

Tecnológico de Costa Rica  
Escuela de Ingeniería Electrónica



**Mejoramiento de contraste y razón señal a ruido de imágenes digitales de geles de electroforesis por medio de fusión y ajuste multiparamétrico de la captura**

Informe de Proyecto de Graduación para optar por el título de  
Ingeniero en Electrónica con el grado académico de Licenciatura

Bryant Esteban Álvarez Canales

Cartago, 30 de noviembre, 2011



Declaro que el presente Proyecto de Graduación ha sido realizado enteramente por mi persona, utilizando y aplicando literatura referente al tema e introduciendo conocimientos propios.

En los casos en que he utilizado bibliografía he procedido a indicar las fuentes mediante las respectivas citas bibliográficas. En consecuencia, asumo la responsabilidad total por el trabajo de graduación realizado y por el contenido del correspondiente informe final.



Bryant Esteban Álvarez Canales

Cartago, 30 de noviembre de 2011


Céd: 1-1323-0906



Instituto Tecnológico de Costa Rica  
Escuela de Ingeniería Electrónica  
Proyecto de Graduación  
Tribunal Evaluador

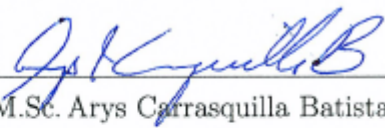
Proyecto de Graduación defendido ante el presente Tribunal Evaluador como requisito para optar por el título de Ingeniero en Electrónica con el grado académico de Licenciatura, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Miembros del Tribunal




---

M.Sc. Eduardo Interiano Salguero  
Profesor Lector



---

M.Sc. Arys Carrasquilla Batista  
Profesora Lectora



---

Dr. Pablo Alvarado Moya  
Profesor Asesor

Los miembros de este Tribunal dan fe de que el presente trabajo de graduación ha sido aprobado y cumple con las normas establecidas por la Escuela de Ingeniería Electrónica.

Cartago, 30 de noviembre de 2011



# Resumen

Este documento se concentra en una aplicación para caracterización molecular de organismos, específicamente en lo referente al mejoramiento de la calidad de imágenes de geles de electroforesis.

En general, las imágenes de geles digitalizadas presentan distorsiones producto del ruido y bajo contraste que provienen del proceso de adquisición, ya sea por una inadecuada configuración de la cámara o limitaciones de la misma.

En este sentido en el presente trabajo se desarrollan algoritmos de medición de ruido y contraste en imágenes con el objetivo de implementar una estrategia para la adquisición de las mismas, evitando una inadecuada configuración de la cámara. Por otra parte, se implementan y comparan algoritmos de fusión de imágenes para obtener imágenes de geles digitalizadas con mejores índices de contraste y ruido que las que la cámara es capaz de proporcionar debido a sus limitaciones técnicas.

**Palabras clave:** contraste, ruido, adquisición de imágenes digitales, fusión de imágenes





# Abstract

This paper focuses on an application for molecular characterization of organisms, specifically to improving the quality of electrophoresis gel images.

In general, digitized gel images have distortions that are product of noise and low-contrast coming from the acquisition process, either by an inadequate camera settings or limitations of it.

In this sense this paper shows noise and contrast measurement algorithms in images in order to implement a strategy to acquire them, avoiding an inappropriate setting camera. On the other hand, this work shows image fusion algorithms to improve contrast and noise ratios of digitized gel images than those that camera is able to provide due to its technical limitations.

**Keywords:** contrast, noise, digital imaging, image fusion



*a mis queridos padres*



# Agradecimientos

Primero que todo le agradezco a Dios por todas las bendiciones que me ha dado, por darme la gracia para alcanzar mis metas personales y por darme salud para poder realizarme como profesional y persona.

A mis queridos padres Cesar y Xinia, ya que este proyecto de graduación es posible gracias a ellos que desde niño me guiaron por el buen camino, debido a sus acciones hoy en día estoy orgulloso de la persona que soy. Gracias a su formación aprendí que el esfuerzo y la perseverancia son los caminos idóneos para lograr mis sueños.

