este proceso, aumenta la interconexión del esqueleto sólido, en consecuencia aumenta la densidad y la resistencia mecánica del sólido [104].
- 6) Síntesis: Es la concentración del esqueleto sólido del gel, acompañada de la expulsión de la fase líquida contenida en los poros.
- 7) Crecimiento: Este proceso se debe a la disolución y precipitación producida por la diferencia de solubilidad entre las partículas.

- 8) Secado y tratamiento térmico: El secado en la fase líquida, constituye la mayor parte (70–90 %) del volumen del gel húmedo y cuando ésta se evapora se observa una contracción acompañada de endurecimiento del gel, esto se traduce en la evaporación del agua, alcohol y otros componentes líquidos volátiles [104, 111].

### 3.1.5. Aplicaciones técnica Sol-Gel

A través de la técnica Sol-Gel es posible obtener cerámicas de óxidos mixtos en la forma de polvos muy finos, piezas monolíticas de formas definidas, fibras y recubrimientos (películas delgadas). En cada caso existen condiciones de procesamiento específicas [112, 113].

Al preparar polvos ultrafinos, monodispersos y reactivos es necesario una rápida hidrólisis con gran exceso de agua (20 – 500 ml de agua por mol de alcóxido) en el caso de una hidrólisis policondensación y en el caso de usar un sol (dispersión coloidal), este debe ser de alta concentración para poder inducir la precipitación de polvos. Al introducir las partículas en la forma de suspensión coloidal, la gelificación proveniente de estas partículas está fuertemente determinada por el pH. El secado se lleva a cabo a bajas temperaturas (menor a 90 °C). Por este procedimiento se logran polvos puros y finos, pero en la práctica éstos no son utilizados como tal, teniendo que proceder a una compactación posterior, lo que puede introducir impurezas.

Para obtener piezas monolíticas de forma definida es necesario una lenta polimerización, la cual es controlada por la etapa de hidrólisis; por lo tanto, es requerida una lenta hidrólisis. Sin embargo, también es posible realizar la polimerización en contacto con la humedad atmosférica, con el inconveniente de ser un proceso mucho más lento que el efectuar la hidrólisis mediante adición controlada de agua. Otros factores son requeridos tales como una baja razón agua/alcóxido, alta temperatura de hidrólisis (temperatura de ebullición del solvente), el uso de contenedores (en los cuales se vierte el gel para obtener una forma deseada) de material hidrofóbico (no permite que la superficie se moje) y un lento secado y calentamiento posterior.

Las películas y fibras son preparadas bajo las mismas condiciones que las piezas monolíticas, es decir, lenta hidrólisis y baja razón agua/alcóxido. A diferencia de polvos y piezas, las películas y fibras pueden ser preparadas directamente del estado viscoso de la solución. En el caso de las fibras es necesaria una alta viscosidad, para poder formar las fibras extrayendo filamentos del gel y en el caso de películas la viscosidad (concentración final) depende del producto deseado, es decir, si se desea una película gruesa o de bajo espesor.

### 3.1.6. Ventajas y desventajas de la técnica Sol-Gel

#### Ventajas

- Bajo costo.
- Baja temperatura de proceso.
- Control de heterogeneidad.
- Control de impurezas.
- Control de cristalinidad.
- Preparación de cerámicas de grano fino o grueso.
- Obtención de especies ópticamente limpias.
- Elevado rendimiento.
- Simplicidad de proceso.
- Mínima infraestructura necesaria.
- Gran versatilidad.
- Mínima generación de residuos.
- Manufactura de piezas de formas especiales sin la utilización de maquinaria.

#### Desventajas

- Drástico encogimiento en el secado, con consecuencias de aparición de microfisuras.
- Largo tiempo de duración de la etapa de hidrólisis (piezas monolíticas, fibras y películas).
- Difícil secado de estructuras poligonales u complejas.
- En algunos casos la existencia de reactivos e intermediarios volátiles.
- Gran cantidad de solvente utilizado.
- Desprendimiento de agua formada en la policondensación.



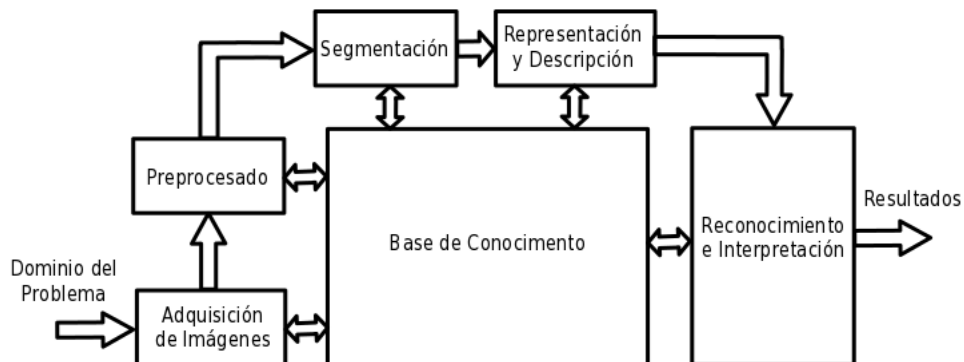
- Difícil control de la porosidad.
- Vinculación débil.
- Alta permeabilidad.

## 3.2. Procesamiento Digital de Imágenes

Los métodos de tratamiento digital de imágenes derivan de dos áreas principales de aplicación, la mejora de la información de la imagen y el procesamiento de los datos de la captura para la percepción autónoma por una máquina. Desde la década de los ochenta se incrementó su desarrollo con la construcción de equipos de mayor capacidad de cómputo y con la implementación de modelos matemáticos que permiten extraer las características de la imagen [114].

Una imagen digital se define como una función bidimensional  $f(x, y)$ , donde  $x$  y  $y$  son coordenadas espaciales (planas), y la amplitud de  $f$  en cualquier par de coordenadas  $(x, y)$  es llamada la intensidad de la imagen en ese punto. Cuando  $x, y$  y la intensidad de valores de  $f$  son todas cantidades discretas y finitas, la imagen se denomina imagen digital. Por lo anterior, la imagen digital se compone de un número finito de elementos, cada uno de los cuales tiene una localización y valor particular, a estos elementos se les denomina píxeles [115].

Como lo muestra la Figura 3.1, el procesamiento digital de imágenes comprende las siguientes etapas: Adquisición de imágenes, preprocesado, segmentación, representación y descripción, reconocimiento e interpretación y base de conocimiento [116].



**Figura 3.1:** Etapas Procesamiento Digital de Imágenes [116]

Una vez, obtenida la imagen digital, la siguiente etapa es el preprocesamiento de esa imagen. La función básica del preprocesamiento es la de mejorar la imagen de forma que se aumenten las posibilidades de éxito en los procesos posteriores.

La siguiente etapa es la segmentación, que consiste en dividir la imagen de entrada en partes constituyentes u objetos. En general el objetivo fundamental de la segmentación es el de extraer características representativas que permitan separar el objeto del fondo. A la salida del proceso de segmentación generalmente se obtienen los datos de los píxeles en forma binaria (1 ó 0), que constituyen el contorno de una región o todos los puntos de una región determinada. En cada caso es necesario convertir los datos a una forma adecuada para el procesamiento.

La representación es una parte de la solución para transformar los datos de píxel a una forma adecuada para ser posteriormente tratados. También se debe especificar un método para describir los datos de tal manera que se resalten los rasgos de interés. La descripción, también denominada selección de rasgos, consiste en extraer alguna información cuantitativa de interés o que sean fundamentales para diferenciar una clase de objetos de otra.

La última etapa concluye en el reconocimiento e interpretación. El reconocimiento es el proceso de asignar una etiqueta a un objeto basándose en la información proporcionada por los descriptores. La interpretación implica asignar significado a un conjunto de entidades etiquetadas.

La base del conocimiento representa la interacción entre el dominio del problema y la interacción con los módulos del procesamiento digital de imágenes. Este conocimiento puede ser tan simple como detallar las regiones de una imagen donde se sabe que se ubica información de interés, limitando así la búsqueda que ha de realizarse para hallar tal información; o tan compleja, como una lista interrelacionada de todos los posibles defectos en un problema de inspección.

Otra forma de presentarlo es como lo expresa Cuevas, Zaldívar y Pérez [117] en su libro *“Procesamiento Digital de Imágenes con MatLab y Simulink”*, el objetivo del Procesamiento Digital de Imágenes (PDI) es interpretar alguna característica notable en la imagen. Es por ello que el PDI se divide en subsistemas, que son procesamiento de bajo nivel, procesamiento de nivel medio y procesamiento de alto nivel.

En el procesamiento de bajo nivel, se encuentran procesos que se realizan sobre imágenes correspondientes de suavizado, umbralización, eliminación de ruido, definición de borde, etc. Esta etapa suele conocerse también como preprocesado. En el de nivel medio, se

definen procesos tales como definición de límites y extracción de características. En el nivel alto, se establecen relaciones semánticas entre los objetos de la descripción de la escena o clasificación.

Hemos revisado los principios básicos de la técnica Sol-Gel y del procesamiento digital de imágenes los cuales son aplicados para este análisis de medición de pH y cuya aplicación es presentada en el siguiente capítulo.

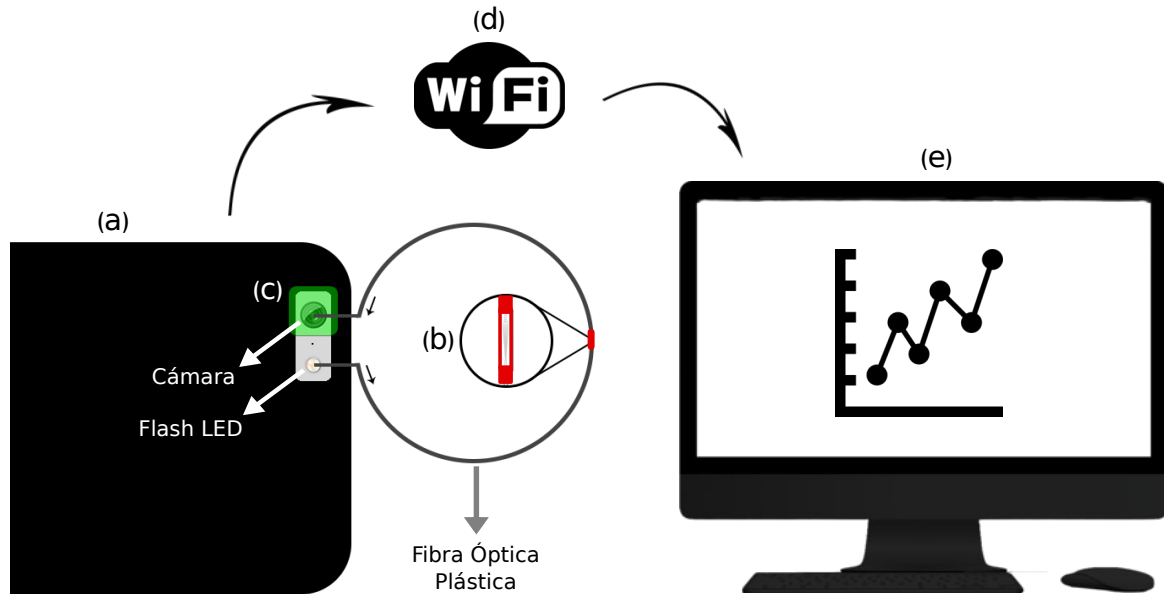
# Capítulo 4

## Metodología e Implementación

Este capítulo inicia con la sección 4.1, donde se presenta el arreglo experimental propuesto. La sección 4.2 muestra una comparativa de posibles fuentes de luz blanca de bombeo y la selección del smartphone cuyo flash led será utilizado como fuente de bombeo y la cámara como receptor de la señal. La sección 4.3 describe la preparación de los optrodos y la fibra óptica seleccionada para ser utilizada en la implementación del optrodo. La sección 4.4 describe la captación de la imagen así como el procesamiento que se realizó a la misma, incluyendo las fórmulas utilizadas para convertir una imagen en color RGB a escala de gris, para finalizar con la descripción de la interfaz gráfica desarrollada en MatLab para la recepción, procesamiento y recolección de datos de las imágenes transmitidas desde el smartphone.

### 4.1. Arreglo Experimental

La Figura 4.1 representa el arreglo experimental propuesto, donde el flash led del smartphone es la fuente de bombeo, cuyo haz de luz viaja a través del optrodo (fibra óptica plástica dopada con los indicadores de pH previamente seleccionados, e impregnada en la fibra utilizando la técnica Sol-Gel), para culminar en una rejilla de difracción por reflexión de 1200 líneas/mm (representada en color verde en el arreglo experimental) [118], señal que es captada como imagen por la cámara del smartphone para ser transmitida a través de streaming por Wi-Fi hacia el procesador (computador), con la finalidad de ser analizada con el software MatLab y obtener un valor numérico medio de la imagen en escala de gris.

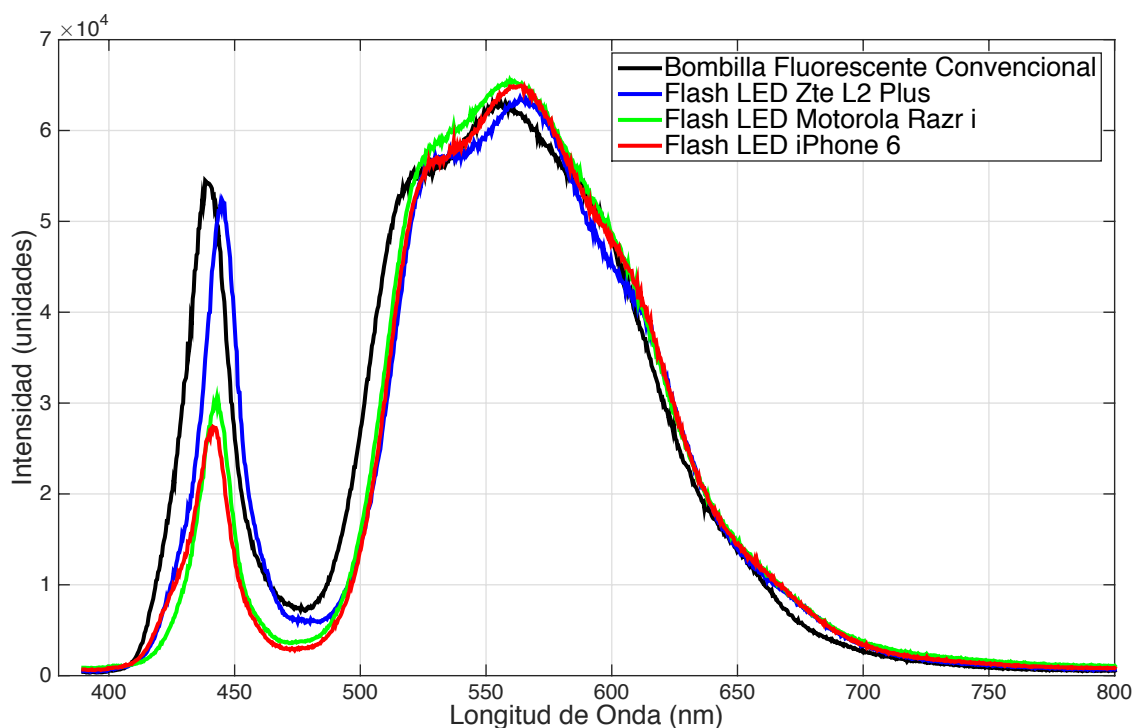


**Figura 4.1:** Arreglo experimental propuesto: (a) Smartphone. (b) Optrodo. (c) Rejilla de difracción. (d) Transmisión de datos por Wi-Fi. (e) Análisis de imágenes en MatLab.

## 4.2. Fuente de Bombeo

Para la fuente de bombeo se analizan los espectros de los haces de luz blanca; en la Figura 4.2 se muestra el espectro de una bombilla fluorescente convencional (color negro), el espectro del Flash LED de un Smartphone Zte L2 Plus (color azul), el espectro del Flash LED de un Smartphone Motorola Razr i (color verde) y el espectro del Flash LED de un Smartphone iPhone 6 (color rojo). En general, se observa que el comportamiento del haz de luz blanca es similar en las cuatro fuentes de bombeo, cuya diferencia se presenta en los picos de intensidad aproximadamente entre 420 nm y 520 nm, sin embargo, estas variaciones de intensidad no afectan el desarrollo del proyecto debido a que se selecciona una única fuente de bombeo.

Posterior al análisis de la gráfica en la Figura 4.2, se selecciona el dispositivo iPhone 6 [119], por mayor separación entre el flash led (fuente de bombeo) y la cámara (CMOS, receptor de la señal), por la facilidad que conlleva para el montaje del arreglo experimental, así como la disponibilidad del equipo. Independiente a la marca o referencia del equipo, utilizar un smartphone en este proyecto de tesis pretende aprovechar en un futuro cercano dispositivos que funcionan como minicomputadores y que según los reportes del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) “3 de cada 4 usuarios de telefonía celular en México tienen un smartphone” [120].



**Figura 4.2:** *Espectro Flash LED Smartphone*

La transmisión de datos se realiza a través de la aplicación (app) “IP Cam” versión 5.0, disponible en el “Apple Store” [121]. Esta aplicación soporta el envío de datos por streaming, así como seleccionar diferentes tipos de configuración; para este proyecto se especificó la siguiente configuración: calidad de imagen “Medium”, tamaño de la imagen  $360 \times 480$  píxeles y flash led activado permanente.

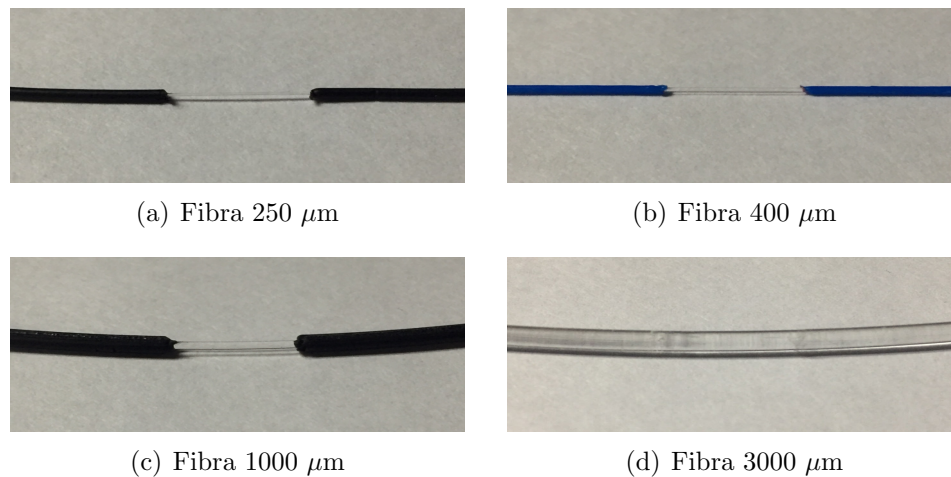
Ya se presentó la selección del smartphone a utilizar ahora se describirá como se selecciona la fibra óptica y la preparación de los optrodos.

### 4.3. Preparación de Optrodos

Los optrodos u optados, también conocidos como biosensores ópticos, son sensores que se basan en materiales biológicos para tener una respuesta específica a sustancias determinadas. La preparación de los optrodos se divide en dos partes: la primera consiste en la preparación de la Fibra Óptica Plástica (F.O.P.) y la segunda consiste en la aplicación de la técnica Sol-Gel en la fibra.

### 4.3.1. Preparación de la Fibra Óptica Plástica

La preparación de la fibra inicia removiendo o quietando aproximadamente 1 cm de cubierta o protector en la mitad de la fibra y posteriormente realizando limpieza de la misma para retirar impurezas o residuos, donde se tuvieron en cuenta cuatro fibras de diferente diámetro 250  $\mu\text{m}$ , 400  $\mu\text{m}$ , 1000  $\mu\text{m}$  y 3000  $\mu\text{m}$  como se muestra en la Figura 4.3, para posteriormente seleccionar el mejor optrodo.



**Figura 4.3:** *Fibras que se tuvieron en cuenta para seleccionar el mejor optrodo*

En trabajos previos [4, 96–103], se empleó ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) y acetona ( $\text{CH}_3\text{COCH}_3$ ) para limpiar y lograr mayor adherencia del Sol-Gel en la fibra, sin embargo, en este trabajo se realiza una prueba, dejando fibra óptica plástica de 250  $\mu\text{m}$  de diámetro por 3 semanas en ácido nítrico como se muestra en la Figura 4.4, observándose que no afecta en gran medida la fibra, mientras que una gota de acetona resulta ser muy abrasiva, por tal motivo se descarta el ácido nítrico en la limpieza de la fibra, minimizando peligro en su manipulación. Así, con la acetona se realiza limpieza de la fibra y a su vez genera porosidad en la misma para tener mayor adherencia al aplicar el Sol-Gel en la fibra.



**Figura 4.4:** *Fibra en Ácido Nítrico*

### 4.3.2. Aplicación de la Técnica Sol-Gel

Como se definió en el Capítulo 3, la técnica Sol-Gel es la evolución de una suspensión coloidal (sol) y su posterior gelificación formando una red en una fase líquida continua (gel). Para este proyecto el Sol-Gel se prepara con las siguientes sustancias químicas:

- Azul de Bromofenol ( $C_{19}H_9Br_4NaO_5S$ )  $\Rightarrow$  Indicador pH de 3.0 - 4.6.
- Azolitmina  $\Rightarrow$  Indicador pH de 4.5 - 8.3.
- Fenolftaleína ( $C_{20}H_{14}O_4$ )  $\Rightarrow$  Indicador pH de 8 - 10.
- Tetraetilo Ortosilicato ( $Si(OC_2H_5)_4$ ).
- Alcohol Etílico ( $CH_3CH_2OH$ ).
- Ácido Nítrico ( $HNO_3$ ).

Para la preparación del Sol-Gel se utiliza un agitador magnético a 60 °C y 1 Hz de frecuencia, donde se realiza el siguiente procedimiento utilizando dos vasos precipitados en las cantidades expresadas a continuación:

**Vaso Precipitado A**

- 2 mg Azul de Bromofenol.
- 3 mg Azolitmina.
- 3 mg Fenolftaleína.
- 0.4 ml Agua Destilada.

**Vaso Precipitado B**

- 2 ml Tetraetilo Ortosilicato (TEOS).
- 1 ml Alcohol Etílico.

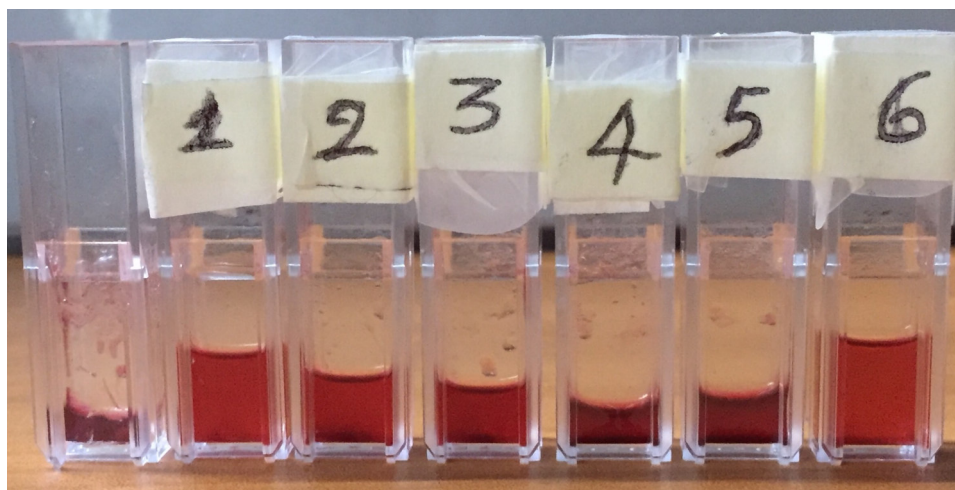
- Transcurridos 5 min, se vierte de a 1 ml la solución del Vaso Precipitado B en la solución del Vaso Precipitado A.
- Se agrega 0.010 ml de Ácido Nítrico.
- Se deja mezclar la solución por 25 min.

En total la preparación del Sol-Gel dura 30 min, para posteriormente dopar la fibra óptica plástica, cubriendo un rango total de 3.00 a 10.00 unidades de pH. La Figura 4.5 muestra el proceso de gelificación, el cual depende de la temperatura ambiental y de la volatilidad que se le permita al recipiente mediante orificios.

La muestra cero (cubeta sin etiqueta) se dejó expuesta al ambiente, donde la solidificación se obtuvo aproximadamente en 24 horas. De la muestra número 1 a la muestra número 5, se sellaron con papel parafilm para posteriormente hacer orificios con la aguja de una jeringa de 1 ml. La muestra número 1 con dos orificios, demoró en solidificar 96



horas; la muestra número 2 con cuatro orificios, demoró en solidificar 72 horas; la muestra número 3 con seis orificios, demoró en solidificar 56 horas; la muestra número 4 con ocho orificios, demoró en solidificar 43 horas; y la muestra número 5 con diez orificios, demoró en solidificar 31 horas. La muestra número 6 sellada completamente con el papel parafilm, demoró aproximadamente 336 horas en solidificar.

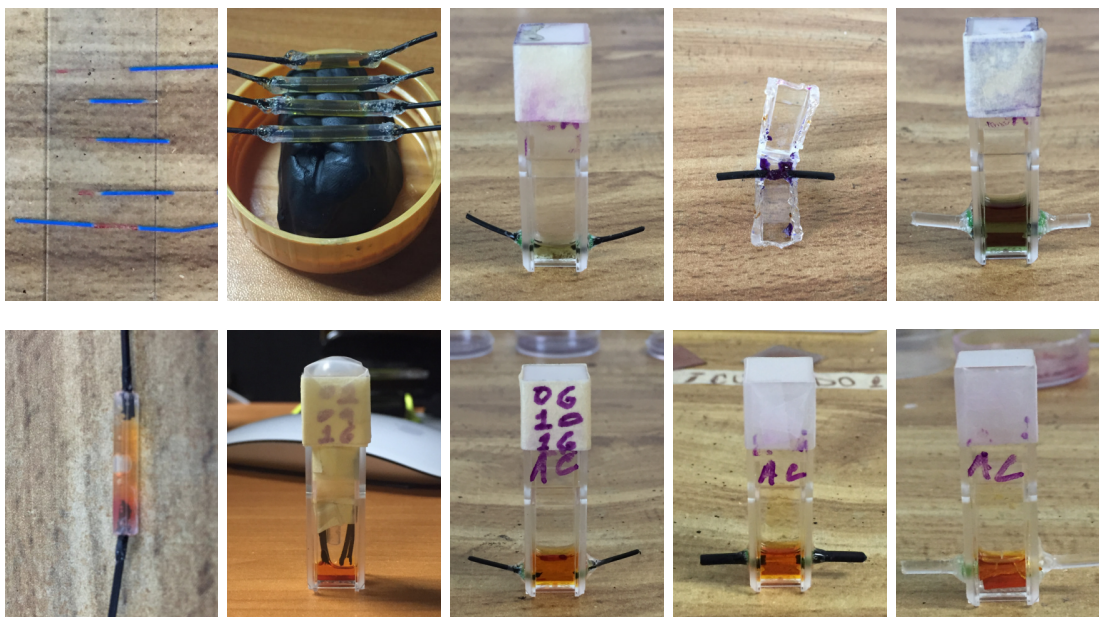


**Figura 4.5:** *Proceso de Gelificación*

En general, a una temperatura entre 20 °C y 25 °C, 1 ml de Sol-Gel en una cubeta de ensayo completamente expuesto al ambiente (muestra sin etiqueta Fig. 4.5) demora en solidificar aproximadamente 24 horas, sin embargo, entre más lenta sea la solidificación el material será más homogéneo (sin grietas o quebraduras).

La Figura 4.6 muestra algunas de las deposiciones fallidas, en búsqueda de la mejor forma de impregnar el Sol-Gel en la fibra óptica plástica. Entre los utilizados, se colocó la fibra en tubos plásticos de 3 mm de diámetro y cubetas de ensayo, sellando los extremos con plastilina y silicona; por una parte, la plastilina modifica la composición del Sol-Gel y por otra parte, la silicona sellaba el recipiente, dificultando remover la fibra posteriormente.

Los mejores resultados en la deposición del Sol-Gel, se obtuvieron aplicando una gota en la fibra, rotando o girando la misma hasta quedar distribuida e impregnada en el fragmento deseado, repitiendo constantemente el goteo de Sol-Gel en la fibra. El proceso se realiza en sesiones aproximadamente de 3 horas por día, durante 3 días o hasta obtener una película uniforme y delgada en la fibra como se muestra en la Figura 4.7.



**Figura 4.6:** *Deposiciones Fallidas de Sol-Gel en la Fibra*



(a) Fibra 250  $\mu\text{m}$



(b) Fibra 400  $\mu\text{m}$



(c) Fibra 1000  $\mu\text{m}$



(d) Fibra 3000  $\mu\text{m}$

**Figura 4.7:** *Deposición del Sol-Gel en la F.O.P.*

Teniendo en cuenta que la deposición de la película delgada de Sol-Gel se realizó correctamente en la fibras, para seleccionar la fibra a utilizar, se emplea un medidor de potencia para fibras ópticas, encontrándose que de las cuatro fibras ópticas plásticas

utilizadas (250  $\mu\text{m}$ , 400  $\mu\text{m}$ , 1000  $\mu\text{m}$  y 3000  $\mu\text{m}$  de diámetro), la fibra que menor pérdida de potencia de salida, respecto a la potencia de bombeo (flash led del smartphone), es la fibra de 3000  $\mu\text{m}$  [122] de diámetro como se muestra en la Tabla 4.1, la cual se selecciona para el desarrollo del proyecto.

**Tabla 4.1:** *Potencia de Salida Flash LED Smartphone en F.O.P.*

Fuente	Potencia
Flash LED + Fibra 250 $\mu\text{m}$	0.62 mW
Flash LED + Fibra 400 $\mu\text{m}$	0.86 mW
Flash LED + Fibra 1000 $\mu\text{m}$	2.6 mW
<b>Flash LED + Fibra 3000 <math>\mu\text{m}</math></b>	<b>6.66 mW</b>
Flash LED Smartphone	7.69 mW

Una vez seleccionada la fibra ahora explicaremos como se obtendrá la imagen usando el smartphone, el procesamiento de la imagen captada, las fórmulas utilizadas para convertir una imagen en color RGB a escala de gris, así como la descripción de la interfaz gráfica desarrollada en MatLab para la recepción, procesamiento y recolección de datos de las imágenes transmitidas desde el smartphone.

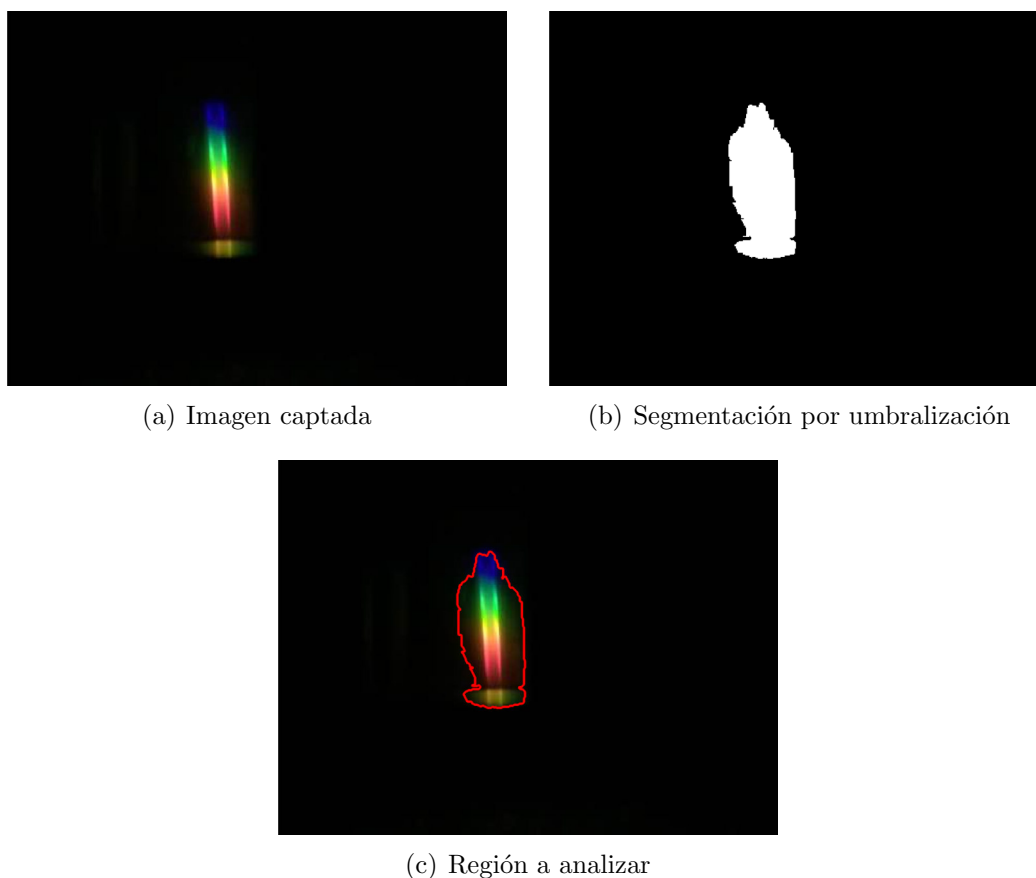
## 4.4. Captado de Imágenes

El haz de luz blanca que emite el flash led del smartphone y que es usado como fuente de bombeo incide directamente en una rejilla de difracción por reflexión de 1200 líneas/mm, difractando el haz de luz en los diferentes colores que lo componen para ser captados por la cámara del smartphone.

En óptica, una rejilla de difracción es un componente óptico con un patrón que divide (difracta) la luz en varios haces de luz que viajan en diferentes direcciones. Las direcciones de esos haces de luz dependen del espaciado de la rejilla y de la longitud de onda de la luz incidente, de modo que la rejilla actúa como un elemento dispersivo [123, 124].

El captado de imágenes se realiza a través de la aplicación “IP Cam”, cuya configuración permite enviar los datos vía streaming al computador, utilizando Wi-Fi para recibir los datos y procesarlos mediante el software MatLab para el posterior análisis, obteniendo un valor numérico representativo de la imagen en escala de grises mediante el promedio de la intensidad de los píxeles.

A la imagen captada se le realiza un procesamiento con el fin de eliminar ruido; el procesamiento consiste en segmentar la imagen por umbralización cuya intensidad de píxel es mayor a 10 (teniendo en cuenta que la intensidad de los píxeles en una imagen digital cuando tienden a cero representan el color negro y cuando tienden a 255 representan el color blanco), para obtener una imagen binaria que representa la región a analizar. Finalmente, se verifica que el contorno de la imagen binaria corresponda a la región de interés en la imagen captada como se muestra en la Figura 4.8.

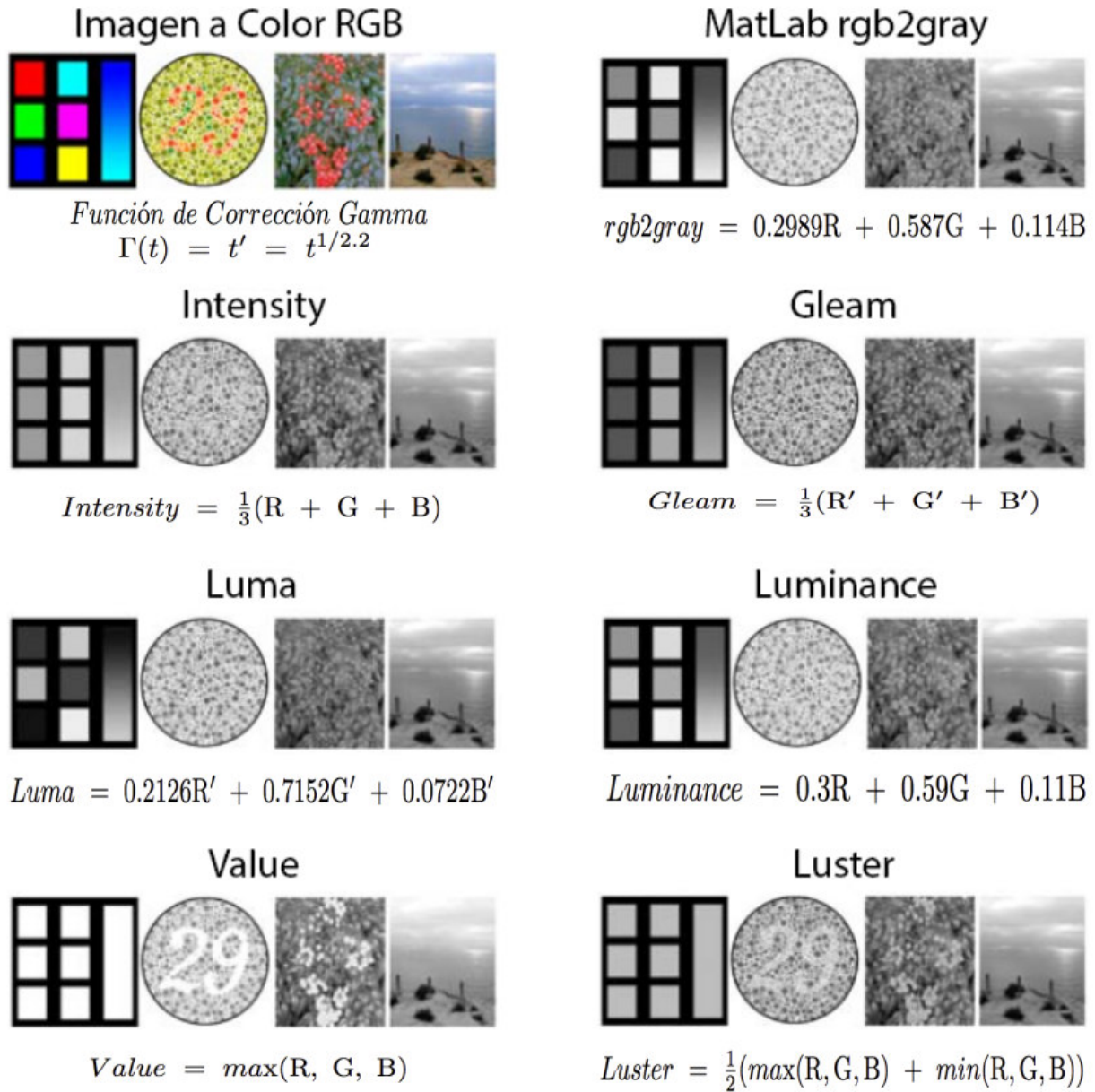


**Figura 4.8:** *Procesamiento de la Imagen Captada*

#### 4.4.1. Conversión de Imagen en Color RGB a Escala de Gris

Una imagen digital en el espacio de color RGB (por sus siglas en inglés Red, Green y Blue), se compone de tres capas: capa de color rojo (R), capa de color verde (G) y capa de color azul (B); esta imagen es posible convertirla a escala de gris utilizando diferentes fórmulas en combinación de las tres capas, para este trabajo utilizamos la función por defecto de MatLab (*“rgb2gray”*) y seis fórmulas del trabajo realizado por Kanan y Cottrell [125], empleando las fórmulas *“Intensity”*, *“Gleam”*, *“Luma”* (las dos anteriores utilizan

previamente una “Función de Corrección Gamma”), “Luminance”, “Value” y “Luster”. Cada una de estas fórmulas afecta de forma diferente la intensidad de los píxeles en la imagen resultante como se muestra en la Figura 4.9.



**Figura 4.9:** Conversión de Imagen en Color RGB a Escala de Gris (figura modificada [125])

La forma de implementar el análisis de la imagen es el siguiente: primero se capta la imagen a color RGB (o espectro) obtenida con la cámara del smartphone que arroja la rejilla de difracción por reflexión; cabe aclarar que en cada una de estas imágenes a color

RGB contiene información de la absorción. A continuación se realiza umbralización para eliminar ruido (como se mostró en la Sección 4.4, Figura 4.8). En seguida, se aplican las 7 fórmulas que se muestran en la Figura 4.9, cada imagen obtenida de las fórmulas es expresada en escala de gris; no por ello se pierde información del color, por ejemplo, si utilizamos la fórmula “Luminance” ( $Luminance = 0.3R + 0.59G + 0.11B$ ), se observa que contiene mayor porcentaje de información de la capa de color verde (G). Finalmente, a cada una de las imágenes en escala de gris se le halla el promedio de intensidad de píxeles, con la finalidad de obtener una curva característica que podamos utilizar posteriormente en el desarrollo del sensor.

Se selecciona trabajar la imagen en escala de gris, debido a que en MatLab una imagen en color RGB se representa por tres matrices bidimensionales correspondientes a las capas R, G y B, mientras que la imagen en escala de gris se representa por una única matriz, obtenida a partir de la combinación de las tres capas (RGB), permitiendo obtener posteriormente el promedio de intensidad de los píxeles en la imagen en escala de gris.

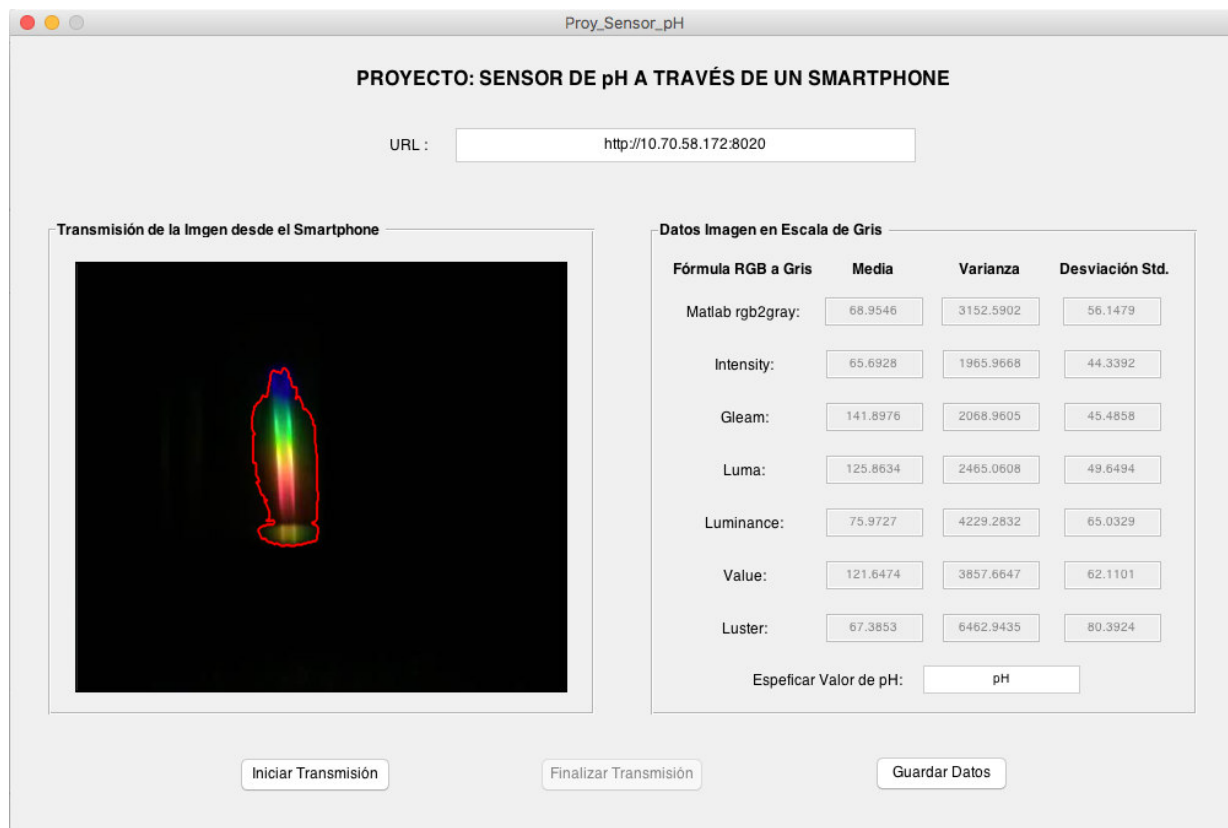


Figura 4.10: Interfaz gráfica para la recolección de datos

Para la recolección de datos se desarrolló una interfaz gráfica (ver Figura 4.10),

donde digitamos la dirección web (url) que transmite las imágenes desde la aplicación “IP Cam”, y se le asigna el valor de pH que se va a analizar. La interfaz nos muestra la imagen que se está recibiendo y los datos calculados (media, varianza y desviación estándar) de las siete fórmulas seleccionadas para convertir una imagen en color a escala de gris.

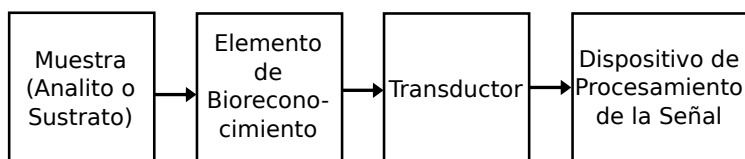
Previo al inicio de la transmisión de datos, se debe tener listo el montaje descrito anteriormente (arreglo experimental propuesto), así como la aplicación “IP Cam” ejecutada en el smartphone. Una vez iniciada la transmisión (botón “*Iniciar Transmisión*”), el código guarda automáticamente las primeras 1000 imágenes con sus respectivos datos calculados (teniendo en cuenta que cada imagen representa una muestra). La interfaz también cuenta con los botones de “*Finalizar Transmisión*” y “*Guardar Datos*” que nos permiten guardar imágenes y datos individuales en cualquier instante de la transmisión.

En este capítulo presentamos cual será la fuente de bombeo, la fibra óptica plástica que se utilizará para los optrodos, la configuración para captar las imágenes y su respectivo procesamiento, las fórmulas a utilizar para convertir una imagen en color RGB a escala de gris y la interfaz gráfica desarrollada para la recolección de datos. En el siguiente capítulo presentamos los resultados obtenidos de las diferentes mediciones de pH que se realizaron a partir del arreglo experimental propuesto.

# Capítulo 5

## Resultados

Los biosensores ópticos se clasifican en geométricos, de onda evanescente y transductores; entre los transductores encontramos los fluorescentes, de luminancia y absorción [126, 127], cuyo esquema general para biosensado se presenta en la Figura 5.1. Nuestro proyecto se basa en los transductores de absorción, donde la muestra (analito o sustrato) es el potencial de hidrógeno ( $[H^+]$ ) presente en los buffer de pH, los cuales se concentran en el elemento de bioreconocimiento (indicadores de pH) que se encuentran en la fibra óptica plástica depositados en la película delgada, que fueron realizadas haciendo uso de la técnica Sol-Gel; el transductor se compone del optrodo, la rejilla de difracción por reflexión y la cámara del smartphone que transforman la señal del haz de luz a intensidad de píxeles en los diferentes colores que la componen (imagen captada en color RGB); para finalmente utilizar un computador con MatLab como dispositivo de procesamiento de la señal, expresada como el promedio de intensidad de píxeles de la imagen en escala de gris, correspondiente a la imagen captada.

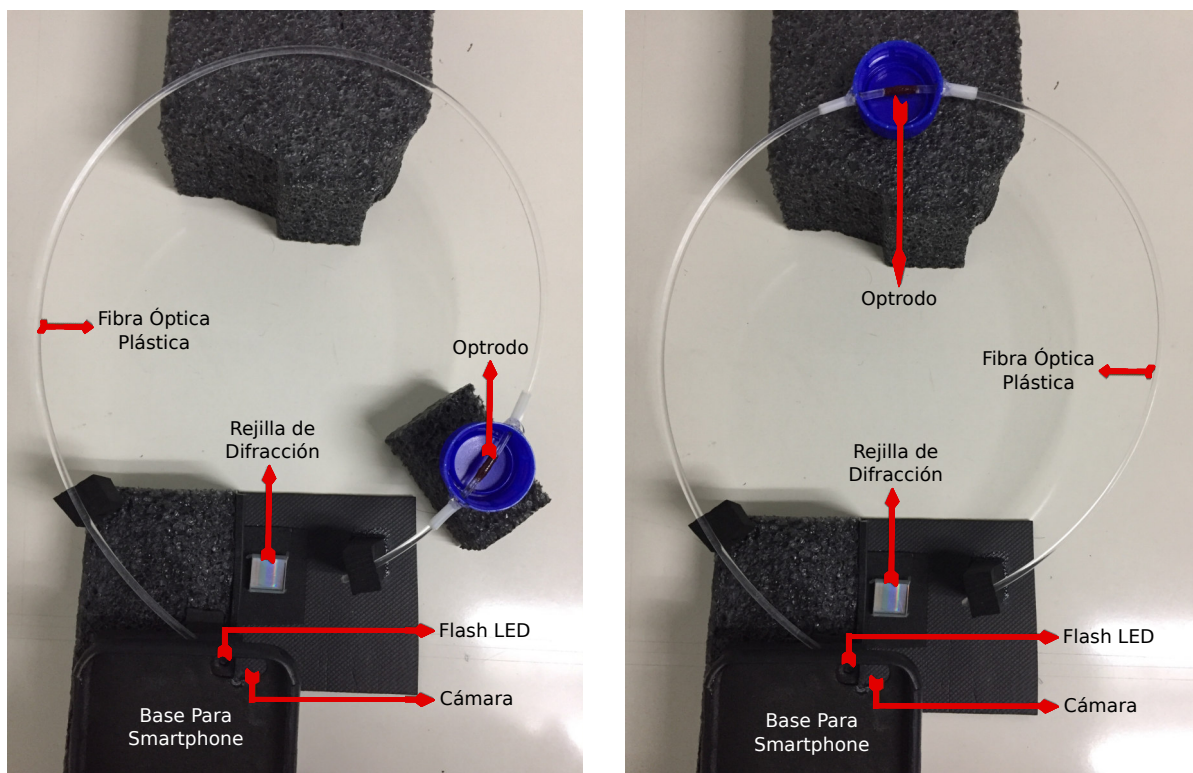


**Figura 5.1:** *Esquema general para biosensado [127]*

Para obtener los resultados se consideraron dos estructuras del sistema, un optrodo cerca del extremo final de la fibra óptica plástica y otro optrodo en la mitad de la fibra óptica plástica, debido a que observamos al realizar pruebas que en el caso de depositar la película sensitiva cerca del extremo final de la fibra, se obtienen resultados diferentes al caso de depositar la película sensitiva en la mitad de la fibra óptica plástica.