A mi hermano Josué que siendo mi hermano menor me inspiro a ser un buen ejemplo para él.

A mi familia en general que durante toda mi etapa de formación me han ayudado a ser una mejor persona y estudiante.

A mi profesor asesor el Dr. Pablo Álvarado por brindarme la oportunidad de realizar este proyecto de graduación, donde obtuve conocimiento de un gran ser humano y profesional.

A Intel por depositar su confianza en mí, brindándome una beca académica con la cual pude estudiar durante mi periodo universitario. Cabe resaltar la importancia de la gerente de educación de Intel Mary Helen Bialas en esta relación de empresa a estudiante, a la cual se lo agradezco profundamente.

Además quiero agradecerle a todas esas personas que han influido en mi formación académica desde niño, profesores de escuela, de colegio, de olimpiadas, de universidad y al director del Colegio Científico Bilingüe Reina de los Ángeles Don Fernando Zepeda porque gracias a ellos alcance muchos de mis éxitos estudiantiles.

Gracias a todos por su apoyo.

Bryant Esteban Álvarez Canales

Cartago, 30 de noviembre de 2011



# Índice general

Índice de figuras	III
Índice de tablas	V
Lista de símbolos y abreviaciones	VII
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Caracterización molecular de organismos . . . . .	1
1.2. Calidad de imágenes de geles de electroforesis . . . . .	3
1.3. Estrategia propuesta para el mejoramiento de la calidad de imágenes de geles de electroforesis . . . . .	4
1.4. Objetivos y estructura del documento . . . . .	5
<b>2. Marco Teórico</b>	<b>7</b>
2.1. Imágenes digitales . . . . .	7
2.1.1. Intensidad . . . . .	10
2.1.2. Contraste . . . . .	11
2.1.3. Ruido . . . . .	12
2.2. Cámara digital . . . . .	13
2.2.1. Tecnología de fabricación . . . . .	14
2.2.2. Conectividad . . . . .	14
2.2.3. Parámetros controlables . . . . .	14
2.3. Fusión de imágenes . . . . .	15
2.3.1. Fusión simple (SF) . . . . .	17
2.3.2. Fusión de exposición (EF) . . . . .	17
<b>3. Sistema de mejoramiento de contraste y razón señal a ruido de imágenes</b>	<b>19</b>
3.1. Algoritmos de medición . . . . .	19
3.1.1. Algoritmos de medición de intensidad . . . . .	20
3.1.2. Algoritmos de medición de contraste . . . . .	21
3.1.3. Algoritmo de medición de ruido . . . . .	23
3.2. Optimización del sistema de adquisición de imágenes . . . . .	26
3.2.1. Análisis estadístico . . . . .	26
3.2.2. Etapa de evaluación y manipulación . . . . .	27
3.3. Algoritmos de fusión de imágenes . . . . .	29

---

3.3.1. Algoritmo de fusión simple (SF) . . . . .	29
3.3.2. Algoritmo de fusión de exposición (EF) . . . . .	30
3.4. Sistema de adquisición y pre-procesamiento de mejoramiento de calidad de imágenes . . . . .	30
3.4.1. Etapa de captura de imágenes . . . . .	30
3.4.2. Etapa de fusión . . . . .	32
3.4.3. Etapa de linealización . . . . .	32
<b>4. Resultados y Análisis</b>	<b>33</b>
4.1. Medidas de aptitud . . . . .	33
4.1.1. Medidas globales . . . . .	34
4.1.2. Medidas locales . . . . .	36
4.2. Evaluación del sistema de adquisición optimizado . . . . .	39
4.2.1. Comparación de imágenes con y sin optimización del proceso de captura	39
4.2.2. Duración del sistema en obtener las imágenes optimizadas . . . . .	43
4.3. Fusión de imágenes de geles de electroforesis . . . . .	44
4.3.1. Comparación de los métodos de fusión . . . . .	45
4.3.2. Duración de los algoritmos implementados . . . . .	48
4.4. Evaluación global del sistema . . . . .	50
<b>5. Conclusiones y Recomendaciones</b>	<b>57</b>
5.1. Conclusiones . . . . .	57
5.2. Recomendaciones . . . . .	58
<b>Bibliografía</b>	<b>59</b>
<b>Índice alfabético</b>	<b>61</b>