La longitud de la fibra es de aproximadamente 55 cm con el extremo inicial pulido a 45° hacia arriba, acoplada directamente a la fuente de luz (flash led), colocada en una base de espuma semi-rígida color negro, la cual se fijó con pegamento instantáneo líquido (kola loka) a la base del smartphone; cuyo haz de luz viaja a través de la fibra óptica plástica donde se encuentra depositada la película sensitiva (aproximadamente 1 cm de longitud) con los indicadores de pH seleccionados, para culminar en el extremo final pulido a 45° hacia abajo con la salida del haz de luz a la rejilla de difracción por reflexión ubicada aproximadamente a 3 cm en una base fija (colocada a presión utilizando el mismo material, espuma semi-rígida), paralela a la cámara del smartphone como se muestra en la Figura 5.2.



(a) Optrodo en el Extremo Final de la F.O.P.

(b) Optrodo en la Mitad de la F.O.P.

**Figura 5.2:** *Optrodos*

Con el fin de garantizar la medida de pH, se emplearon Buffer de 4.01, 5.00, 6.00, 7.00, 7.40, 8.00, 9.00 y 10.00 unidades de pH, que a temperatura de 25 °C presentan estabilidad en el pH y a diferentes temperaturas la variación es alrededor de centésimas de unidad como se muestra en la Tabla 5.1, cuyos datos fueron obtenidos de la información etiquetada en los buffer de pH.

Tabla 5.1: Buffer de pH

Temp. / Buffer	10 °C	20 °C	25 °C	40 °C
pH 4.01	4.00	4.00	<b>4.01</b>	4.03
pH 5.00	---	---	<b>5.00</b>	---
pH 6.00	---	---	<b>6.00</b>	---
pH 7.00	7.08	7.02	<b>7.00</b>	6.97
pH 7.40	---	---	<b>7.40</b>	---
pH 8.00	---	---	<b>8.00</b>	---
pH 9.00	---	---	<b>9.00</b>	---
pH 10.00	10.15	10.05	<b>10.00</b>	9.87

Una vez procesadas las imágenes (1000 muestras, donde cada imagen representa una muestra) y obtenidos los datos respectivos (promedio de intensidad de píxeles) de las siete fórmulas seleccionadas para convertir una imagen en color RGB a escala de gris, se calculan los siguientes datos estadísticos teniendo en cuenta que el resultado de cada imagen representa una muestra y a cada muestra se le halla el promedio de intensidad de píxeles en siete fórmulas diferentes: media, como el cociente de dividir la suma de las muestras por el número total de muestras (1000); mediana, como el valor que se encuentra ubicado en la mitad de las 1000 muestras ordenadas de forma ascendente; moda, como el valor que más se repite en las 1000 muestras [128–133].

La mediana nos permite observar que tan alejada se encuentra la media de la mitad de las muestras ordenadas de forma ascendente y la moda nos permite observar que tan distante se encuentra el valor que más se repite de la media, con la finalidad de considerar una relación entre la media de intensidad de píxeles de una imagen en escala de gris y el promedio de intensidad de píxeles en escala de gris de las imágenes captadas por la cámara del smartphone.

Otros datos estadísticos de gran importancia que se habían mencionado anteriormente: varianza ( $\sigma^2$ ), como el cociente de dividir la suma del cuadrado de la diferencia entre la media y cada una de las muestras entre el total de las muestras (1000); y desviación estándar (Desv. Std.), como la raíz cuadrada de la varianza. Por otra parte, también se halló el rango dispersión (R - Dispersión) como la diferencia entre el máximo valor y el mínimo valor del promedio de intensidad de los píxeles (teniendo en cuenta que representan las 1000 muestras) [128–133].

La varianza nos permite obtener la desviación estándar y la desviación estándar nos permite evaluar el grado de dispersión de los datos, donde la consideramos buena y con gran concentración de los datos alrededor de la media cuando la desviación estándar

es inferior a 1. El análisis de la dispersión de los datos nos permite afirmar o descartar las fórmulas utilizadas para convertir una imagen en color RGB a escala de gris, donde consideramos un rango de dispersión bueno inferior a 4 unidades, siendo consecuentes con la desviación estándar.

En consecuencia, en este trabajo de tesis realizamos un análisis de las variaciones del promedio de intensidad de los píxeles en imágenes a escala de gris respecto al pH desde el punto de vista estadístico, diferente a los métodos convencionales en análisis de intensidad, transmitancia, espectro de longitud de onda, entre otros; para finalmente obtener una curva característica a partir de la media de intensidad de píxeles a partir de las imágenes captadas por el smartphone.

## 5.1. Resultados Optrodo en el Extremo Final de la Fibra

Antes de tomar los resultados se captaron 1000 muestras del optrodo sin pH, teniendo en cuenta que cada muestra es representada por una imagen y que es el mismo número de muestras que se toman con los diferentes buffer de pH, para posteriormente obtener el promedio de intensidad de píxeles en cada una de las fórmulas utilizadas para convertir una imagen en color RGB a escala de gris, como se muestra en la Figura 5.3. A su vez, el color negro representa las muestras obtenidas con la fórmula “MatLab rgb2gray”, el color rojo representa las muestras obtenidas con la fórmula “Intensity”, el color naranja representa las muestras obtenidas con la fórmula “Glean”, el color azul representa las muestras obtenidas con la fórmula “Luma”, el color magenta representa las muestras obtenidas con la fórmula “Luminance”, el color cian representa las muestras obtenidas con la fórmula “Value” y el color verde representa las muestras obtenidas con la fórmula “Luster”.

La Tabla 5.2, muestra los resultados estadísticos sin pH del optrodo en el extremo final de la fibra óptica plástica, donde se observa que la desviación estándar es inferior a 1, las diferencias entre media, mediana y moda no supera las dos unidades, presentando gran concentración de los datos alrededor de la media en un rango de dispersión inferior a tres unidades, a excepción de las fórmulas “Glean” y “Luma” que superan las tres unidades. Posteriormente, al agregar los buffer de pH en el optrodo se espera observar las variaciones en los datos estadísticos mencionados.

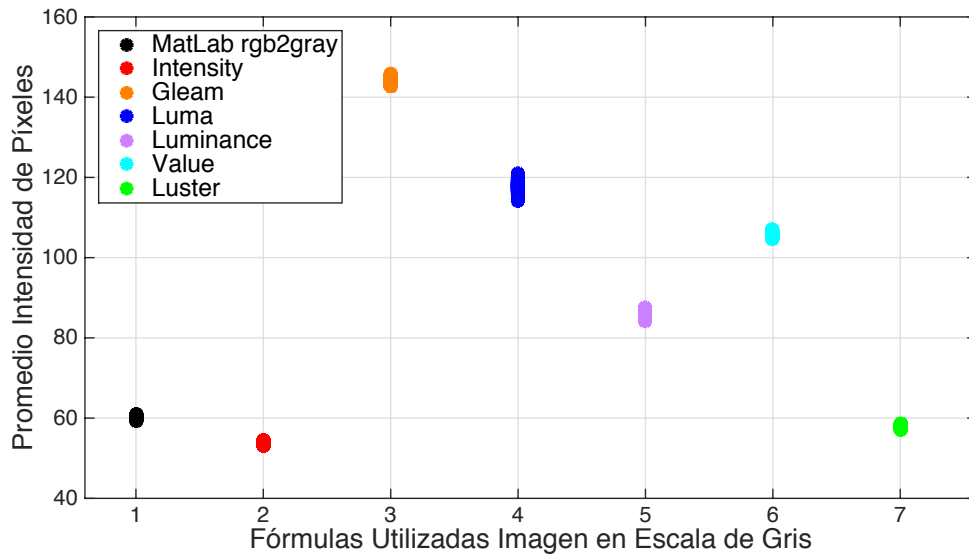
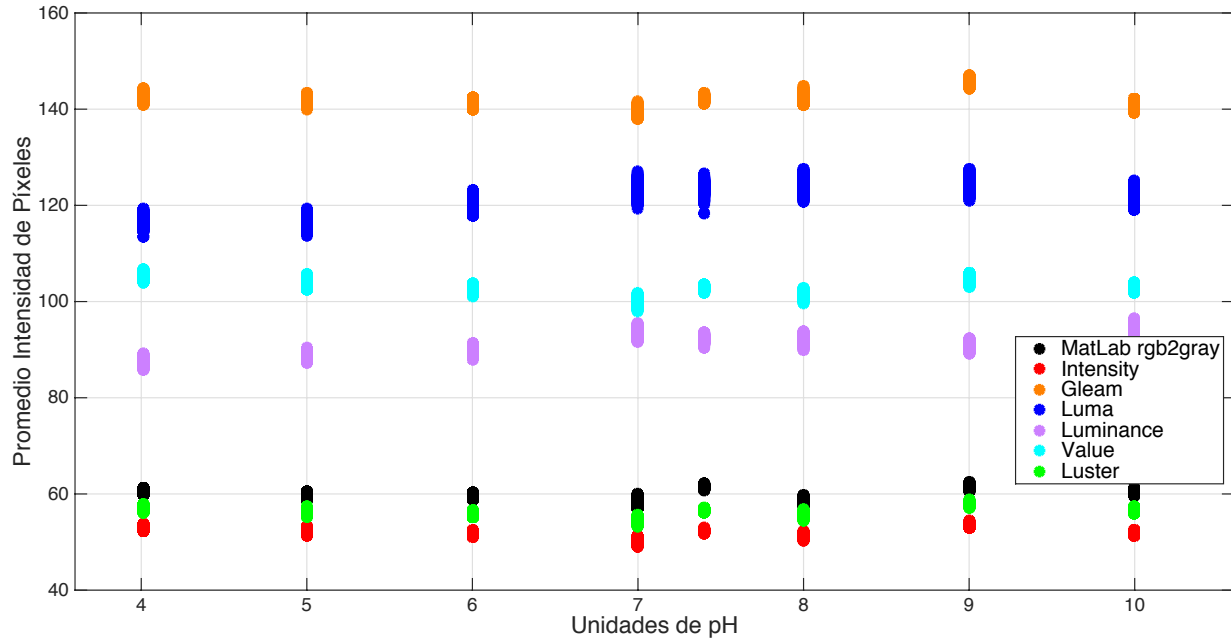


Figura 5.3: Resultado 1000 Datos Sin pH Optrodo en el Final de la F.O.P.

Tabla 5.2: Datos Estadísticos 1000 Muestras Sin pH Optrodo en el Final de la F.O.P.

Fórmulas Escala de Gris	MatLab rgb2gray	Intensity	Gleam	Luma	Luminance	Value	Luster
Media	60.1650	53.7719	143.9713	117.8429	86.0196	105.7417	57.8445
Mediana	60.1689	53.7628	143.9590	117.8466	86.0025	105.7311	57.8386
Moda	59.7026	53.8936	142.7016	115.8831	84.7441	105.6008	57.3464
Varianza ( $\sigma^2$ )	0.059191	0.056686	0.327423	0.932846	0.305054	0.152658	0.064148
Desv. Std. ( $\sigma$ )	0.243291	0.238091	0.572209	0.965839	0.552316	0.390716	0.253276
Mínimo Valor	59.4169	53.0881	142.6596	114.0117	84.2239	104.4574	57.1107
Máximo Valor	60.8589	54.4971	145.8422	120.8621	87.5789	106.8444	58.6332
R - Dispersión	1.4421	1.4091	3.1826	6.8504	3.3551	2.3869	1.5224

En la Figura 5.4, se muestran los resultados de los Buffer de 4.01, 5.00, 6.00, 7.00, 7.40, 8.00, 9.00 y 10.00 unidades de pH, respecto al promedio de intensidad de los píxeles en escala de gris para cada imagen de las 1000 muestras captadas, con el optrodo en el extremo final de la fibra óptica plástica. Nuevamente, el color negro representa las muestras obtenidas con la fórmula “MatLab rgb2gray”, el color rojo representa las muestras obtenidas con la fórmula “Intensity”, el color naranja representa las muestras obtenidas con la fórmula “Gleam”, el color azul representa las muestras obtenidas con la fórmula “Luma”, el color magenta representa las muestras obtenidas con la fórmula “Luminance”, el color cian representa las muestras obtenidas con la fórmula “Value” y el color verde representa las muestras obtenidas con la fórmula “Luster”.



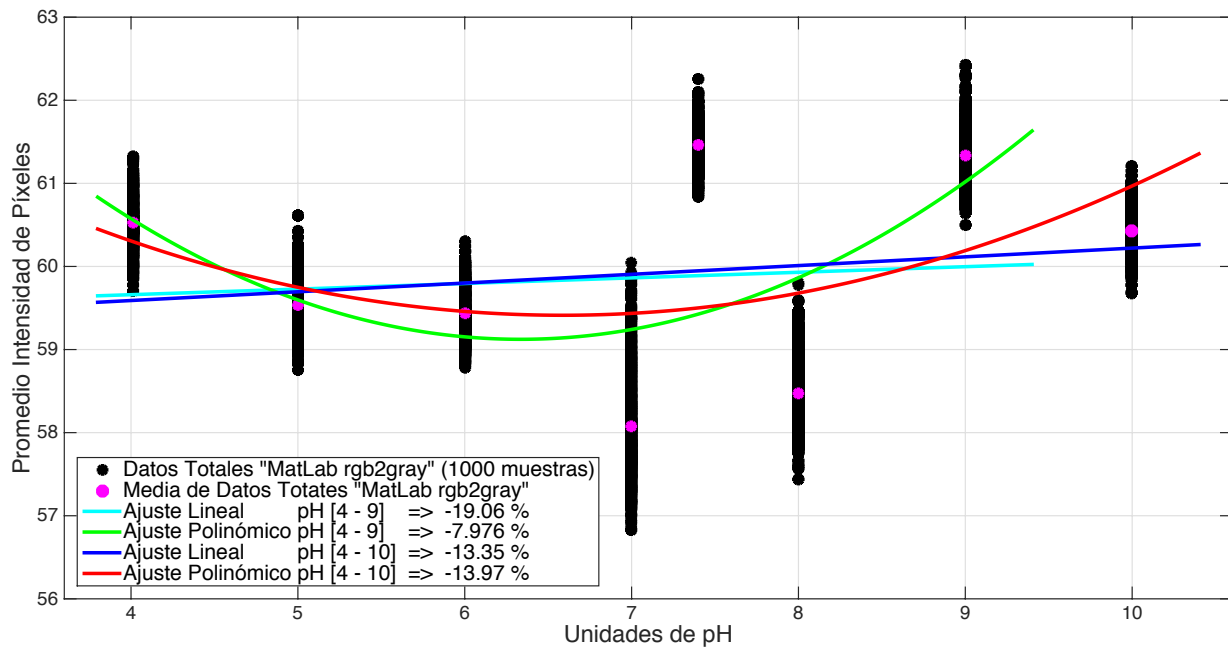
**Figura 5.4:** Resultado Datos Totales Optrodo en el Final de la F.O.P.

En la gráfica (Figura 5.4) se observa que hay variaciones en el promedio de intensidad de píxeles respecto a los buffer de pH, esto es muy importante debido a que se confirma la dependencia de pH al promedio de intensidad de píxeles; como lo mencionamos anteriormente, proponemos un análisis estadístico del promedio de intensidad de los píxeles en la imagen en escala de gris. Ahora, la pregunta es: ¿Cuál fórmula tomamos como válida? Por ejemplo, si tomamos  $\text{pH} = 6$ , tenemos siete fórmulas y en todas varía el promedio de intensidad de píxeles, entonces ¿cuál elegimos?, para responder a esta pregunta, realizamos un ajuste de curva respecto a la media de intensidad de píxeles para cada fórmula y observamos cuál tiene mayor porcentaje de ajuste de curva.

La Tabla 5.3, muestra los resultados estadísticos de la fórmula “MatLab rgb2gray” del optrodo en el extremo final de la fibra óptica plástica, donde se observa que la desviación estándar es inferior a 1, las diferencias entre media, mediana y moda no supera las dos unidades, presentando gran concentración de los datos alrededor de la media en un rango de dispersión inferior a cuatro unidades.

**Tabla 5.3:** Resultado Datos Estadísticos Fórmula “MatLab rgb2gray” Optrodo en el Final de la F.O.P.

Buffer pH	4.01	5.00	6.00	7.00	7.40	8.00	9.00	10.00
Media	60.532	59.539	59.4314	58.0761	61.4677	58.4763	61.3399	60.4243
Mediana	60.5238	59.5374	59.3904	57.9481	61.4765	58.4223	61.3393	60.4059
Moda	60.9716	59.8966	59.644	57.7758	61.3338	57.822	61.3495	59.949
Varianza ( $\sigma^2$ )	0.09921	0.093053	0.097802	0.38784	0.048926	0.19773	0.10709	0.06612
Desv. Std. ( $\sigma$ )	0.31498	0.30505	0.31273	0.62277	0.22119	0.44467	0.32724	0.25714
Mínimo Valor	59.7067	58.7587	58.7902	56.8229	60.8344	57.4426	60.495	59.6744
Máximo Valor	61.3243	60.6163	60.2985	60.0424	62.26	59.8106	62.4252	61.2031
R - Dispersión	1.6176	1.8576	1.5083	3.2195	1.4256	2.368	1.9302	1.5287



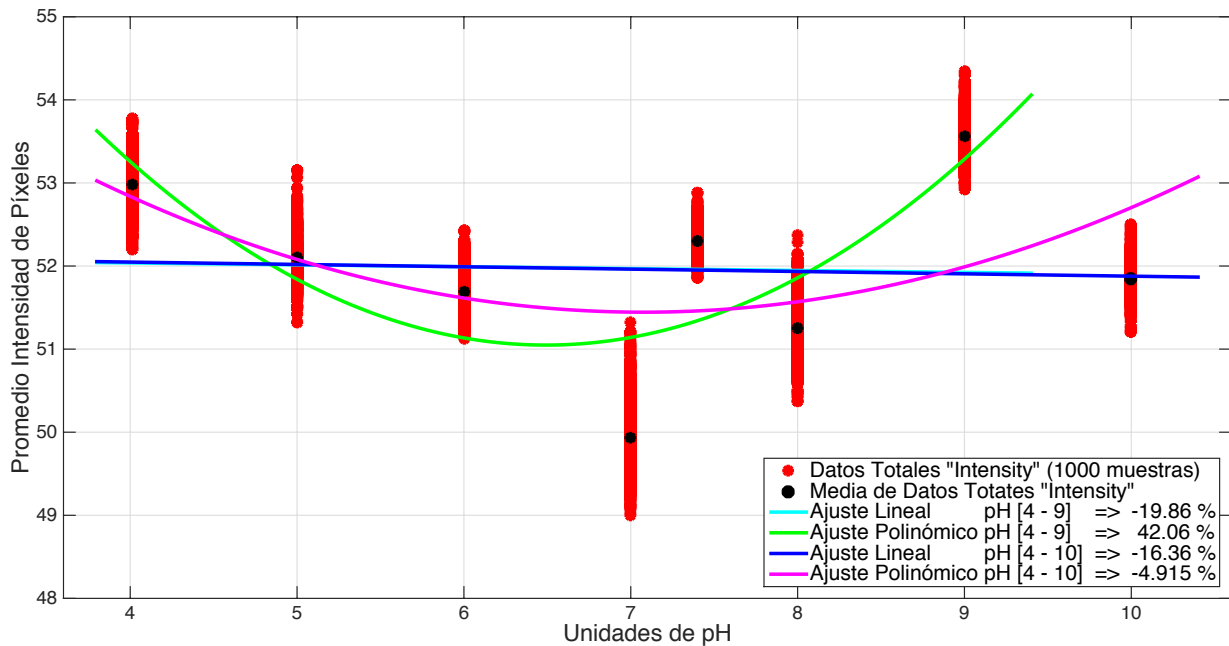
**Figura 5.5:** Curva Característica “MatLab rgb2gray” Optrodo en el Final de la F.O.P.

La Figura 5.5 muestra los datos totales para la fórmula “MatLab rgb2gray” (puntos en color negro, en concordancia con la Figura 5.4), así como las curvas obtenidas a partir de la media (puntos en color magenta, calculados en la Tabla 5.3), donde se observa que para un rango de 4 a 9 unidades de pH se obtiene un ajuste lineal (color cian) de  $-19.06\%$  y un ajuste polinómico (color verde) de  $-7.976\%$ ; para un rango de 4 a 10 unidades de pH se obtiene un ajuste lineal (color azul) de  $-13.35\%$  y un ajuste polinómico (color rojo) de  $-13.97\%$ , donde se observa que los ajustes de curva son muy bajos y por tal motivo se descarta utilizar la fórmula “MatLab rgb2gray”.

La Tabla 5.4, muestra los resultados estadísticos de la fórmula “Intensity” del optrodo en el extremo final de la fibra óptica plástica, donde se observa que la desviación estándar es inferior a 0.5, las diferencias entre media, mediana y moda no superan la unidad, presentando gran concentración de los datos alrededor de la media en un rango de dispersión inferior a tres unidades.

**Tabla 5.4:** Resultado Datos Estadísticos Fórmula “Intensity” Optrodo en el Final de la F.O.P.

Buffer pH	4.01	5.00	6.00	7.00	7.40	8.00	9.00	10.00
Media	52.9845	52.1081	51.6928	49.9409	52.2993	51.2542	53.5627	51.8479
Mediana	52.9849	52.0954	51.6749	49.8544	52.2995	51.2454	53.5763	51.8337
Moda	52.2014	52.463	51.8405	49.4419	52.2005	50.6662	53.631	51.5019
Varianza ( $\sigma^2$ )	0.1002	0.081607	0.071864	0.19522	0.026066	0.13139	0.069606	0.047738
Desv. Std. ( $\sigma$ )	0.31654	0.28567	0.26807	0.44183	0.16145	0.36248	0.26383	0.21849
Mínimo Valor	52.2014	51.3223	51.1184	48.9939	51.8596	50.3664	52.9282	51.2138
Máximo Valor	53.771	53.1533	52.4272	51.323	52.8747	52.375	54.3443	52.4966
R - Dispersión	1.5696	1.831	1.3088	2.3291	1.0151	2.0086	1.4161	1.2828



**Figura 5.6:** Curva Característica “Intensity” Optrodo en el Final de la F.O.P.

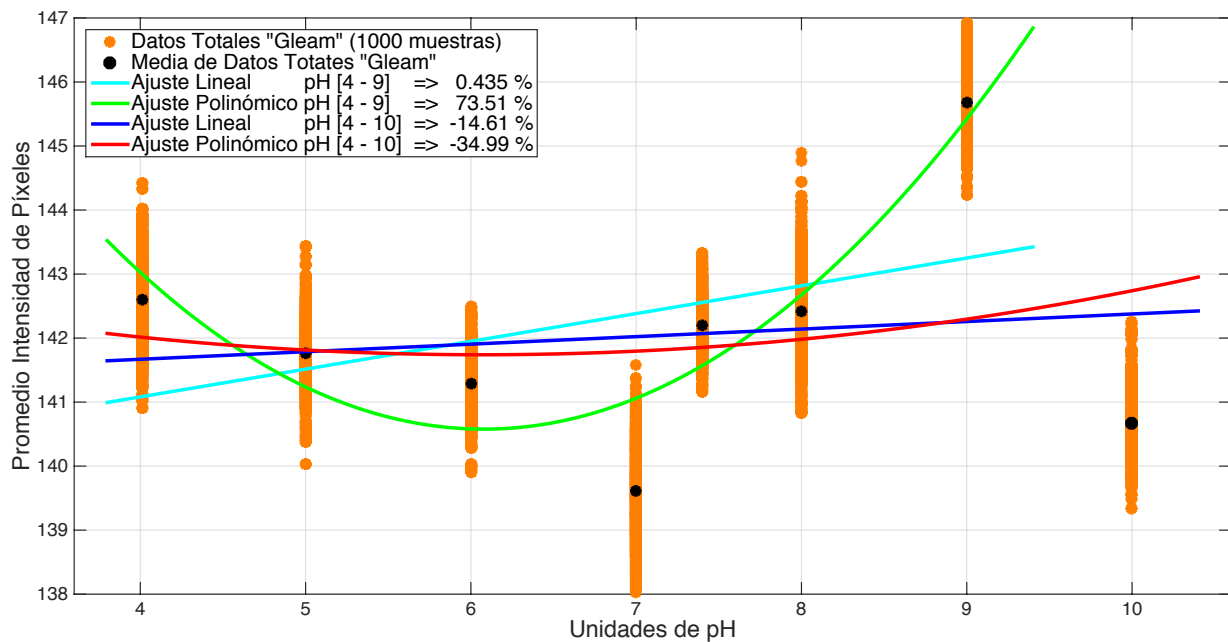
La Figura 5.6 muestra los datos totales para la fórmula “Intensity” (puntos en color rojo, en concordancia con la Figura 5.4), así como las curvas obtenidas a partir de la media (puntos en color negro, calculados en la Tabla 5.4), donde se observa que para un rango de 4 a 9 unidades de pH se obtiene un ajuste lineal (color cian) de  $-19.86\%$  y un ajuste polinómico (color verde) de  $42.06\%$ ; para un rango de 4 a 10 unidades de pH se obtiene un

ajuste lineal (color azul) de  $-16.36\%$  y un ajuste polinómico (color magenta) de  $-4.915\%$ , al igual que la anterior fórmula los ajustes de curva son muy bajos, por tal motivo también es descartada la fórmula “Intensity”, cuya finalidad es encontrar ajustes de curva del 95 % o superior.

La Tabla 5.5, muestra los resultados estadísticos de la fórmula “Gleam” del optrodo en el extremo final de la fibra óptica plástica, donde se observa que la desviación estándar es inferior a 1, las diferencias entre media, mediana y moda no supera las dos unidades, presentando gran concentración de los datos alrededor de la media en un rango de dispersión que supera por centésimas las cuatro unidades.

**Tabla 5.5:** Resultado Datos Estadísticos Fórmula “Gleam” Optrodo en el Final de la F.O.P.

Buffer pH	4.01	5.00	6.00	7.00	7.40	8.00	9.00	10.00
Media	142.5924	141.7604	141.2818	139.6178	142.1965	142.4201	145.6852	140.6759
Mediana	142.5994	141.7379	141.2962	139.6074	142.1598	142.3633	145.6778	140.6446
Moda	140.9104	142.3353	141.2134	139.4829	141.3663	141.421	144.2349	139.8697
Varianza ( $\sigma^2$ )	0.43149	0.26486	0.2543	0.45963	0.16015	0.55468	0.23374	0.2492
Desv. Std. ( $\sigma$ )	0.65688	0.51465	0.50428	0.67796	0.40019	0.74477	0.48347	0.4992
Mínimo Valor	140.9104	140.0275	139.9079	138.0323	141.154	140.8299	144.2349	139.3398
Máximo Valor	144.4309	143.4456	142.4849	141.5855	143.32	144.9032	146.9256	142.2506
R - Dispersión	3.5205	3.4181	2.577	3.5532	2.166	4.0733	2.6907	2.9108



**Figura 5.7:** Curva Característica “Gleam” Optrodo en el Final de la F.O.P.



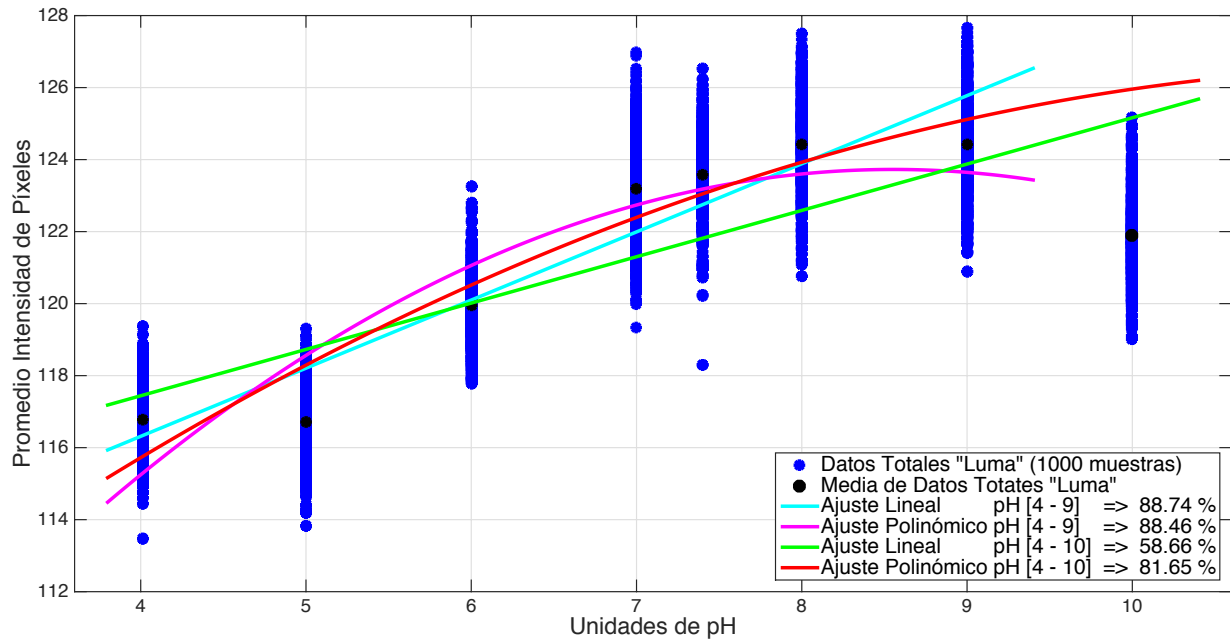
La Figura 5.7 muestra los datos totales para la fórmula “Gleam” (puntos en color naranja, en concordancia con la Figura 5.4), así como las curvas obtenidas a partir de la media (puntos en color negro, calculados en la Tabla 5.5), donde se observa que para un rango de 4 a 9 unidades de pH se obtiene un ajuste lineal (color cian) de 0.435 % y un ajuste polinómico (color verde) de 73.51 %; para un rango de 4 a 10 unidades de pH se obtiene un ajuste lineal (color azul) de -14.61 % y un ajuste polinómico (color rojo) de -34.99 %, donde se observa un ajuste de curva máximo del 73.51 % inferior al esperado del 95 % o superior, por tal motivo también se descarta la fórmula “Gleam”.

La Tabla 5.6, muestra los resultados estadísticos de la fórmula “Luma” del optrodo en el extremo final de la fibra óptica plástica, donde se observa que la desviación estándar es superior a 1, las diferencias entre media, mediana y moda superan las tres unidades, presentando gran dispersión de los datos en un rango superior a cinco unidades.

**Tabla 5.6:** *Resultado Datos Estadísticos Fórmula “Luma” Optrodo en el Final de la F.O.P.*

Buffer pH	4.01	5.00	6.00	7.00	7.40	8.00	9.00	10.00
Media	116.7663	116.7108	119.9489	123.1991	123.5642	124.434	124.4153	121.9033
Mediana	116.7811	116.7476	119.9096	123.2488	123.5679	124.4297	124.4362	121.8625
Moda	113.4753	116.7948	119.5757	122.5987	121.7449	122.576	122.0821	120.2439
Varianza ( $\sigma^2$ )	0.68918	0.88322	0.91889	1.4992	1.0742	1.5798	1.534	1.143
Desv. Std. ( $\sigma$ )	0.83017	0.9398	0.95859	1.2244	1.0364	1.2569	1.2386	1.0691
Mínimo Valor	113.4753	113.8327	117.7976	119.3488	118.3091	120.7609	120.8977	119.0187
Máximo Valor	119.3603	119.296	123.2624	126.9825	126.5338	127.5041	127.65	125.1587
R - Dispersión	5.885	5.4633	5.4648	7.6337	8.2247	6.7432	6.7523	6.14

La Figura 5.8 muestra los datos totales para la fórmula “Luma” (puntos en color azul, en concordancia con la Figura 5.4), así como las curvas obtenidas a partir de la media (puntos en color negro, calculados en la Tabla 5.6), donde se observa que para un rango de 4 a 9 unidades de pH se obtiene un ajuste lineal (color cian) de 88.74 % y un ajuste polinómico (color magenta) de 88.46 %; para un rango de 4 a 10 unidades de pH se obtiene un ajuste lineal (color verde) de 58.66 % y un ajuste polinómico (color rojo) de 81.65 %, donde se observa notablemente mejoras en los ajustes de curva, sin embargo no superan el 95 % deseado, por tal motivo también se descarta la fórmula “Luma”.



**Figura 5.8:** Curva Característica “Luma” Optrodo en el Final de la F.O.P.

La Tabla 5.7, muestra los resultados estadísticos de la fórmula “Luminance” del optrodo en el extremo final de la fibra óptica plástica, donde se observa que la desviación estándar es inferior a 1, las diferencias entre media, mediana y moda no supera las dos unidades, presentando gran concentración de los datos alrededor de la media en un rango de dispersión inferior a cuatro unidades.

**Tabla 5.7:** Resultado Datos Estadísticos Fórmula “Luminance” Optrodo en el Final de la F.O.P.

Buffer pH	4.01	5.00	6.00	7.00	7.40	8.00	9.00	10.00
Media	87.5719	88.5847	89.8889	93.4876	92.1806	92.022	90.7791	94.4804
Mediana	87.5794	88.5777	89.9134	93.4907	92.1563	92.0055	90.7427	94.4357
Moda	85.7329	88.0675	88.8711	93.5731	91.0822	91.6146	89.8522	93.4661
Varianza ( $\sigma^2$ )	0.30901	0.19609	0.2543	0.45703	0.21472	0.34513	0.36572	0.50401
Desv. Std. ( $\sigma$ )	0.55589	0.44282	0.50429	0.67604	0.46338	0.58748	0.60475	0.70993
Mínimo Valor	85.7329	87.2237	87.9742	91.5782	90.5208	89.9585	89.0828	92.4382
Máximo Valor	89.264	90.3392	91.3523	95.4137	93.5307	93.8786	92.4004	96.4103
R - Dispersión	3.5311	3.1155	3.3781	3.8355	3.0099	3.9201	3.3176	3.9721

La Figura 5.9 muestra los datos totales para la fórmula “Luminance” (puntos en color magenta, en concordancia con la Figura 5.4), así como las curvas obtenidas a partir de la media (puntos en color negro, calculados en la Tabla 5.7), donde se observa que para un rango de 4 a 9 unidades de pH se obtiene un ajuste lineal (color cian) de 46.24 % y un ajuste

polinómico (color verde) de 71.34 %; para un rango de 4 a 10 unidades de pH se obtiene un ajuste lineal (color azul) de 63.69 % y un ajuste polinómico (color rojo) de 61.89 %, donde los ajustes de curva continúan siendo inferiores al 95 % deseado, por tal motivo también se descarta la fórmula “Luminance”.

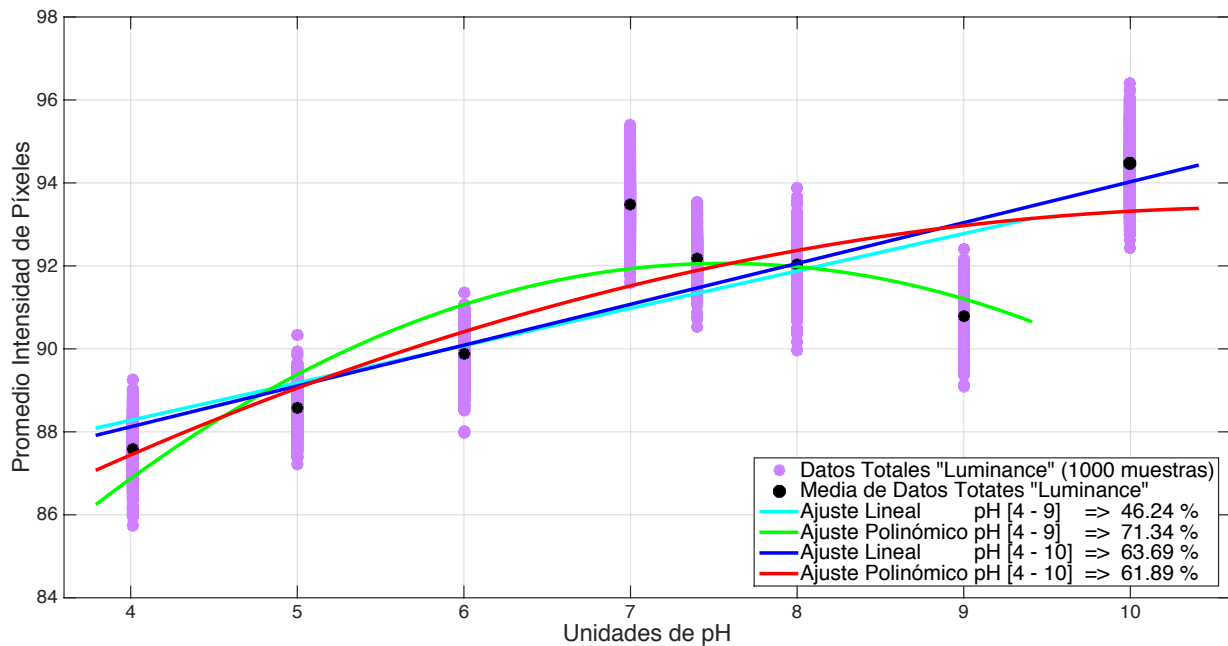


Figura 5.9: Curva Característica “Luminance” Optrodo en el Final de la F.O.P.

La Tabla 5.8, muestra los resultados estadísticos de la fórmula “Value” del optrodo en el extremo final de la fibra óptica plástica, donde se observa que la desviación estándar es inferior a 1, las diferencias entre media, mediana y moda no supera las dos unidades, presentando gran concentración de los datos alrededor de la media en un rango de dispersión inferior a cuatro unidades.

La Figura 5.10 muestra los datos totales para la fórmula “Value” (puntos en color cian, en concordancia con la Figura 5.4), así como las curvas obtenidas a partir de la media (puntos en color negro, calculados en la Tabla 5.8), donde se observa que para un rango de 4 a 9 unidades de pH se obtiene un ajuste lineal (color verde) de  $-4.821\%$  y un ajuste polinómico (color magenta) de  $54.30\%$ ; para un rango de 4 a 10 unidades de pH se obtiene un ajuste lineal (color azul) de  $-8.853\%$  y un ajuste polinómico (color rojo) de  $33.72\%$ , donde los ajustes de curva continúan siendo inferiores al 95 % deseado, por tal motivo se descarta la fórmula “Value”.

Tabla 5.8: Resultado Datos Estadísticos Fórmula “Value” Optrodo en el Final de la F.O.P.

Buffer pH	4.01	5.00	6.00	7.00	7.40	8.00	9.00	10.00
Media	105.2608	103.685	102.4349	99.5249	102.7848	101.1719	104.4255	102.9864
Mediana	105.2617	103.6714	102.4372	99.3905	102.7957	101.2022	104.4182	102.9691
Moda	103.9278	103.6251	101.968	99.0374	102.7739	101.1791	104.7049	102.4225
Varianza ( $\sigma^2$ )	0.2781	0.28151	0.24741	0.45321	0.07857	0.28688	0.26619	0.12966
Desv. Std. ( $\sigma$ )	0.52735	0.53058	0.4974	0.67321	0.2803	0.53561	0.51594	0.36008
Mínimo Valor	103.9278	102.4311	101.2081	98.0075	101.9154	99.7332	103.1203	101.7956
Máximo Valor	106.6305	105.6791	103.8044	101.9325	103.6344	102.7635	106.0544	103.9787
R - Dispersión	2.7027	3.248	2.5963	3.925	1.719	3.0303	2.9341	2.1831

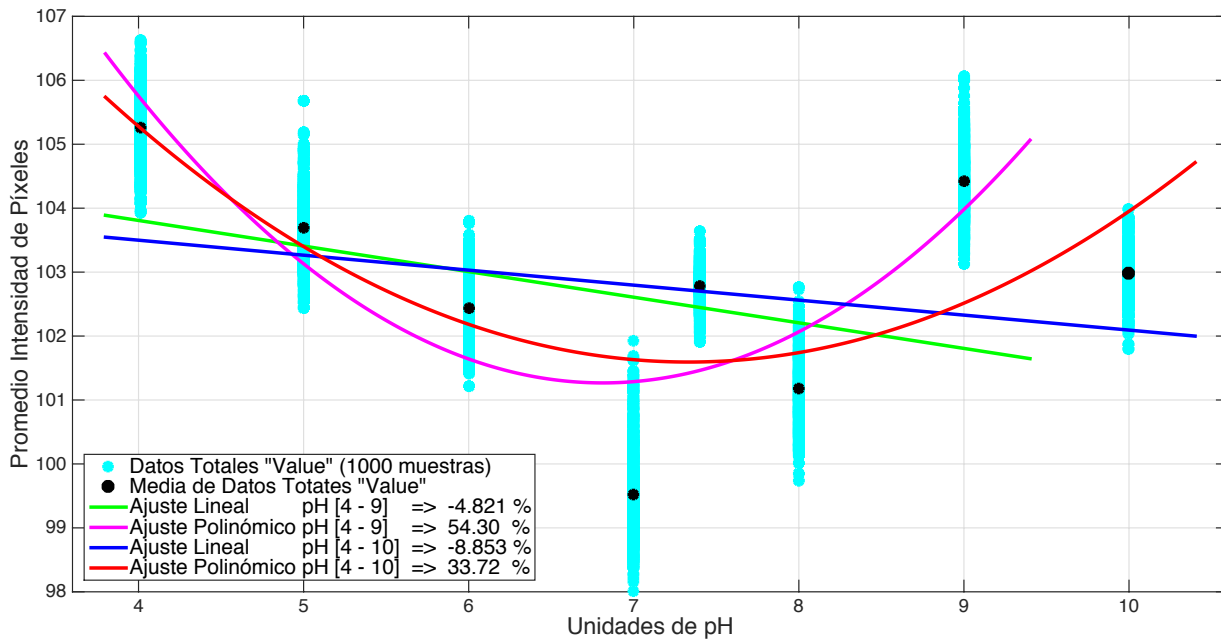


Figura 5.10: Curva Característica “Value” Optrodo en el Final de la F.O.P.

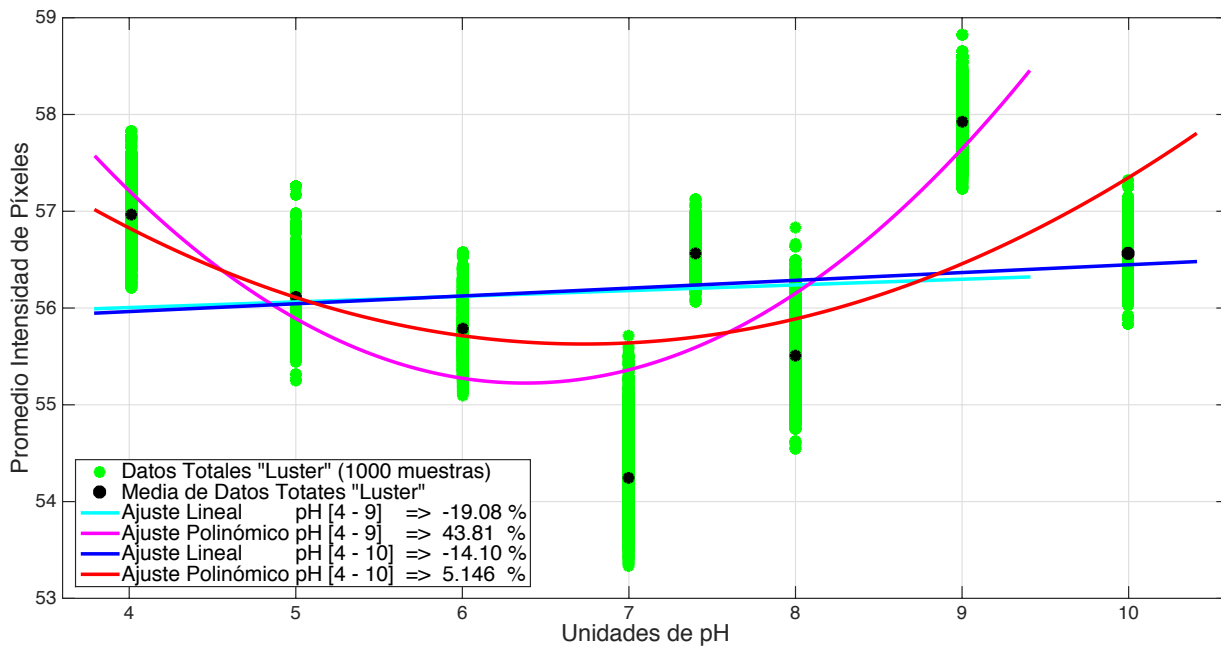
La Tabla 5.9, muestra los resultados estadísticos de la fórmula “Luster” del optrodo en el extremo final de la fibra óptica plástica, donde se observa que la desviación estándar es inferior a 1, las diferencias entre media, mediana y moda no supera la unidad, presentando gran concentración de los datos alrededor de la media en un rango de dispersión inferior a tres unidades.

La Figura 5.11 muestra los datos totales para la fórmula “Luster” (puntos en color verde, en concordancia con la Figura 5.4), así como las curvas obtenidas a partir de la media (puntos en color negro, calculados en la Tabla 5.9), donde se observa que para un rango de 4 a 9 unidades de pH se obtiene un ajuste lineal (color cian) de  $-19.08\%$  y un ajuste polinómico (color magenta) de  $43.81\%$ ; para un rango de 4 a 10 unidades de pH se

obtiene un ajuste lineal (color azul) de  $-14.10\%$  y un ajuste polinómico (color rojo) de  $5.146\%$ , donde los ajustes de curva continúan siendo inferiores al  $95\%$  deseado, por tal motivo también se descarta la fórmula “Luster”.

**Tabla 5.9:** Resultado Datos Estadísticos Fórmula “Luster” Optrodo en el Final de la F.O.P.

Buffer pH	4.01	5.00	6.00	7.00	7.40	8.00	9.00	10.00
Media	56.9661	56.1201	55.7907	54.246	56.5629	55.5042	57.9206	56.5659
Mediana	56.9777	56.1051	55.7618	54.1495	56.5711	55.4973	57.9199	56.5569
Moda	56.4264	56.5326	55.6177	53.8993	56.1989	54.8198	57.9518	56.1553
Varianza ( $\sigma^2$ )	0.11393	0.098568	0.090716	0.22139	0.029393	0.16707	0.086053	0.06131
Desv. Std. ( $\sigma$ )	0.33754	0.31396	0.30119	0.47052	0.17144	0.40875	0.29335	0.24761
Mínimo Valor	56.2112	55.2554	55.0941	53.3343	56.0684	54.5526	57.2387	55.8312
Máximo Valor	57.8333	57.2555	56.5713	55.7141	57.1229	56.8301	58.8187	57.3177
R - Dispersión	1.6221	2.0001	1.4772	2.3798	1.0545	2.2775	1.58	1.4865



**Figura 5.11:** Curva Característica “Luster” Optrodo en el Final de la F.O.P.

Del análisis de los resultados anteriormente expuestos, obtenidos con el optrodo en el extremo final de la fibra óptica plástica, se concluye que son poco confiables debido a que aproximadamente la mitad de los porcentajes de ajuste de curva son negativos y los resultados positivos no superan el  $90\%$ , como se muestra en la Tabla 5.10.

Tabla 5.10: Porcentaje Ajuste de Curva Optrodo en el Final de la F.O.P.

Fórmulas Imagen en Color RGB a Escala de Gris	Porcentaje Ajuste de Curva			
	Ajuste Lineal pH [4 - 9]	Ajuste Polinómico pH [4 - 9]	Ajuste Lineal pH [4 - 10]	Ajuste Polinómico pH [4 - 10]
“MatLab rgb2gray”	-19.06 %	-7.976 %	-13.35 %	-13.97 %
“Intensity”	-19.86 %	42.06 %	-16.36 %	-4.915 %
“Gleam”	0.435 %	73.51 %	-14.61 %	-34.99 %
“Luma”	88.74 %	88.46 %	58.66 %	81.65 %
“Luminance”	46.24 %	71.34 %	63.69 %	61.89 %
“Value”	-4.821 %	54.30 %	-8.853 %	33.72 %
“Luster”	-19.08 %	43.81 %	-14.10 %	5.146 %

## 5.2. Resultados Optrodo en la Mitad de la Fibra

En virtud a que no obtuvimos ajustes de curva representativos a los esperados en el optrodo donde se depositó la película sensitiva cerca del extremo final de la fibra, ahora analizamos el optrodo con la deposición de la película sensitiva en la mitad de la fibra. Al igual que el optrodo anterior, antes de tomar los resultados se captaron 1000 muestras del optrodo sin pH, teniendo en cuenta que cada muestra es representada por una imagen y que es el mismo número de muestras que se toman con los diferentes buffer de pH, para posteriormente obtener el promedio de intensidad de píxeles en cada una de las fórmulas utilizadas para convertir una imagen en color RGB a escala de gris, como se muestra en la Figura 5.12. A su vez, el color negro representa las muestras obtenidas con la fórmula “MatLab rgb2gray”, el color rojo representa las muestras obtenidas con la fórmula “Intensity”, el color naranja representa las muestras obtenidas con la fórmula “Gleam”, el color azul representa las muestras obtenidas con la fórmula “Luma”, el color magenta representa las muestras obtenidas con la fórmula “Luminance”, el color cian representa las muestras obtenidas con la fórmula “Value” y el color verde representa las muestras obtenidas con la fórmula “Luster”.

La Tabla 5.11, muestra los resultados estadísticos sin pH del optrodo en la mitad de la fibra óptica plástica, donde se observa que la desviación estándar es inferior a 0.5 con excepción de las fórmulas “Gleam” y “Luma”, las diferencias entre media, mediana y moda no supera las dos unidades, presentando gran concentración de los datos alrededor de la media en un rango de dispersión inferior a tres unidades, nuevamente a excepción de las fórmulas “Gleam” y “Luma” que superan las siete unidades.

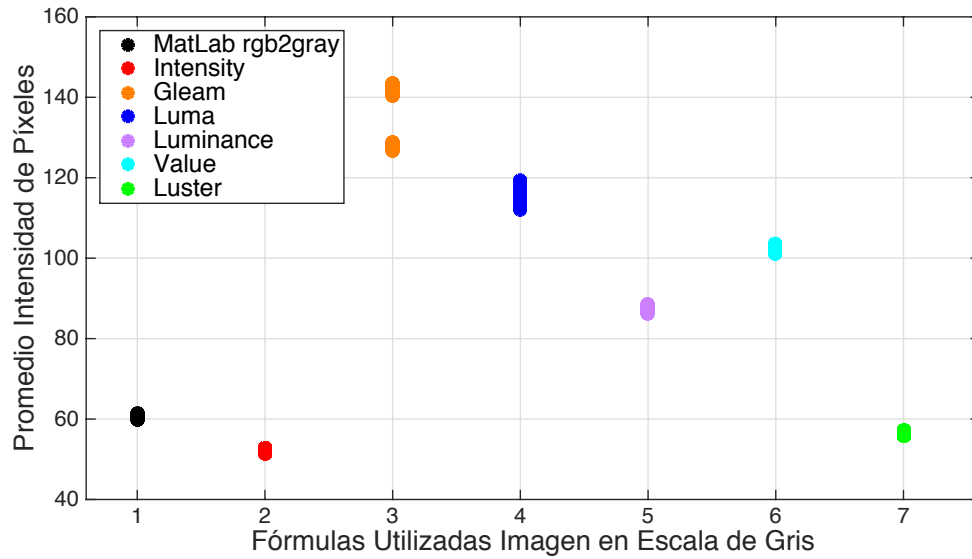


Figura 5.12: Resultado 1000 Datos Sin pH Optrodo en la Mitad de la F.O.P.

Tabla 5.11: Datos Estadísticos 1000 Muestras Sin pH Optrodo en la Mitad de la F.O.P.

Fórmulas Escala de Gris	MatLab rgb2gray	Intensity	Gleam	Luma	Luminance	Value	Luster
Media	60.6101	52.0592	138.9488	116.3449	87.4303	102.1888	56.4257
Mediana	60.6184	52.0482	141.5869	116.3846	87.4252	102.1553	56.4321
Moda	60.2161	51.9610	127.9018	114.4658	86.8741	101.8383	56.0956
Varianza ( $\sigma^2$ )	0.068125	0.060773	32.05031	1.283368	0.165937	0.161693	0.069183
Desv. Std. ( $\sigma$ )	0.261007	0.246522	5.661299	1.132858	0.407354	0.402112	0.263026
Mínimo Valor	59.9391	51.4626	126.7179	112.0796	86.3404	101.1563	55.7296
Máximo Valor	61.4606	52.8642	143.3945	119.3489	88.5368	103.6818	57.2391
R - Dispersión	1.5216	1.4016	16.6766	7.2693	2.1964	2.5255	1.5094

En la Figura 5.13, se muestran los resultados de los Buffer de 4.01, 5.00, 6.00, 7.00, 7.40, 8.00, 9.00, y 10.00 unidades de pH, respecto al promedio de intensidad de los píxeles en escala de gris para cada imagen de las 1000 muestras captadas, con el optrodo en la mitad de la fibra óptica plástica. Nuevamente, el color negro representa las muestras obtenidas con la fórmula “MatLab rgb2gray”, el color rojo representa las muestras obtenidas con la fórmula “Intensity”, el color naranja representa las muestras obtenidas con la fórmula “Gleam”, el color azul representa las muestras obtenidas con la fórmula “Luma”, el color magenta representa las muestras obtenidas con la fórmula “Luminance”, el color cian representa las muestras obtenidas con la fórmula “Value” y el color verde representa las muestras obtenidas con la fórmula “Luster”.

Como en el optrodo anterior, en esta gráfica (Figura 5.13) también se observa que hay variaciones en el promedio de intensidad de píxeles respecto a los buffer de pH, nuevamente reafirmando la dependencia de pH al promedio de intensidad de píxeles como

lo mencionamos anteriormente. Posteriormente, continuamos con el análisis estadístico del promedio de intensidad de los píxeles en la imagen en escala de gris, con la finalidad de encontrar una fórmula en este optrodo que presente un ajuste de curva respecto a la media de intensidad de píxeles que sea igual o superior al 95 %.

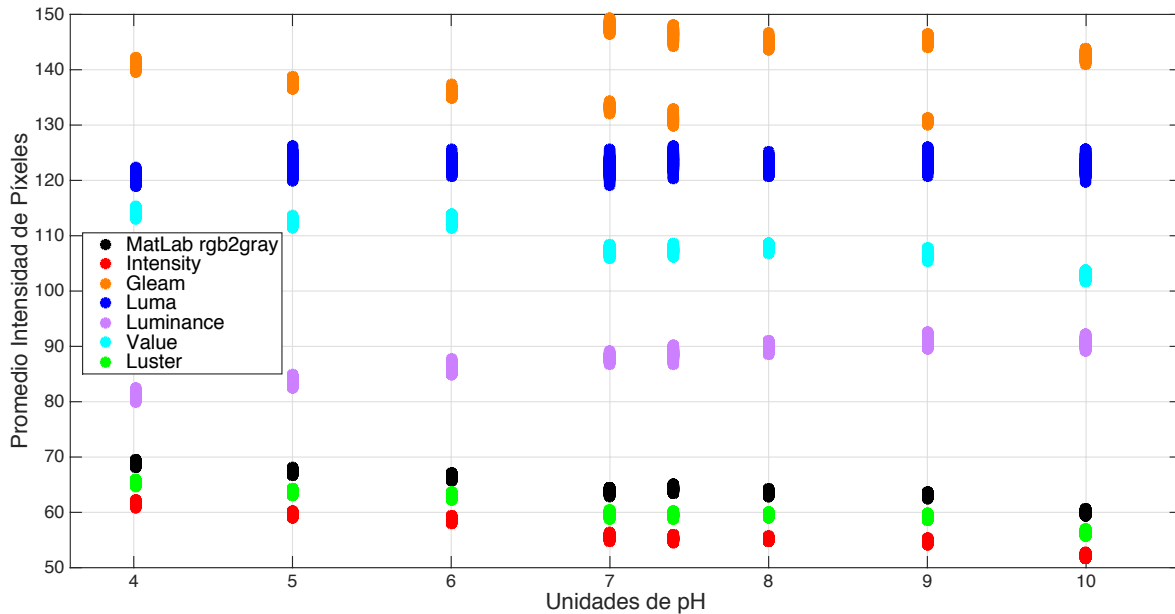


Figura 5.13: Resultado Datos Totales Optrodo en la Mitad de la F.O.P.

La Tabla 5.12, muestra los resultados estadísticos de la fórmula “MatLab rgb2gray” del optrodo en la mitad de la fibra óptica plástica, donde se observa que la desviación estándar es inferior a 0.5, las diferencias entre media, mediana y moda no supera las dos unidades, presentando gran concentración de los datos alrededor de la media en un rango de dispersión inferior a dos unidades.

Tabla 5.12: Resultado Datos Estadísticos Fórmula “MatLab rgb2gray” Optrodo en la Mitad de la F.O.P.

Buffer pH	4.01	5.00	6.00	7.00	7.40	8.00	9.00	10.00
Media	68.8610	67.3427	66.4385	63.7208	64.2535	63.6409	63.0966	60.0101
Mediana	68.8644	67.3335	66.4425	63.7324	64.2538	63.6667	63.0901	60.0007
Moda	68.5846	67.403	66.3051	63.3777	63.6487	63.1701	62.7663	60.0459
Varianza ( $\sigma^2$ )	0.043479	0.055708	0.051824	0.10205	0.090081	0.05302	0.043786	0.054
Desv. Std. ( $\sigma$ )	0.20852	0.23603	0.22765	0.31945	0.30013	0.23026	0.20925	0.23238
Mínimo Valor	68.0255	66.6979	65.6918	62.8807	63.4538	62.9442	62.4941	59.3478
Máximo Valor	69.5049	68.0435	67.1712	64.516	65.0539	64.2719	63.7279	60.6024
R - Dispersión	1.4794	1.3456	1.4794	1.6352	1.6001	1.3277	1.2338	1.2546



La Figura 5.14 muestra los datos totales para la fórmula “MatLab rgb2gray” (puntos en color negro, en concordancia con la Figura 5.13), así como las curvas obtenidas a partir de la media (puntos en color magenta, calculados en la Tabla 5.12), donde se observa que para un rango de 4 a 9 unidades de pH se obtiene un ajuste lineal (color cian) de 91.74 % y un ajuste polinómico (color verde) de 93.84 %; para un rango de 4 a 10 unidades de pH se obtiene un ajuste lineal (color azul) de 93.92 % y un ajuste polinómico (color rojo) de 92.73 %, donde se observa gran mejora en los resultados con ajustes de curva superiores al 90 %, sin embargo todavía no llegan al 95 % deseado.

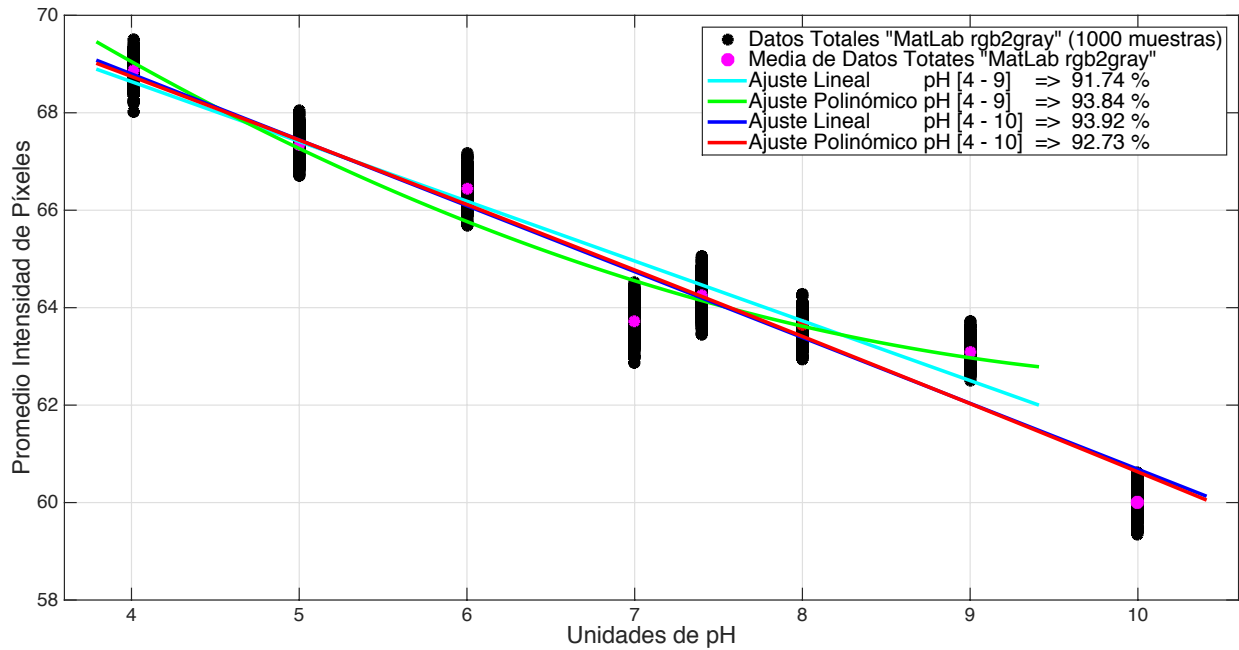


Figura 5.14: Curva Característica “MatLab rgb2gray” Optrodo en la Mitad de la F.O.P.

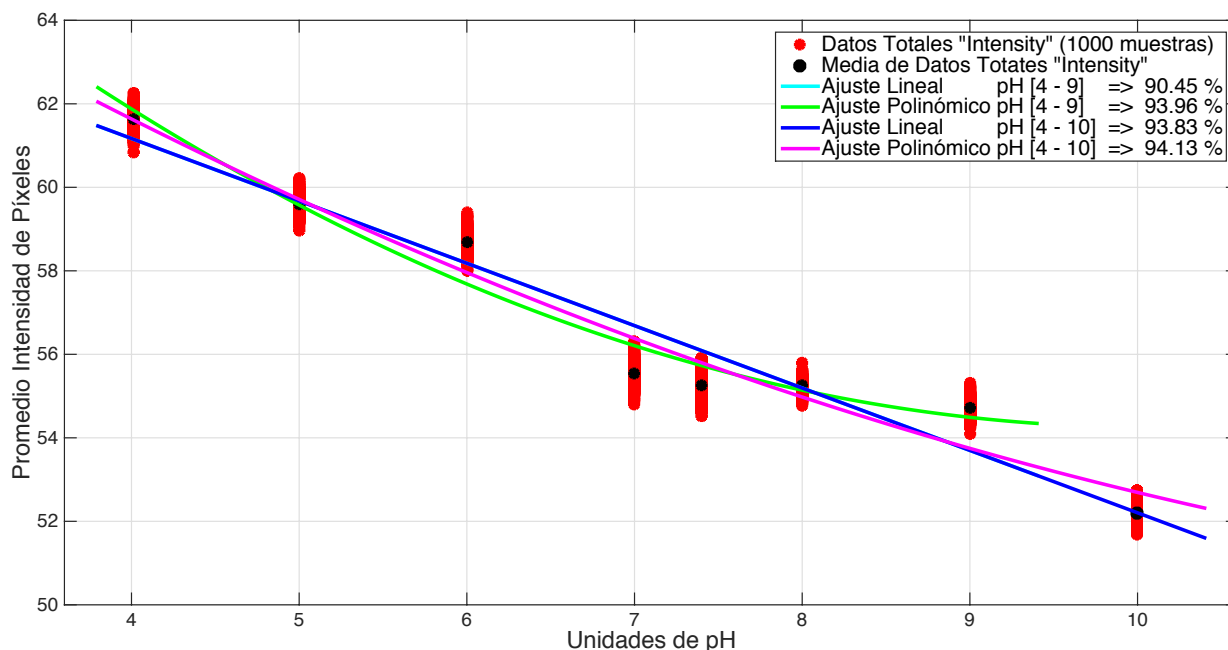
Tabla 5.13: Resultado Datos Estadísticos Fórmula “Intensity” Optrodo en la Mitad de la F.O.P.

Buffer pH	4.01	5.00	6.00	7.00	7.40	8.00	9.00	10.00
Media	61.6246	59.5972	58.6847	55.5508	55.2575	55.2481	54.7165	52.2017
Mediana	61.6344	59.5846	58.6785	55.5554	55.2694	55.2623	54.7103	52.1828
Moda	61.382	59.4351	58.6363	55.1319	55.2145	55.0136	54.5342	51.7916
Varianza ( $\sigma^2$ )	0.037817	0.042613	0.043231	0.087677	0.064059	0.026605	0.039466	0.049769
Desv. Std. ( $\sigma$ )	0.19447	0.20643	0.20792	0.2961	0.2531	0.16311	0.19866	0.22309
Mínimo Valor	60.8513	58.9673	58.0109	54.811	54.5341	54.7676	54.0878	51.6967
Máximo Valor	62.2542	60.2268	59.3965	56.3099	55.9222	55.7818	55.3242	52.7393
R - Dispersión	1.4029	1.2595	1.3856	1.4989	1.3881	1.0142	1.2364	1.0426

La Tabla 5.13, muestra los resultados estadísticos de la fórmula “Intensity” del optrodo en la mitad de la fibra óptica plástica, donde se observa que la desviación

estándar es inferior a 0.5, las diferencias entre media, mediana y moda no supera la unidad, presentando gran concentración de los datos alrededor de la media en un rango de dispersión inferior a dos unidades.

La Figura 5.15 muestra los datos totales para la fórmula “Intensity” (puntos en color rojo, en concordancia con la Figura 5.13), así como las curvas obtenidas a partir de la media (puntos en color negro, calculados en la Tabla 5.13), donde se observa que para un rango de 4 a 9 unidades de pH se obtiene un ajuste lineal (color cian) de 90.45 % y un ajuste polinómico (color verde) de 93.96 %; para un rango de 4 a 10 unidades de pH se obtiene un ajuste lineal (color azul) de 93.83 % y un ajuste polinómico (color magenta) de 94.13 %, donde se observa que estamos muy cerca de obtener un 95 % de ajuste de curva, valor mínimo esperado.



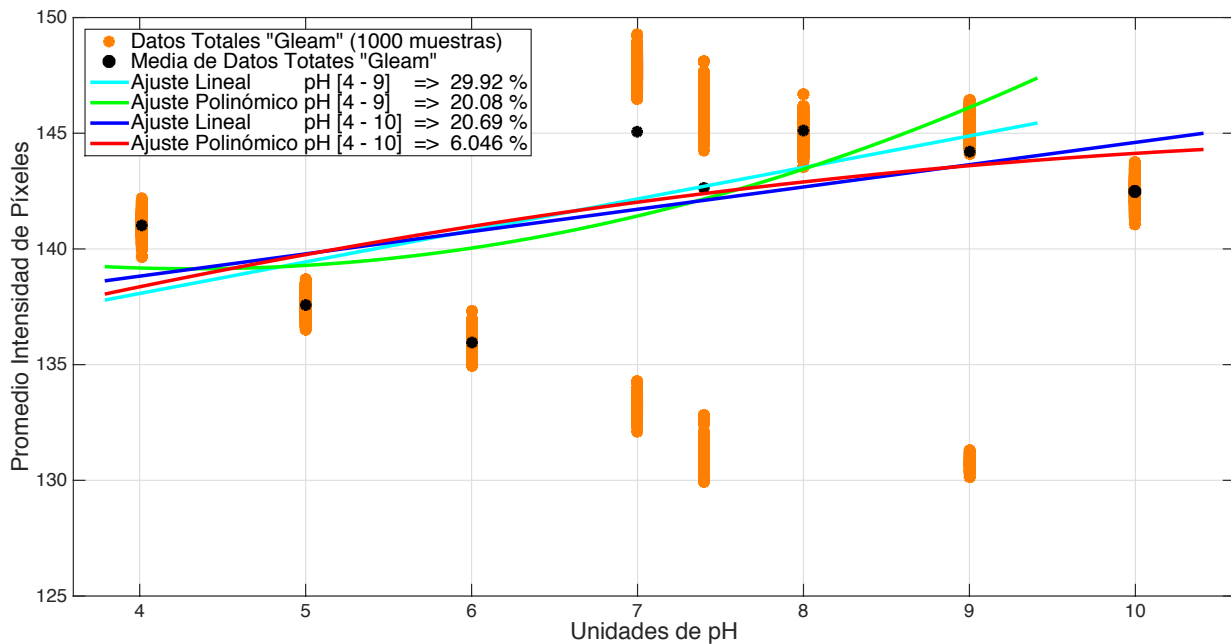
**Figura 5.15:** Curva Característica “Intensity” Optrodo en la Mitad de la F.O.P.

La Tabla 5.14, muestra los resultados estadísticos de la fórmula “Glean” del optrodo en la mitad de la fibra óptica plástica, donde se observa que la desviación estándar es superior a 3, las diferencias entre media, mediana y moda supera las tres unidades, presentando gran dispersión de los datos en un rango superior a dieciséis unidades. Esta fórmula al presentar una desviación estándar superior a 3 unidades ya es una razón suficiente para descartarla.

**Tabla 5.14:** Resultado Datos Estadísticos Fórmula “Gleam” Optrodo en la Mitad de la F.O.P.

Buffer pH	4.01	5.00	6.00	7.00	7.40	8.00	9.00	10.00
Media	141.0423	137.596	135.938	145.063	142.6554	145.1376	144.2182	142.4619
Mediana	141.0766	137.5857	135.9302	147.5896	146.0313	145.1582	145.3101	142.459
Moda	140.1132	137.1717	135.6231	133.9867	129.9988	143.9512	144.3644	141.355
Varianza ( $\sigma^2$ )	0.16107	0.17378	0.15404	32.2124	42.725	0.19701	15.5553	0.22374
Desv. Std. ( $\sigma$ )	0.40134	0.41687	0.39249	5.6756	6.5364	0.44386	3.944	0.47301
Mínimo Valor	139.6698	136.5146	134.9648	132.1243	129.9204	143.5469	130.161	141.0688
Máximo Valor	142.1782	138.665	137.3159	149.2459	148.079	146.6946	146.433	143.7578
R - Dispersión	2.5084	2.1504	2.3511	17.1216	18.1586	3.1477	16.272	2.689

La Figura 5.16 muestra los datos totales para la fórmula “Gleam” (puntos en color naranja, en concordancia con la Figura 5.13), así como las curvas obtenidas a partir de la media (puntos en color negro, calculados en la Tabla 5.14), donde se observa que para un rango de 4 a 9 unidades de pH se obtiene un ajuste lineal (color cian) de 29.92 % y un ajuste polinómico (color verde) de 20.08 %; para un rango de 4 a 10 unidades de pH se obtiene un ajuste lineal (color azul) de 20.69 % y un ajuste polinómico (color rojo) de 6.046 %, donde los ajustes de curva no son suficientes para tenerlos en cuenta.



**Figura 5.16:** Curva Característica “Gleam” Optrodo en la Mitad de la F.O.P.

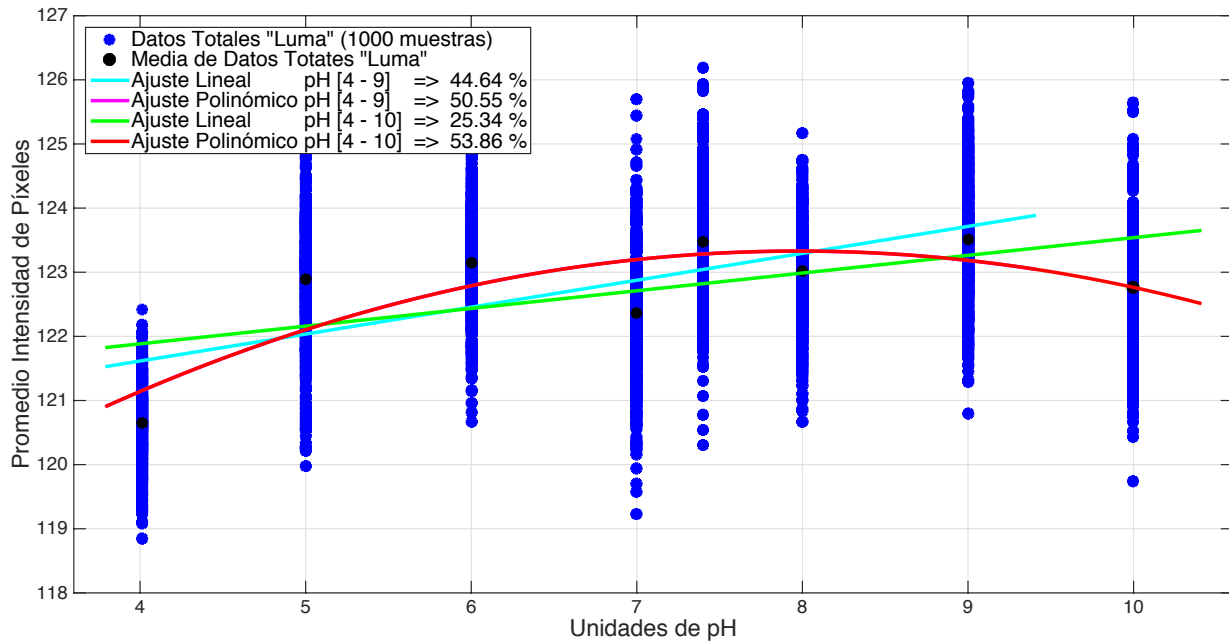
La Tabla 5.15, muestra los resultados estadísticos de la fórmula “Luma” del optrodo en la mitad de la fibra óptica plástica, donde se observa que la desviación estándar es inferior a 1, las diferencias entre media, mediana y moda supera las tres unidades,

presentando gran dispersión de los datos en un rango superior a cuatro unidades.

**Tabla 5.15:** Resultado Datos Estadísticos Fórmula “Luma” Optrodo en la Mitad de la F.O.P.

Buffer pH	4.01	5.00	6.00	7.00	7.40	8.00	9.00	10.00
Media	120.6446	122.8902	123.1463	122.3564	123.4771	123.0123	123.5114	122.7643
Mediana	120.6676	123.0605	123.1965	122.3428	123.4852	123.0737	123.4843	122.7439
Moda	120.2388	120.2592	120.9578	121.2014	122.2023	120.6631	122.7002	120.5319
Varianza ( $\sigma^2$ )	0.38156	0.9567	0.54959	0.9024	0.89102	0.56087	0.85883	0.87375
Desv. Std. ( $\sigma$ )	0.61771	0.97811	0.74135	0.94995	0.94394	0.74891	0.92673	0.93474
Mínimo Valor	118.8452	119.9795	120.6696	119.2223	120.3107	120.6631	120.7989	119.7369
Máximo Valor	122.4099	126.1691	125.5397	125.6957	126.1963	125.1771	125.9468	125.6438
R - Dispersión	3.5647	6.1894	4.8701	6.4734	5.8856	4.8664	5.1479	5.9069

La Figura 5.17 muestra los datos totales para la fórmula “Luma” (puntos en color azul, en concordancia con la Figura 5.13), así como las curvas obtenidas a partir de la media (puntos en color negro, calculados en la Tabla 5.15), donde se observa que para un rango de 4 a 9 unidades de pH se obtiene un ajuste lineal (color cian) de 44.64% y un ajuste polinómico (color magenta) de 50.55%; para un rango de 4 a 10 unidades de pH se obtiene un ajuste lineal (color verde) de 25.34% y un ajuste polinómico (color rojo) de 53.86%, donde los ajustes de curva no son suficientes para tenerlos en cuenta.



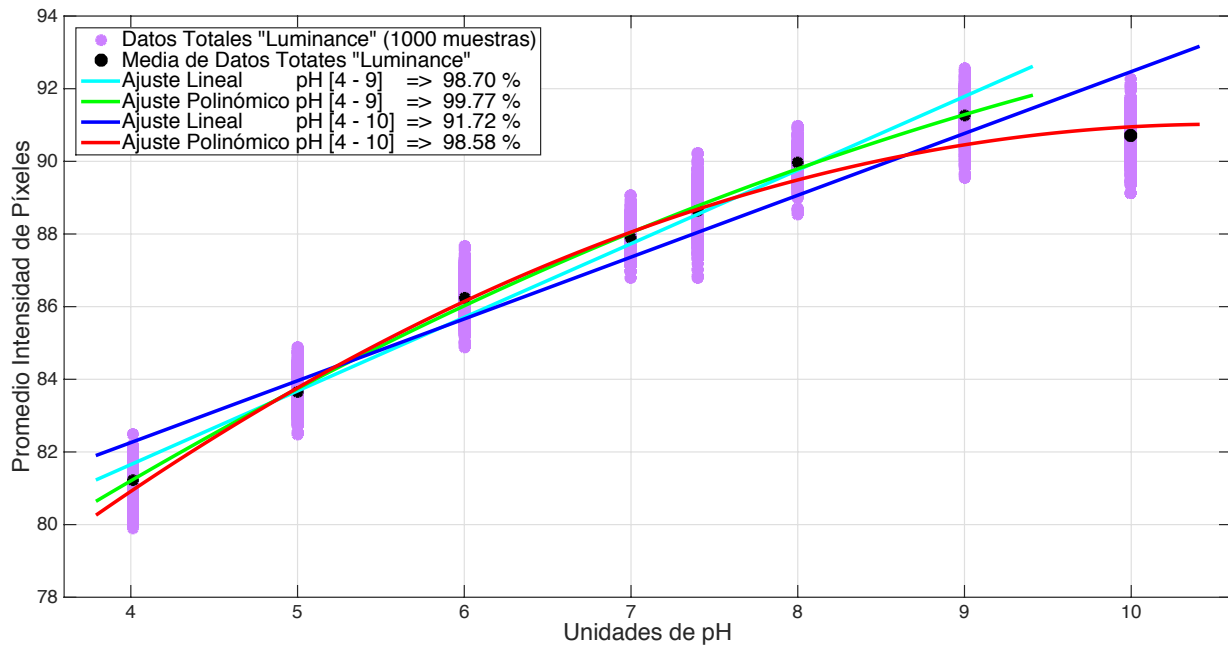
**Figura 5.17:** Curva Característica “Luma” Optrodo en la Mitad de la F.O.P.

La Tabla 5.16, muestra los resultados estadísticos de la fórmula “Luminance” del

optrodo en la mitad de la fibra óptica plástica, donde se observa que la desviación estándar es inferior a 1, las diferencias entre media, mediana y moda no supera las dos unidades, presentando gran concentración de los datos alrededor de la media en un rango de dispersión inferior a cuatro unidades.

**Tabla 5.16:** Resultado Datos Estadísticos Fórmula “Luminance” Optrodo en la Mitad de la F.O.P.

Buffer pH	4.01	5.00	6.00	7.00	7.40	8.00	9.00	10.00
Media	81.2377	83.6659	86.2301	87.8915	88.6396	89.9601	91.262	90.7222
Mediana	81.2775	83.6409	86.2843	87.8787	88.6371	89.9718	91.2891	90.753
Moda	80.6612	83.7669	86.3781	88.0377	87.9132	89.735	90.7371	89.1405
Varianza ( $\sigma^2$ )	0.17668	0.17747	0.26765	0.11676	0.33612	0.13501	0.28395	0.25961
Desv. Std. ( $\sigma$ )	0.42033	0.42127	0.51735	0.34171	0.57976	0.36744	0.53287	0.50952
Mínimo Valor	79.8899	82.4818	84.8935	86.7781	86.797	88.5346	89.5527	89.1405
Máximo Valor	82.4889	84.8898	87.6819	89.0732	90.2141	90.9695	92.5594	92.2529
R - Dispersión	2.599	2.408	2.7884	2.2951	3.4171	2.4349	3.0067	3.1124



**Figura 5.18:** Curva Característica “Luminance” Optrodo en la Mitad de la F.O.P.

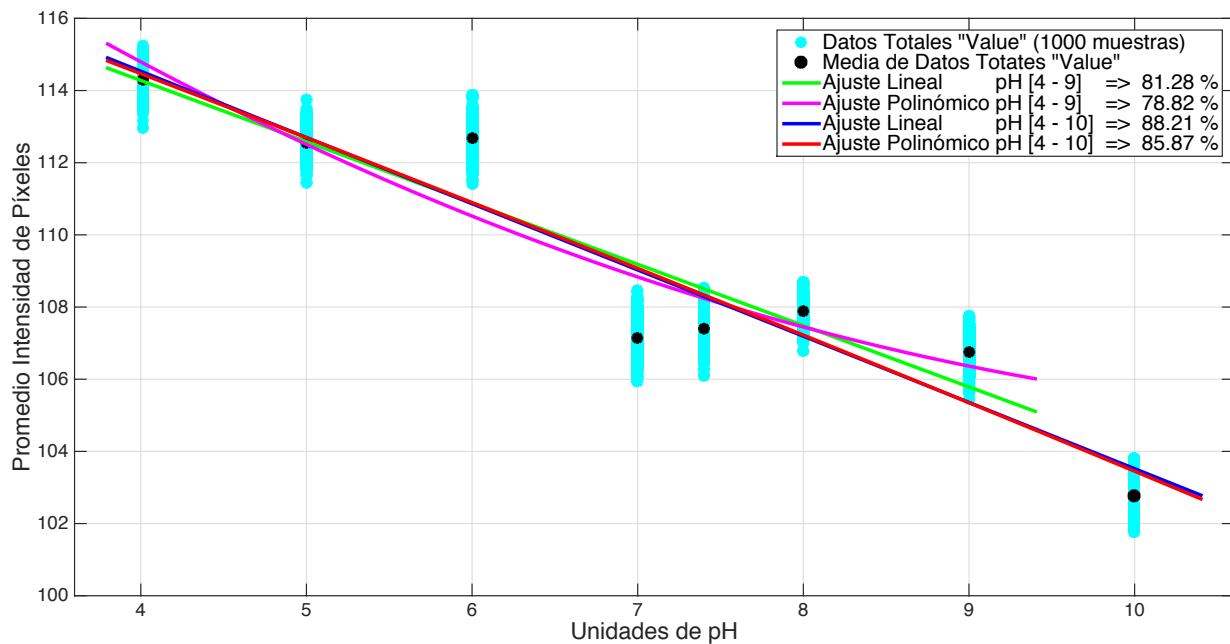
La Figura 5.18 muestra los datos totales para la fórmula “Luminance” (puntos en color magenta, en concordancia con la Figura 5.13), así como las curvas obtenidas a partir de la media (puntos en color negro, calculados en la Tabla 5.16), donde se observa que para un rango de 4 a 9 unidades de pH se obtiene un ajuste lineal (color cian) de 98.70 % y un ajuste polinómico (color verde) de 99.77%; para un rango de 4 a 10 unidades de pH

se obtiene un ajuste lineal (color azul) de 91.72% y un ajuste polinómico (color rojo) de 98.58%, donde obtenemos excelentes ajustes de curva cuyos resultados estábamos esperando encontrar.

La Tabla 5.17, muestra los resultados estadísticos de la fórmula “Value” del optrodo en la mitad de la fibra óptica plástica, donde se observa que la desviación estándar es inferior a 0.5, las diferencias entre media, mediana y moda no supera las dos unidades, presentando gran concentración de los datos alrededor de la media en un rango de dispersión inferior a tres unidades.

**Tabla 5.17:** Resultado Datos Estadísticos Fórmula “Value” Optrodo en la Mitad de la F.O.P.

Buffer pH	4.01	5.00	6.00	7.00	7.40	8.00	9.00	10.00
Media	114.3041	112.5596	112.6655	107.1408	107.3884	107.8864	106.7417	102.7832
Mediana	114.3189	112.5668	112.6637	107.1108	107.3941	107.9139	106.743	102.7646
Moda	114.5238	112.5891	113.0109	106.6032	106.5668	108.0000	105.7733	101.9136
Varianza ( $\sigma^2$ )	0.1076	0.12678	0.14829	0.21281	0.15564	0.098526	0.14628	0.17439
Desv. Std. ( $\sigma$ )	0.32802	0.35607	0.38509	0.46132	0.39451	0.31389	0.38247	0.4176
Mínimo Valor	112.9836	111.4604	111.4136	105.9408	106.1024	106.777	105.4514	101.7712
Máximo Valor	115.2469	113.7565	113.8881	108.4559	108.5325	108.6952	107.758	103.8015
R - Dispersión	2.2633	2.2961	2.4745	2.5151	2.4301	1.9182	2.3066	2.0303



**Figura 5.19:** Curva Característica “Value” Optrodo en la Mitad de la F.O.P.

La Figura 5.19 muestra los datos totales para la fórmula “Value” (puntos en color

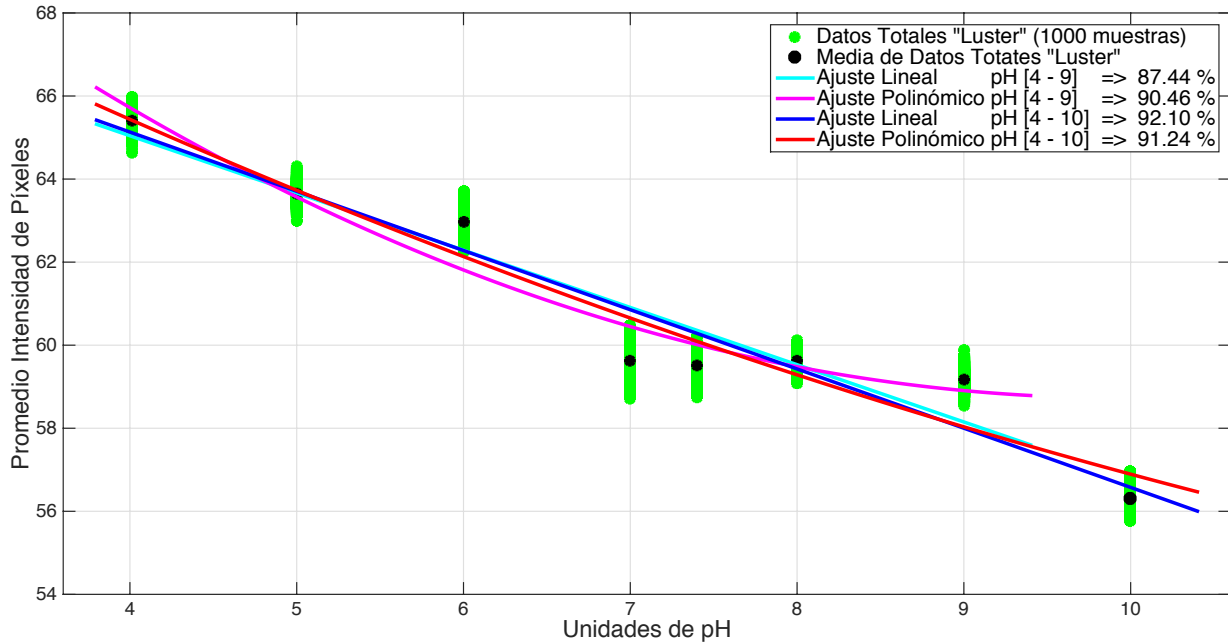
cian, en concordancia con la Figura 5.13), así como las curvas obtenidas a partir de la media (puntos en color negro, calculados en la Tabla 5.17), donde se observa que para un rango de 4 a 9 unidades de pH se obtiene un ajuste lineal (color verde) de 81.28 % y un ajuste polinómico (color magenta) de 78.82 %; para un rango de 4 a 10 unidades de pH se obtiene un ajuste lineal (color azul) de 88.21 % y un ajuste polinómico (color rojo) de 85.87 %, donde los ajustes de curva no son suficientes para tenerlos en cuenta, como en la fórmula anterior.

La Tabla 5.18, muestra los resultados estadísticos de la fórmula “Luster” del optrodo en la mitad de la fibra óptica plástica, donde se observa que la desviación estándar es inferior a 0.5, las diferencias entre media, mediana y moda no supera la unidad, presentando gran concentración de los datos alrededor de la media en un rango de dispersión inferior a dos unidades.

**Tabla 5.18:** Resultado Datos Estadísticos Fórmula “Luster” Optrodo en la Mitad de la F.O.P.

Buffer pH	4.01	5.00	6.00	7.00	7.40	8.00	9.00	10.00
Media	65.4103	63.6471	62.9627	59.6174	59.5075	59.6151	59.1674	56.3186
Mediana	65.4186	63.6369	62.9644	59.628	59.5008	59.6289	59.1591	56.295
Moda	65.1748	63.5896	62.8621	59.1127	59.0543	59.3616	59.0833	55.8479
Varianza ( $\sigma^2$ )	0.042866	0.047876	0.049473	0.11249	0.065287	0.030932	0.049631	0.064982
Desv. Std. ( $\sigma$ )	0.20704	0.2188	0.22242	0.3354	0.25551	0.17587	0.22278	0.25492
Mínimo Valor	64.6468	63.0026	62.2603	58.7131	58.7492	59.0855	58.5431	55.7769
Máximo Valor	65.9802	64.2924	63.7129	60.4833	60.2228	60.1039	59.8704	56.9553
R - Dispersión	1.3334	1.2898	1.4526	1.7702	1.4736	1.0184	1.3273	1.1784

La Figura 5.20 muestra los datos totales para la fórmula “Luster”(puntos en color verde, en concordancia con la Figura 5.13), así como las curvas obtenidas a partir de la media (puntos en color negro, calculados en la Tabla 5.18), donde se observa que para un rango de 4 a 9 unidades de pH se obtiene un ajuste lineal (color cian) de 87.44 % y un ajuste polinómico (color magenta) de 90.46 %; para un rango de 4 a 10 unidades de pH se obtiene un ajuste lineal (color azul) de 92.10 % y un ajuste polinómico (color rojo) de 91.24 %, donde los ajustes de curva no son suficientes para tenerlos en cuenta y cuyo mejor resultado lo obtuvimos con la fórmula “Luminance”.



**Figura 5.20:** Curva Característica “Luster” Optrodo en la Mitad de la F.O.P.

Del análisis de los resultados anteriormente expuestos, obtenidos con el optrodo en la mitad de la fibra óptica plástica, se concluye que más de la mitad de los porcentajes de ajuste de curva superan el 90 %, como se muestra en la Tabla 5.19, donde sobresalen las fórmulas “MatLab rgb2gray”, “Intensity” y “Luster”; obteniendo el mejor resultado con la fórmula “Luminance” con ajuste lineal del 98.70 % y con ajuste polinómico del 99.77 % en un rango de 4 a 9 unidades de pH, también la fórmula “Luminance” presenta un buen ajuste polinómico del 98.58 % en un rango de 4 a 10 unidades de pH.

**Tabla 5.19:** Porcentaje Ajuste de Curva Optrodo en la Mitad de la F.O.P.

Fórmulas Imagen en Color RGB a Escala de Gris	Porcentaje Ajuste de Curva			
	Ajuste Lineal pH [4 - 9]	Ajuste Polinómico pH [4 - 9]	Ajuste Lineal pH [4 - 10]	Ajuste Polinómico pH [4 - 10]
“MatLab rgb2gray”	91.74 %	93.84 %	93.92 %	92.73 %
“Intensity”	90.45 %	93.96 %	93.83 %	94.13 %
“Gleam”	29.92 %	20.08 %	20.69 %	6.046 %
“Luma”	44.64 %	50.55 %	25.34 %	53.86 %
“Luminance”	98.70 %	99.77 %	91.72 %	98.58 %
“Value”	81.28 %	78.82 %	88.21 %	85.87 %
“Luster”	87.44 %	90.46 %	92.10 %	91.24 %

Al igual que en electrónica cuando se implementa un ajuste de curva en un microcontrolador; con el mejor ajuste de curva obtenido en este proyecto de tesis, podemos



implementarla en el desarrollo de una aplicación nativa del smartphone, cuya representación está dada por la fórmula “Luminance” con ajuste lineal del 98.70 % y ajuste polinómico del 99.77 % para un rango de 4 a 9 unidades de pH; así mismo con ajuste polinómico del 98.58 % para un rango de 4 a 10 unidades de pH.

Por otra parte, se observa que independiente al ajuste de curva se obtiene buena concentración de los datos estadísticos tanto en el optrodo en el extremo final como el optrodo en la mitad de la fibra óptica plástica, donde la desviación estándar es inferior a 1, las diferencias entre media, mediana y moda no superan las 2 unidades entre sí, y el rango de dispersión de los datos es inferior a 4 unidades; exceptuando la fórmula “Gleam” y “Luma”, que presentan gran dispersión de los datos, donde el rango de dispersión supera las 4 unidades.

Cabe mencionar que el tiempo promedio de recolección y procesamiento de las 1000 muestras para cada buffer de pH es de aproximadamente 3 min, es decir, una muestra (imagen en color RGB) tarda aproximadamente 0.0257 s en ser procesada desde que es recibida en el software MatLab hasta que se obtiene un promedio de intensidad de píxel en escala de gris. Lo anterior, dependiendo del tráfico en la web debido a que los datos son transmitidos por Wi-Fi al dispositivo de procesamiento de la señal (computador).

Finalmente, en el Apéndice A se muestra un ejemplo de la dependencia de pH respecto a la intensidad de los píxeles en la imagen a color RGB, haciendo una analogía con el color de las longitudes de onda en el espectro de luz visible, correspondiente al trabajo realizado en este proyecto de tesis.

# Capítulo 6

## Conclusiones

Partiendo del objetivo general, el resultado de este trabajo concluye principalmente en la factibilidad de implementar un sensor óptico de pH en un smartphone, utilizando el flash led como fuente de bombeo y la cámara como receptor de la señal, donde la preparación de optrodos haciendo uso de la técnica Sol-Gel cumple un papel importante en la detección de pH en sustancias acuosas.

En la preparación de optrodos se descartó el uso de ácido nítrico utilizado en trabajos previos, encontrándose que únicamente con acetona es posible limpiar y generar porosidad para tener mayor adherencia al aplicar el Sol-Gel en la fibra óptica plástica. Por otra parte, los optrodos se preparan en un proceso lento mediante goteo constante de Sol-Gel, rotando y girando para impregnar completamente la fibra, cubriendo las grietas generadas por la solidificación del Sol-Gel expuesto completamente al medio ambiente.

Para obtener los resultados se tuvieron en cuenta dos optrodos, un optrodo en el extremo final de la fibra óptica plástica el cual se descarta debido a la poca fiabilidad en los resultados obtenidos, con la mitad de los porcentajes de ajuste de curva negativos y donde los porcentajes de ajuste de curva positivos no superan el 90 %. El otro optrodo en la mitad de la fibra óptica plástica, presenta los mejores resultados donde más de la mitad de los porcentajes de ajuste de curva superan el 90 %.

Los mejores resultados se obtuvieron con la fórmula “Luminance” (optrodo en la mitad de la fibra óptica plástica), con ajuste de curva lineal del 98.70 % y ajuste polinómico de grado dos del 99.77 % en un rango de 4 a 9 unidades de pH, y con ajuste polinómico de grado dos del 98.58 % en un rango de 4 a 10 unidades de pH.

## 6.1. Trabajos Futuros

- En futuros trabajos, se recomienda investigar alternativas de impregnar el Sol-Gel en la fibra, de tal forma que sea en un medio poco expuesto al medio ambiente para obtener mayor homogeneidad del Sol-Gel en la fibra.
- En futuros trabajos, se recomienda investigar por qué se obtienen resultados diferentes entre el optrodo en el extremo final de la F.O.P. y el optrodo en la mitad de la F.O.P., teniendo en cuenta que la absorción depende del área de contacto, del grosor de la película que se deposita en la fibra, entre otros.
- En futuros trabajos, se recomienda la implementación de una aplicación nativa en el smartphone, con la finalidad de evitar el tráfico en la web al transmitir por Wi-Fi y obtener mayor rapidez en el procesamiento de los datos.
- En futuros trabajos, se recomienda tener en cuenta pérdidas por curvatura en fibra óptica plástica, en consecuencia al arreglo experimental propuesto.

# Bibliografía

- [1] A. M. Alméciga Gómez y M. Muñoz Martínez. ph, historia de un concepto. análisis en textos de educación superior. *Universidad Pedagógica Nacional*, 2013.
- [2] B. E. Soledad Rodríguez. *Biosensores en la Industria*. Lulu.com, 05 2009.
- [3] R. Pallas. *Sensores y Acondicionadores de Senal, 4. Ed. (Spanish edition)*. Alfaomega - Marcombo, 02 2008.
- [4] E. Alvarado Méndez, R. Rojas Laguna, J. A. Andrade Lucio, D. Hernández Cruz, R. A. Lessard, and J. G. Aviña Cervantes. “Design and characterization of pH sensor based on sol–gel silica layer on plastic optical fiber”. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 106(2):518–522, May 2005.
- [5] R. J. Gillies, N. Raghunand, M. L. Garcia-Martin, and R. A. Gatenby. “pH imaging”. *IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine*, 23(5):57–64, Sept 2004.
- [6] K. S. Johnson. “Bioargo: A global scale chemical sensor network to observe carbon, oxygen, and nitrogen cycles in the ocean”. In *SENSORS, 2013 IEEE*, pages 1–1, Nov 2013.
- [7] V. Vijayaragavan, S. Vivek, S. Anu Aarthy, S. Raagavi, and N. Saranya. “pH automation in sugar industries”. In *Computer Communication and Informatics (ICCCI), 2015 International Conference on*, pages 1–5, Jan 2015.
- [8] Z. x. Shi and D. z. Zhu. 0.6/spl mu/m cmos ph sensor ic with si/sub 3/n/sub 4/ island structure. In *2006 8th International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology Proceedings*, pages 646–648, Oct 2006.
- [9] T. H. Tran, J. H. Kwon, K. S. Lee, J. W. Lee, and B. K. Ju. ph sensor using carbon nanotubes as sensing material. In *2006 First International Conference on Communications and Electronics*, pages 490–493, Oct 2006.
- [10] T. Hizawa, K. Sawada, H. Takao, and M. Ishida. Sensing characteristics of charge transfer type ph sensor by accumulative operation. In *2006 5th IEEE Conference on Sensors*, pages 144–147, Oct 2006.

- 
- [11] K. Arshak, E. I. Gill, A. Arshak, and O. Korostynska. Investigation of tio thick films as sensing layers in conductimetric ph sensors. In *2007 IEEE Sensors Applications Symposium*, pages 1–6, Feb 2007.
- [12] P. Christiaens, M. H. Abouzar, A. Poghosian, T. Wagner, N. Bijnens, O. A. Williams, M. Daenen, K. Haenen, M. J. Schoning, and P. Wagner. Nanocrystalline diamond-based field-effect capacitive ph sensor. In *TRANSDUCERS 2007 - 2007 International Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference*, pages 1891–1894, June 2007.
- [13] J. Matsuo, T. Hizawa, K. Sawada, H. Takao, and M. Ishida. Charge transfer type ph sensor with super high sensitivity. In *TRANSDUCERS 2007 - 2007 International Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference*, pages 1881–1884, June 2007.
- [14] J. Goicoechea, C. R. Zamarreno, I. R. Matias, and F. J. Arregui. Study on white light optical fiber interferometry for ph sensor applications. In *Sensors, 2007 IEEE*, pages 399–402, Oct 2007.
- [15] Z. Hotra, O. Aksimenteva, I. Hlushyk, V. Cherpak, and P. Stakhira. Fibre-optic ph sensor. In *Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications, and Computer Science, 2006. TCSET 2006. International Conference*, pages 673–674, Feb 2006.
- [16] J. I. Kim, Z. Ding, S. N. Lee, J. G. Yook, B. Ziaie, and D. Peroulis. Hydrogel-based integrated antenna-ph sensor. In *Sensors, 2007 IEEE*, pages 695–698, Oct 2007.
- [17] H. Aizawa, K. Ohkubo, T. Katsumata, and S. Komuro. Multi-channel optical ph sensor using organic dye. In *Control, Automation and Systems, 2007. ICCAS '07. International Conference on*, pages 2365–2368, Oct 2007.
- [18] A. Arshak, E. I. Gill, K. Arshak, O. Korostynska, and C. Cunniffe. Drop-coated polyaniline composite conductimetric ph sensors. In *2007 30th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE)*, pages 213–218, May 2007.
- [19] K. G. Ong, E. L. Tan, C. A. Grimes, and R. Shao. Removal of temperature and earth's field effects of a magnetoelastic ph sensor. *IEEE Sensors Journal*, 8(4):341–346, April 2008.
- [20] L. Shi, Li Cai, E. Li, Z. Liang, and Z. Hou. Nonlinear calibration of ph sensor based on the back-propagation neural network. In *Networking, Sensing and Control, 2008. ICNSC 2008. IEEE International Conference on*, pages 1300–1304, April 2008.
- [21] W. Bunjongpru, S. Porntheeraphat, O. Trithaveesak, N. Somwang, P. Khomdet, W. Jeamsaksiri, C. Hruanun, A. Poyai, and J. Nukeaw. The innovative aln-isfet based ph sensor. In *Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, 2008. ECTI-CON 2008. 5th International Conference on*, volume 2, pages 833–836, May 2008.

- 
- [22] K. Shitashima, Y. Koike, M. Kyo, and A. Hemmi. Development of electrochemical in-situ ph-pco2 sensor for deep-sea oceanography applications. In *Sensors, 2008 IEEE*, pages 1414–1417, Oct 2008.
- [23] R. A. Rani, M. I. Syono, and A. S. Ramli. Characterizations of single gate and multi-finger gate of isfet for ph sensor applications. In *Solid-State and Integrated-Circuit Technology, 2008. ICSICT 2008. 9th International Conference on*, pages 2577–2580, Oct 2008.
- [24] M. Suzuki, T. Yamada, S. Kato, and Y. Iribe. Detection of single cell activity by using fluorescence-based multiscale ph and oxygen sensors. In *Micro-NanoMechatronics and Human Science, 2008. MHS 2008. International Symposium on*, pages 311–316, Nov 2008.
- [25] H. S. Huang, C. W. Lin, and H. C. Chiu. High sensitivity ph sensor using alxga1-xn/gan hemt heterostructure design. In *Electron Devices and Solid-State Circuits, 2008. EDSSC 2008. IEEE International Conference on*, pages 1–4, Dec 2008.
- [26] A. Kargar and J. M. Blain Christen. Theoretical investigation of silicon nanowire ph sensor. In *2008 2nd IEEE RAS EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics*, pages 765–769, Oct 2008.
- [27] R. A. Rani, M. I. Syono, and A. S. Ramli. Multi-finger gate isfet (mf-isfet) for ph sensor application. In *Semiconductor Electronics, 2008. ICSE 2008. IEEE International Conference on*, pages 350–353, Nov 2008.
- [28] C. C. Mayorga Martinez, R. E. Madrid, and C. J. Felice. A ph sensor based on a stainless steel electrode electrodeposited with iridium oxide. *IEEE Transactions on Education*, 52(1):133–136, Feb 2009.
- [29] J. Eroles, A. Bengoechea, M. A. Sanchez-Garcia, and F. Calle. Characterization of a ph sensor based on an algian/gan transistor. In *2009 Spanish Conference on Electron Devices*, pages 242–245, Feb 2009.
- [30] E. I. Gill, A. Arshak, K. Arshak, and O. Korostynska. Investigation of thick-film polyaniline-based conductimetric ph sensors for medical applications. *IEEE Sensors Journal*, 9(5):555–562, May 2009.
- [31] L. Rovati, P. Fabbri, and F. Pilati. Development of a low-cost ph sensor based on plastic optical fibers. In *Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2009. I2MTC '09. IEEE*, pages 1662–1665, May 2009.
- [32] U. Hashim and M. N. Haron. Design of digital display system for isfet ph sensor by using pic microcontroller unit (mcu). In *Quality Electronic Design, 2009. ASQED 2009. 1st Asia Symposium on*, pages 148–152, July 2009.

- 
- [33] Z. Dong, U. C. Wejinya, H. Yu, and I. H. Elhajj. Design, fabrication and testing of cnt based isfet for nano ph sensor application: A preliminary study. In *2009 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, pages 1556–1561, July 2009.
- [34] E. I. Gill, A. Arshak, K. Arshak, and O. Korostynska. Conductimetric ph sensor based on novel conducting polymer composite thick films. In *2008 31st International Spring Seminar on Electronics Technology*, pages 478–483, May 2008.
- [35] C. F. Yang, C. L. Chen, A. Busnaina, and M. R. Dokmeci. Single-walled carbon nanotube based ph sensors on a flexible parylene-c substrate. In *2009 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, pages 4102–4105, Sept 2009.
- [36] S. Sirimasakul, A. Thanachayanont, and W. Jeamsaksiri. Low-power current-mode logarithmic pipeline analog-to-digital converter for isfet based ph sensor. In *Communications and Information Technology, 2009. ISCIT 2009. 9th International Symposium on*, pages 1340–1343, Sept 2009.
- [37] A. Prakash, A. Das, S. Maikap, and C. S. Lai. ph sensor using protein-mediated gold nanocrystal array. In *Nanotechnology, 2009. IEEE-NANO 2009. 9th IEEE Conference on*, pages 854–857, July 2009.
- [38] H. Nakazawa, H. Ishii, M. Ishida, and K. Sawada. A fused ph and fluorescence sensor using the same sensing area. In *Sensors, 2009 IEEE*, pages 920–923, Oct 2009.
- [39] M. Futagawa, T. Iwasaki, H. Takao, M. Ishida, K. Sawada, H. Takao, M. Ishida, and K. Sawada. Fabrication of a multi-modal sensor with ph, ec and temperature sensing areas for agriculture application. In *Sensors, 2009 IEEE*, pages 2013–2016, Oct 2009.
- [40] S. Dutta, S. Basak, R. Kumar, and P. K. Samanta. Fabrication of intensity based fiber optic ph sensor. In *2010 3rd International Nanoelectronics Conference (INEC)*, pages 370–371, Jan 2010.
- [41] Y. S. Yu, H. K. Park, S. W. Hwang, and D. Ahn. Analytic model of a silicon nanowire ph sensor. In *2010 3rd International Nanoelectronics Conference (INEC)*, pages 656–657, Jan 2010.
- [42] K. Shitashima. Evolution of compact electrochemical in-situ ph-pco<sub>2</sub> sensor using isfet-ph electrode. In *OCEANS 2010 MTS/IEEE SEATTLE*, pages 1–4, Sept 2010.
- [43] Z. Yang, M. Nakajima, Y. Ode, Zhenhai Zhang, and T. Fukuda. Fabrication and evaluation of nano probe ph sensor based on nanorobotic manipulation. In *Micro-NanoMechatronics and Human Science (MHS), 2010 International Symposium on*, pages 284–289, Nov 2010.

- [44] Z. Yang, M. Nakajima, Y. Ode, and T. Fukuda. Nanoassembly of ph sensor nanoprobe by mutiple-metallic nanowires. In *Nanotechnology (IEEE-NANO), 2010 10th IEEE Conference on*, pages 352–355, Aug 2010.
- [45] N. Klejwa, J. Provine, and R. T. Howe. ph sensor demonstrating a layout programmable squeeze pumped microfluidic platform. In *Sensors, 2010 IEEE*, pages 936–939, Nov 2010.
- [46] W. H. Choi, J. R. Shann, and I. Papautsky. Multi-analyte needle-type sensor for measurement of ph, phosphate, and redox potential in soil. In *Sensors, 2010 IEEE*, pages 931–935, Nov 2010.
- [47] S. Bhadra, G. E. Bridges, D. J. Thomson, and M. S. Freund. A wireless passive ph sensor based on ph electrode potential measurement. In *Sensors, 2010 IEEE*, pages 927–930, Nov 2010.
- [48] I. Yulianti, A. S. M. Supa’at, S. M. Idrus, N. M. Kassim, and A. M. Al-hetar. Fiber bragg grating based ph sensor. In *Enabling Science and Nanotechnology (ESciNano), 2010 International Conference on*, pages 1–2, Dec 2010.
- [49] Y. Nakano and H. Yoshida. Development of in situ co2 and ph sensor (hybrid co2-ph sensor: Hcs) for auv. In *Underwater Technology (UT), 2011 IEEE Symposium on and 2011 Workshop on Scientific Use of Submarine Cables and Related Technologies (SSC)*, pages 1–2, April 2011.
- [50] A. Manut, A. S. Zoolfakar, R. A. Rani, and M. Zolkapli. Mechanical parameters characterization of planar fef fingers for ph sensor. In *Electronic Devices, Systems and Applications (ICEDSA), 2011 International Conference on*, pages 191–194, April 2011.
- [51] S. Y. Yang, C. W. Chen, and J. C. Chou. Investigation on the sensitivity of tio2: Ru ph sensor by taguchi design of experiment. In *Nanoelectronics Conference (INEC), 2011 IEEE 4th International*, pages 1–2, June 2011.
- [52] H. J. Yoon, Y. Zhang, S. S. Kim, M. M. C. Cheng, and Z. Zhou. A flexible biocompatible graphene sensor for real-time monitoring of ph and protein. In *Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (NEMS), 2011 IEEE International Conference on*, pages 1104–1107, Feb 2011.
- [53] S. Bhadra, G. E. Bridges, D. J. Thomson, and M. S. Freund. Electrode potential-based coupled coil sensor for remote ph monitoring. *IEEE Sensors Journal*, 11(11):2813–2819, Nov 2011.
- [54] J. S. Lee, S. Kim, K. Kim, T. Rim, Y. H. Jeong, and M. Meyyappan. Nanoscale silicon ion-sensitive field-effect transistors for ph sensor and biosensor applications. In *Electron Devices and Solid-State Circuits (EDSSC), 2011 International Conference of*, pages 1–2, Nov 2011.



- [55] V. Schulz, H. Ebert, and G. Gerlach. A novel miniaturizable closed-loop hydrogel-based ph sensor. In *Sensors, 2011 IEEE*, pages 592–595, Oct 2011.
- [56] D. Puchberger-Enengl, C. Krutzler, and M. J. Vellekoop. Organically modified silicate film ph sensor for continuous wound monitoring. In *Sensors, 2011 IEEE*, pages 679–682, Oct 2011.
- [57] A. A. Khan and M. Rihan. Smart ph sensor for condition monitoring of insulators in the smart grid. In *Innovative Smart Grid Technologies - India (ISGT India), 2011 IEEE PES*, pages 274–277, Dec 2011.
- [58] H. Cao, V. Landge, U. Tata, Y. S. Seo, S. Rao, S. J. Tang, H. F. Tibbals, S. Spechler, and J. C. Chiao. An implantable, batteryless, and wireless capsule with integrated impedance and ph sensors for gastroesophageal reflux monitoring. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 59(11):3131–3139, Nov 2012.
- [59] J. C. Mau, M. Y. Fu, G. R. Lin, and W. F. Liu. Fiber ph sensor based on long period gratings. In *Sensors, 2012 IEEE*, pages 1–3, Oct 2012.
- [60] S. Bhadra, D. J. Thomson, and G. E. Bridges. A wireless passive ph sensor for real-time in vivo milk quality monitoring. In *Sensors, 2012 IEEE*, pages 1–4, Oct 2012.
- [61] B. Gupta, R. Prakash, and A. Melvin. Chemical synthesis of polycarbazole (pcz), modification and ph sensor application. In *Sensing Technology (ICST), 2012 Sixth International Conference on*, pages 365–369, Dec 2012.
- [62] J. L. Chiang and C. Y. Kuo. Study on the characterizations and applications of the ph-sensor with gzo/glass extended-gate fet. In *Nanoelectronics Conference (INEC), 2013 IEEE 5th International*, pages 498–501, Jan 2013.
- [63] K. B. Parizi, A. J. Yeh, A. S. Y. Poon, and H. S. P. Wong. Exceeding nernst limit (59mv/ph): Cmos-based ph sensor for autonomous applications. In *Electron Devices Meeting (IEDM), 2012 IEEE International*, pages 24.7.1–24.7.4, Dec 2012.
- [64] S. Bhadra, D. S. Y. Tan, D. J. Thomson, M. S. Freund, and G. E. Bridges. A wireless passive sensor for temperature compensated remote ph monitoring. *IEEE Sensors Journal*, 13(6):2428–2436, June 2013.
- [65] Z. Dong, U. C. Wejinya, J. M. Vaughan, and A. M. Albrecht. Fabrication and testing of isfet based ph sensor for microliter scale solution targets. In *Nanotechnology Materials and Devices Conference (NMDC), 2012 IEEE*, pages 9–14, Oct 2012.
- [66] S. Bhadra, C. Dynowski, W. Blunt, M. McDonald, D. J. Thomson, M. Freund, N. Cicek, and G. E. Bridges. Wireless passive sensor for ph monitoring inside a small bioreactor. In *2013 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, pages 276–279, May 2013.

- [67] A. Gao, P. Dai, N. Lu, T. Li, and Y. Wang. Optimization of silicon nanowire based field-effect ph sensor with back gate control. In *Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (NEMS), 2013 8th IEEE International Conference on*, pages 116–119, April 2013.
- [68] C. M. Nguyen, W. D. Huang, S. Rao, H. Cao, U. Tata, M. Chiao, and J. C. Chiao. Sol-gel iridium oxide-based ph sensor array on flexible polyimide substrate. *IEEE Sensors Journal*, 13(10):3857–3864, Oct 2013.
- [69] N. Raoufi, F. Surre, M. Rajarajan, T. Sun, and K. T. V. Grattan. Fiber optic ph sensor using optimized layer-by-layer coating approach. *IEEE Sensors Journal*, 14(1):47–54, Jan 2014.
- [70] P. Motto, V. Cauda, S. Stassi, G. Canavese, and D. Demarchi. Functionalized single zno-metal junction as a ph sensor. In *SENSORS, 2013 IEEE*, pages 1–4, Nov 2013.
- [71] A. Teramoto and A. Yamada. A simple estimation method of photosynthetic condition based on ph measurement using isfet sensor. In *Micro-NanoMechatronics and Human Science (MHS), 2013 International Symposium on*, pages 1–3, Nov 2013.
- [72] B. Zhou, S. Yang, T. H. Nguyen, T. Sun, and K. T. V. Grattan. Wireless sensor network platform for intrinsic optical fiber ph sensors. *IEEE Sensors Journal*, 14(4):1313–1320, April 2014.
- [73] S. Bhadra, W. Blunt, C. Dynowski, M. McDonald, D. J. Thomson, M. S. Freund, N. Cicek, and G. E. Bridges. Fluid embeddable coupled coil sensor for wireless ph monitoring in a bioreactor. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 63(5):1337–1346, May 2014.
- [74] K. A. Yusof, S. H. Herman, and W. F. H. Abdullah. Tio<sub>2</sub>-based extended gate fet ph-sensor: Effect of annealing temperature on its sensitivity, hysteresis and stability. In *Semiconductor Electronics (ICSE), 2014 IEEE International Conference on*, pages 491–494, Aug 2014.
- [75] L. Manjakkal, K. Cvejic, J. Kulawik, K. Zaraska, and D. Szwagierczak. Electrochemical interdigitated conductimetric ph sensor based on ruo<sub>2</sub> thick film sensitive layer. In *Electrical and Power Engineering (EPE), 2014 International Conference and Exposition on*, pages 797–800, Oct 2014.
- [76] M. Shamsul Arefin, M. Bulut Coskun, T. Alan, A. Neild, J. M. Redoute, and M. R. Yuce. A mems capacitive ph sensor for high acidic and basic solutions. In *IEEE SENSORS 2014 Proceedings*, pages 1792–1794, Nov 2014.
- [77] Q. Shao, H. Liu, H. Li, and Y. Yang. Miniature ph sensor for capsule endoscopy with composite diagnosis. In *IEEE SENSORS 2014 Proceedings*, pages 339–342, Nov 2014.
- [78] Q. Cui, O. Podrazký, J. Mrázek, J. Proboštová, and I. Kašík. Tapered-fiber optical sensor for physiological ph range. *IEEE Sensors Journal*, 15(9):4967–4973, Sept 2015.

- 
- [79] Y. C. Wu, S. J. Wu, and C. H. Lin. High performance egfet-based ph sensor utilizing low-cost industrial-grade touch panel film as the gate structure. *IEEE Sensors Journal*, 15(11):6279–6286, Nov 2015.
- [80] M. A. Zulkefle, R. Abdul Rahman, M. Rusop Mahmood, W. F. H. Abdullah, and S. H. Herman. Sensing capability of tio<sub>2</sub> thin films with different thicknesses as sensing membrane of egfet ph sensor. In *Technology Management and Emerging Technologies (ISTMET), 2015 International Symposium on*, pages 30–33, Aug 2015.
- [81] T. Schuster, N. Neumann, D. Plettemeier, R. Körbitz, and A. Richter. A fiber-optic ph sensor with wireless radio over fiber read-out. In *SENSORS, 2015 IEEE*, pages 1–4, Nov 2015.
- [82] A. Noshirvani Sharifabad and S. H. Bahrami. Halochromic chemosensor from poly(acrylonitrile)/phenolphthalein nanofibers as ph sensor. *IEEE Sensors Journal*, 16(4):873–880, Feb 2016.
- [83] Y. Zheng, L. H. Chen, X. Dong, J. Yang, H. Y. Long, P. L. So, and C. C. Chan. Miniature ph optical fiber sensor based on fabry #x2013;perot interferometer. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 22(2):331–335, March 2016.
- [84] M. Cao, S. K. Mahto, and O. Yadid-Pecht. Real-time optical ph sensor with cmos contact imaging and microfluidics. *IEEE Sensors Journal*, 16(10):3611–3619, May 2016.
- [85] H. Y. Liu, W. C. Hsu, W. F. Chen, C. W. Lin, Y. Y. Li, C. S. Lee, W. C. Sun, S. Y. Wei, and S. M. Yu. Investigation of algan/gan ion-sensitive heterostructure field-effect transistors-based ph sensors with al<sub>2</sub>o<sub>3</sub> surface passivation and sensing membrane. *IEEE Sensors Journal*, 16(10):3514–3522, May 2016.
- [86] C. Tan, K. Ding, W. Yang, and W. E. Seyfried. Accurate ph measurement and determination in deep-sea environments by an in-situ ph sensor calibration device. In *OCEANS 2016 - Shanghai*, pages 1–5, April 2016.
- [87] L. Zhang, Jian Lu, H. Okada, H. Nogami, and T. Itoh. Development of ito- and fet-based cow rumen sensor for long-term ph value monitoring. In *2016 Symposium on Design, Test, Integration and Packaging of MEMS/MOEMS (DTIP)*, pages 1–5, May 2016.
- [88] J. C. Chou, J. S. Chen, M. S. Huang, Y. H. Liao, C. H. Lai, T. Y. Wu, and S. J. Yan. The characteristic analysis of igzo/al ph sensor and glucose biosensor in static and dynamic measurements. *IEEE Sensors Journal*, PP(99):1–1, 2016.
- [89] J.M. González Buitrago. Evolución histórica de los laboratorios clínicos. *Quim Clin*, 15:59–66, 1996.
- [90] www.tplaboratorioquimico.com. url: <http://ow.ly/35A4309wZUp>, 2016.

- [91] Papel Indicador pH. url: <http://ow.ly/ATMj309xf35>, 2016.
- [92] Kit de pH en Arduino. url: <http://ow.ly/c9FP309x7bk>, 2016.
- [93] HM Digital. url: <http://ow.ly/yxWy309xegE>, 2016.
- [94] S. Dutta, D. Sarma, A. Patel, and P. Nath. “dye-assisted ph sensing using a smartphone”. *IEEE Photonics Technology Letters*, 27(22):2363–2366, Nov 2015.
- [95] K. Bremer and B. Roth. “Fibre optic surface plasmon resonance sensor system designed for smartphones”. *Optics express*, 23(13):17179–17184, 2015.
- [96] A. Vivas López. Sensor de ph por medio de fibra Óptica plástica. *Universidad de Guanajuato*, 2000.
- [97] J. E. Ponce Ballesteros. Sensor de ph por medio de fibras Ópticas. *Universidad de Guanajuato*, 2005.
- [98] J. B. Hernández Galván. Películas delgadas sol-gel para guías de ondas ópticas. *Universidad de Guanajuato*, 2005.
- [99] R. E. Aguilera Medina. Sensor de glucosa mediante nanotubos de carbono y glucosa oxidasa. *Universidad de Guanajuato*, 2010.
- [100] C. Montero Tavera. Diseño de un biosensor de ph con Óptica integrada. *Universidad de Guanajuato*, 2011.
- [101] A. Rendón Romero. Biosensores de fibras ópticas microestructuradas por películas delgadas en sol-gel. *Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo*, 2012.
- [102] S. D. Flores Rangel. Sensor de ph mediante fibras ópticas plásticas y nanotubos de carbono. *Universidad de Guanajuato*, 2013.
- [103] J. Ramírez Ramírez. Biosensor de colesterol basado en la técnica sol-gel con fibra microestructurada. *Universidad de Guanajuato*, 2014.
- [104] M. Przybyt and B. Bialkowska. “enzyme electrodes with enzyme immobilised by Sol-Gel technique”. In *Frontiers of Multifunctional Nanosystems*, pages 91–108. Springer, 2002.
- [105] Y. Jackie Y. *Nanostructured materials*, volume 27. Academic press, 2001.
- [106] K. T. V. Grattan, G. E. Badini, A.W. Palmer, and A. C. C. Tseung. “use of sol-gel techniques for fibre-optic sensor applications”. *Sensors and Actuators A: Physical*, 26(1):483–487, 1991.
- [107] CM McDonagh, AM Shields, AK McEvoy, BD MacCraith, and JF Gouin. “optical sol-gel-based dissolved oxygen sensor: progress towards a commercial instrument”. *Journal of sol-gel science and technology*, 13(1-3):207–211, 1998.

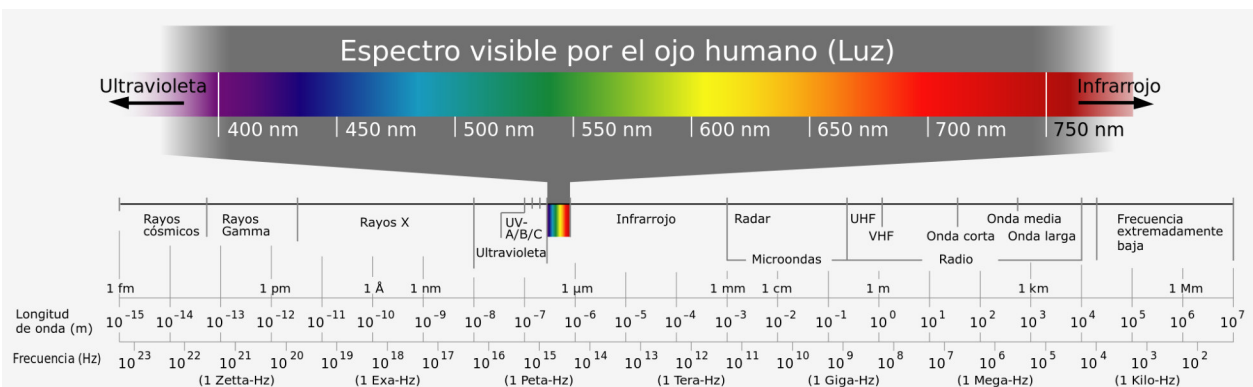
- [108] Vladimír Král, Martin Valík, Tatiana V Shishkanova, and Jonathan L Sessler. Dekker encyclopedia of nanoscience and nanotechnology. 2004.
- [109] <http://prof.usb.ve/hreveren/eta.htm>.
- [110] Zhong Lin Wang, Yi Liu, and Ze Zhang. *Handbook of Nanophase and Nanostructured Materials: Materials systems and applications I*, volume 3. 2003.
- [111] John D Wright and Nico AJM Sommerdijk. *Sol-gel materials: chemistry and applications*, volume 4. CRC press, 2000.
- [112] Mario Gleria and Roger De Jaeger. *Phosphazenes: A worldwide insight*. Nova Publishers, 2004.
- [113] Norbert Auner and Johann Weis. *Organosilicon Chemistry III: From Molecules to Materials*. John Wiley & Sons, 2008.
- [114] Miguel Ángel Alarcón Sanabria y Jahir Augusto Saavedra García. *Herramienta de Software para el Reconocimiento de Fallas Tipo Desprendimientos en Pavimento Flexible*. Universidad Industrial de Santander, 2014.
- [115] John C Russ. *The image processing handbook*. CRC press, 2016.
- [116] Rafael C González, Richard E Woods, Fernando Davue Rodríguez, and Luis Rosso. *Tratamiento digital de imágenes*, volume 3. Addison-Wesley New York, 1996.
- [117] Erik Cuevas, Daniel Zaldívar, and Marco Pérez. Procesamiento digital de imágenes con matlab y simulink. *Alfaomega Ra-Ma (México)*, 2010.
- [118] ThorLabs. url: <http://ow.ly/Nwrb30aGpei>, 2016.
- [119] Apple. url: <http://ow.ly/hNHe30azzCE>, 2016.
- [120] Instituto Nacional de Estadística y Geografía. url: <http://ow.ly/hOWx30aEBPm>, 2017.
- [121] Senstic. url: <https://itunes.apple.com/mx/app/ip-cam/id333208495?mt=8>, 2016.
- [122] F.O.P. Datasheet. url: <http://ow.ly/RNIw30azzdD>, 2016.
- [123] J Castro-Ramos, S Vázquez-Montiel, J Hernández-De-La-Cruz, O García-Lievanos, and W Calleja-Arriaga. Óptica difractiva: una revisión al diseño y construcción de sistemas ópticos empleando lentes difractivas. *Revista mexicana de física*, 52(6):479–500, 2006.
- [124] X. C. Pérez Anguiano. *Diseño y caracterización de rejillas de difracción para un sistema láser de amplio espectro*. Universidad Nacional Autónoma de México, 2016.
- [125] C. Kanan and G. W. Cottrell. Color-to-grayscale: does the method matter in image recognition? *PloS one*, 7(1):e29740, 2012.

- [126] Ahmet Koyun, E Ahlatcolu, Y Koca, and S Kara. *Biosensors and their principles*. InTech: Rijeka, Croatia, 2012.
- [127] PN Patel, V Mishra, and AS Mandloi. Optical biosensors: Fundamentals & trends. *JERS*, 1(1):15–34, 2010.
- [128] Douglas C Montgomery, George C Runger, and Edmundo G Urbina Medal. *Probabilidad y estadística aplicadas a la ingeniería*. McGraw Hill, 1996.
- [129] Sheldon M Ross. *Probabilidad y estadística para ingenieros*, 2001.
- [130] David S Moore. *Estadística aplicada básica*. Antoni Bosch editor, 2005.
- [131] Nel Quezada Lucio. *Estadística para ingenieros*. Empresa Editora Macro EIRL, 2010.
- [132] Dennis D Mendenhall Wackerly, William Scheaffer, Richard L Romo Muñoz, et al. *Estadística matemática con aplicaciones*. Number 519.5 W3. 2010.
- [133] Rafael Romero Villafranca and Luisa Rosa Zúnica Ramajo. *Métodos estadísticos para Ingenieros*. Editorial Universitat Politècnica de València, 2013.
- [134] Espectro Electromagnético. url: <http://ow.ly/Ycqn30bGzan>, 2016.
- [135] Color RGB. url: <http://ow.ly/SpcZ30bG42D>, 2016.
- [136] Visión por Computador Utilizando MatLab y el Toolbox de Procesamiento Digital de Imágenes. url: <http://ow.ly/CuT630bGBF5>, 2016.

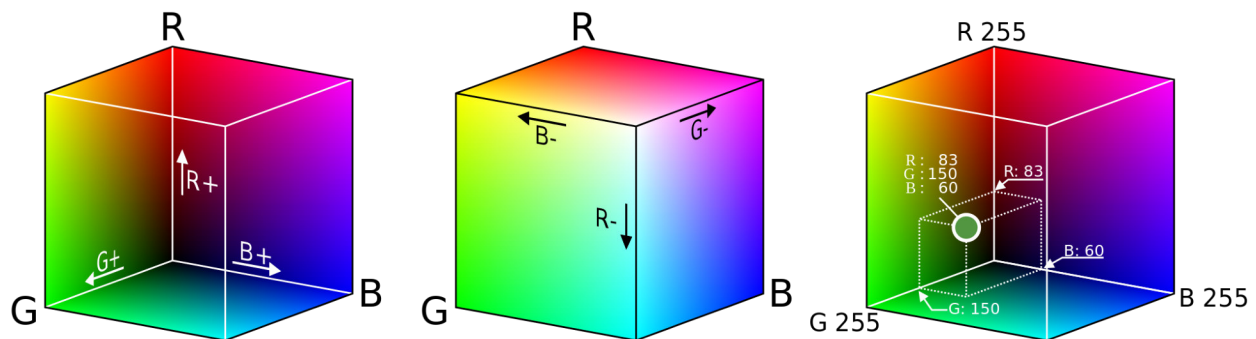
# Apéndice A

## Dependencia de pH Respecto a Intensidad de Píxeles en la Imagen a Color RGB y Analogía con Longitud de Onda en el Espectro de Luz Visible

El espectro de luz visible es la región del espectro electromagnético que el ojo humano es capaz de percibir en diferentes colores como lo muestra la Figura 6.1 (a), esta radiación electromagnética se expresa en longitudes de onda en un rango aproximado de 400 - 750 nm [2, 3, 123, 124]. Por otra parte, una imagen digital en color RGB se compone de 3 capas: capa de color rojo (R), capa de color verde (G) y capa de color azul (B), donde la intensidad de los píxeles (píxel, unidad básica de una imagen digital), va de 0 - 255 unidades [115–117], y la combinación de las 3 capas genera los colores que percibe el ojo humano, como se muestra en la Figura 6.1 (b).



(a) Espectro Electromagnético [134]



(b) Formación de Color en RGB [135]

Figura 6.1: Espectro Electromagnético y Formación de Color en RGB

Como trabajo complementario, la Figura 6.2 muestra la dependencia de pH respecto a la intensidad de píxeles en las imágenes a color RGB para muestras de 4.01, 7.00 y 10.00 unidades de pH; donde se halla el perfil de las imágenes ubicadas en el lateral izquierdo (Figuras (a), (c) y (e)), obteniendo como resultado las curvas de intensidad de píxeles de las capas RGB, como se muestra en las gráficas ubicadas en el lateral derecho (Figuras (b), (d) y (f)).

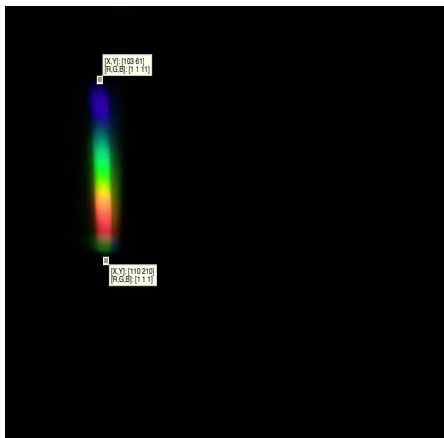
El perfil [136] de una imagen a color RGB es una muestra la de intensidad de píxeles para cada una de las capas (RGB), es decir, convertir un segmento de la imagen a una señal unidimensional para analizar los cambios de intensidad de los píxeles. Para este caso en particular, el segmento representa una línea recta entre el punto superior y el punto inferior de las imágenes a color RGB ubicadas en el lateral izquierdo (Figuras (a), (c) y (e)) de la Figura 6.2, obteniendo como resultado las curvas de intensidad de píxeles para cada una de las 3 capas en RGB, como se muestra en las gráficas ubicadas en el lateral derecho (Figuras (b), (d) y (f)) de la Figura 6.2.

La Figura 6.2 (b), representa el perfil obtenido de la imagen a color RGB de una muestra para pH de 4.01 unidades, donde se observa que para la capa de color rojo (R), el pico mayor en intensidad de píxeles se encuentra alrededor de las 250 unidades de intensidad de píxeles y con una amplitud superior a 20 píxeles; para la capa de color verde (G), también el pico mayor en intensidad de píxeles se encuentra alrededor de las 250 unidades de intensidad de píxeles y con una amplitud aproximada de 20 píxeles; para la capa de color azul (B), el pico mayor en intensidad de píxeles se encuentra alrededor de las 160 unidades de intensidad de píxeles, teniendo en cuenta que es la capa que presenta menor intensidad en los píxeles.

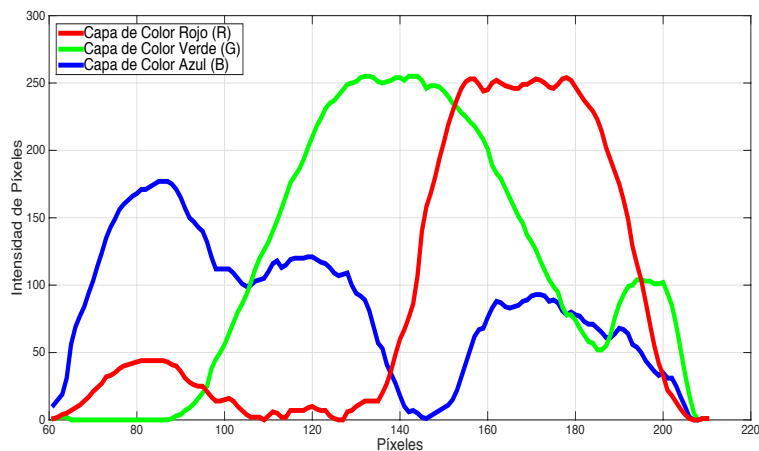
En la Figura 6.2 (d), que representa el perfil de la imagen a color RGB de una muestra para pH de 7.00 unidades, se observa que hay una reducción de intensidad de píxeles en los picos más representativos para cada una de las capas RGB, respecto a la descripción realizada para la Figura 6.2 (b). Así mismo, en la Figura 6.2 (e), que representa el perfil de la imagen a color RGB de una muestra para pH de 10.00 unidades, se observa una reducción de intensidad de píxeles en los picos más representativos para cada una de las capas RGB, respecto a la descripción realizada para la Figura 6.2 (d).

En general, se observa que cada una de las muestras (4.01, 7.00 y 10.00 unidades de pH) presentan una reducción de intensidad en los píxeles de los segmentos de perfil seleccionados. De lo anterior podemos concluir que la reducción de intensidad en los píxeles de las imágenes a color RGB es evidencia de la absorción en analogía a las longitudes de onda en el espectro de luz visible, teniendo en cuenta que en este momento no podemos especificar con exactitud y precisión las longitudes de onda que presentan mayor absorción.

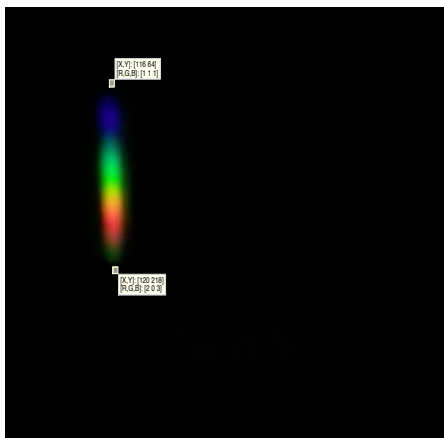




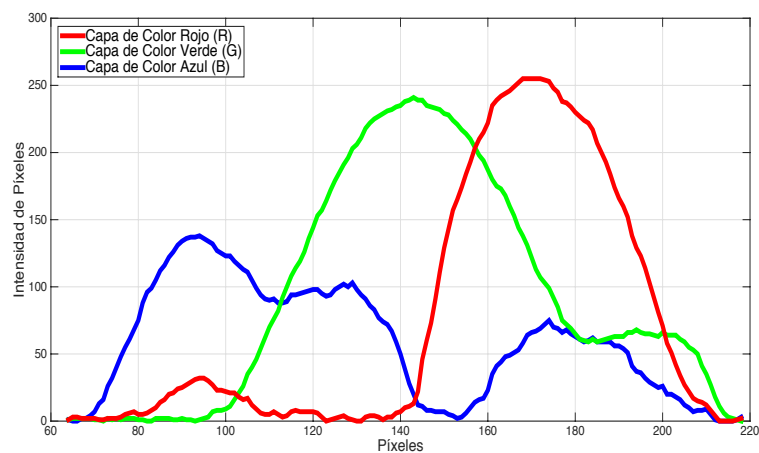
(a) Imagen 1 - pH = 4.01



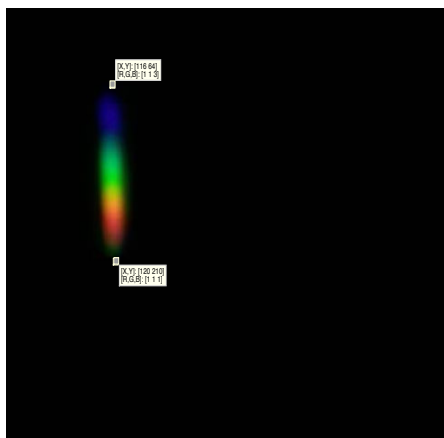
(b) Perfil de Imagen 1 en RGB - pH = 4.01



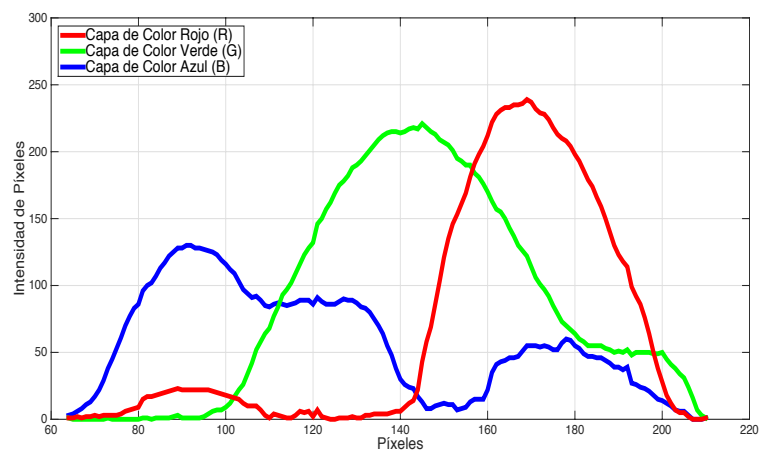
(c) Imagen 2 - pH = 7.00



(d) Perfil de Imagen 2 en RGB - pH = 7.00



(e) Imagen 3 - pH = 10.00



(f) Perfil de Imagen 3 en RGB - pH = 10.00

**Figura 6.2:** Perfiles de Imagen en Color RGB para pH 4.01, 7.00 y 10.00

# Apéndice B

## Póster Photonics North 2016



### CHARACTERIZATION OF THIN FILMS OF pH IN PLASTIC OPTICAL FIBER

J. A. Saavedra-García<sup>a</sup>, D. A. Razo-Medina<sup>b</sup>, M. Trejo-Durán, E. Alvarado-Méndez<sup>\*</sup>

Electronics Department

División de Ingenierías Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato

Comunidad. Palo Blanco s/n 36885, Salamanca, Guanajuato, México.



#### ABSTRACT

In this work, is showed the creation and characterization of thin films on plastic optical fiber (optrodes) to pH sensor. Sol-Gel technique is used with pH indicators such as phenolphthalein and litmus, the thin film is placed around the fiber between the two endings. pH concentration was determined by transmittance. A diode laser beam (632 nm wavelength) is transmitted through the optrode, and the variations of intensity are detected by a photoresistor. Characteristic curves at different pH concentrations are presented and it is shown that the voltage is proportional to pH concentration.

#### INTRODUCTION

The measurement of pH is important in Medicine, Chemistry, Biology, Cosmetics, Industrial Food, etc. [1-3]. The pH sensor on optical fiber presents advantages regarding other sensors, such as electromagnetic interference immunity, high sensibility and low cost.

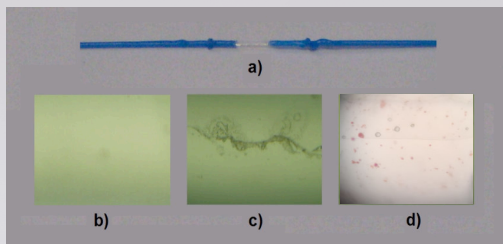


Fig. 1. Deposition process of sol-gel thin film on plastic optical fiber. a) fiber without cover in the center. b) cleaned fiber. c) abraded fiber with nitric acid. d) film placed on fiber.

#### OPTRODE FABRICATION

To start with optrode preparation, firstly, the coating of fiber is removed 1cm using a razor blade shown in Fig. 1(a). After, surface of optical fiber is cleaned by using acetone ( $C_3H_6O$ ) shown in Fig. 1(b). Later on, as shown in Fig. 1(c), the surface is abraded by using nitric acid ( $HNO_3$ ) for best adhesion of the sol-gel film. Finally in the Fig. 1(d), the thin film is deposited on the optical fiber, using a chemical process of sol-gel adapted from E. Alvarado-Méndez, et al. [4].

This project was supported by a Guanajuato University and CONACYT through grants # 661714/572900<sup>a</sup> and 213921/206655<sup>b</sup>.  
<sup>a</sup> jahir.saavedra@ugto.mx \* ealvarad@ugto.mx

#### CHARACTERIZATION

Curve characteristic was obtained by using a light source of 632 nm. It was propagated through the optrode while the sensing part was soaked with a buffer of known pH concentration. The variations of intensity were detected by a photoresistor, this variation relates the pH concentrations with voltage shown in Fig. 3.

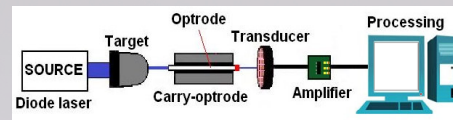


Fig. 2. Schematic of the plastic optical fiber sensor pH system.

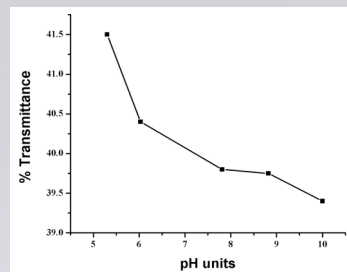


Fig. 3. Curve characteristic of pH film in plastic optical fiber.

#### CONCLUSIONS

The proposed system is practical and easy to use. The characterization of thin films of pH in optical fiber were made by increasing pH concentration buffer. Variations of intensity were detected by photoresistor, this had a good behavior in a range of 5 to 10 pH concentration.

#### REFERENCES

- [1] R. J. Gillies, N. Raghunand, M. L. Garcia-Martin, and R. A. Gatenby, "pH imaging", IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine, vol. 23, no. 5, pp. 57-64, Sep. 2004.
- [2] K. S. Johnson, "Bioargo: A global scale chemical sensor network to observe carbon, oxygen, and nitrogen cycles in the ocean", In SENSORS, 2013 IEEE, p. 1, Nov. 2013.
- [3] V. Vijayaragavan, S. Vivek, S. Anu Aarthi, S. Raagavi, and N. Saranya, "pH automation in sugar industries", In Computer Communication and Informatics (ICCCI), 2015 International Conference on, pp. 1-5, Jan. 2015.
- [4] E. Alvarado-Méndez, R. Rojas-Laguna, J. A. Andrade-Lucio, D. Hernández-Cruz, R. A. Lessard, and J. G. Aviña-Cervantes, "Design and characterization of pH sensor based on sol-gel silica layer on plastic optical fiber", Sensors and Actuators B: Chemical, vol. 106, no. 2, pp. 518-522, May. 2005.



Québec City, June 13th 2016

Jahir Saavedra-García  
Universidad de Guanajuato  
Carretera Salamanca-Valle de Santiago Km 3.5+1.8 Km Comunidad de Palo Blanco  
Salamanca, Guanajuato  
36885, Mexico

**OBJECT: Certificate of presentation to the Photonics North 2016 Conference**

Dear Jahir Saavedra-García,

On behalf of the Canadian Photonic Industry Consortium, we would like to thank you for your participation to the Photonics North 2016 Conference which was held in Quebec City, Canada, from May 24-26, 2016. This conference is an excellent opportunity to network and exchange with researchers, government representatives and industry professionals.

Your articles below were **accepted** for poster presentations at the conference and we thank you for your registration as a presenter of these papers:

**Characterization Of Thin Films Of Ph In Plastic Optical Fiber**

**Nonlinear Optical Properties Of Hibiscus Sabdariffa In Thin Films**

Photonics derives its strength and singular ubiquity from its unique ability to interface with other technologies. More than ever, this quintessential enabling technology is living up to its potential of becoming the defining technology of the 21st century

We do hope that you take full advantage of your participation in Photonics North and are confident that the conference lived up to your expectations.

Sincerely ,

Pierre Bolduc  
Photonics North 2016 Secretariat

Photonics North 2016 Secretariat - Conferium - Conferences. Events. Service.  
425, boul. René-Lévesque O., Quebec, Qc, Canada G1S 1S2  
Phone: 418-522-8182 800-618-8182 Fax: 418-529-7548 800-889-1129  
Email: pn.info@conferium.com