# Índice de figuras

1.1. Ejemplo de imagen de gel de electroforesis . . . . .	2
1.2. Diagrama de bloques del sistema automatizado de análisis de imágenes. Tomado de [3] . . . . .	3
1.3. Elementos del mejoramiento de la calidad en una imagen en la etapa de adquisición . . . . .	4
1.4. Solución desarrollada del mejoramiento de la calidad en imágenes . . . . .	5
2.1. Rejilla $\mathbb{G}^2$ . Tomado de [1] . . . . .	8
2.2. Vecindario de $3 \times 3$ de un píxel en una imagen. Tomado de [1] . . . . .	9
2.3. Histograma de una imagen digital de gel de electroforesis . . . . .	9
2.4. Imágenes digitales con ruido (a) blanco normal e (b) impulsional. Tomadas de [1] . . . . .	13
2.5. Ejemplo de una cámara digital. Tomado de [18] . . . . .	13
2.6. Efecto de la variación de brillo de menor a mayor en una imagen digital. Tomado de [6] . . . . .	15
2.7. Efecto de la variación de ganancia de menor a mayor en una imagen digital. Tomado de [6] . . . . .	15
2.8. Niveles de obturación en una imagen digital, nivel medio, nivel alto y nivel bajo. Tomado de [6] . . . . .	16
3.1. Diagrama completo de la solución realizada . . . . .	20
3.2. Diagrama de flujo del cálculo de $M_{eL}$ . . . . .	22
3.3. Diagrama de flujo del cálculo de contraste local . . . . .	23
3.4. Diagrama de flujo del cálculo de ruido en imágenes digitales . . . . .	24
3.5. Diagrama del sistema de adquisición optimizado de imágenes digitales . . . . .	27
3.6. Diagrama de flujo del manejo para el sistema de adquisición . . . . .	28
3.7. Diagrama de fusión de imágenes digitales . . . . .	29
3.8. Diagrama de fusión simple . . . . .	30
3.9. Diagrama de fusión de exposición . . . . .	31
3.10. Diagrama de bloques del sistema de adquisición y pre-procesamiento de mejoramiento de calidad de imágenes . . . . .	31
4.1. Imagen del gel de electroforesis empleado para la evaluación del proyecto . . . . .	34
4.2. Imágenes adquiridas para la comprobación de las medidas de aptitud globales . . . . .	35

4.3. Histogramas de intensidad local $L(i, j)$ de las imágenes adquiridas a diferentes niveles de obturación . . . . .	37
4.4. Histogramas de contraste local (ajustados) de las imágenes adquiridas a diferentes niveles de obturación . . . . .	38
4.5. Imágenes oscuras adquiridas por el sistema de adquisición optimizado . . . . .	40
4.6. Imágenes oscuras adquiridas por el sistema de adquisición sin el optimizador . . . . .	40
4.7. Imágenes medias adquiridas por el sistema de adquisición optimizado . . . . .	41
4.8. Imágenes medias adquiridas por el sistema de adquisición sin el optimizador . . . . .	42
4.9. Imágenes claras adquiridas por el sistema de adquisición optimizado . . . . .	43
4.10. Imágenes claras adquiridas por el sistema de adquisición sin el optimizador . . . . .	43
4.11. Imágenes a fusionar . . . . .	46
4.12. Imagen fusionada por el método de fusión simple . . . . .	46
4.13. Imágenes fusionadas por el método de fusión de exposición . . . . .	47
4.14. Histogramas relevantes de las diferentes imágenes utilizadas en el proceso de fusión analizado . . . . .	49
4.15. Imágenes a fusionar adquiridas por el ajuste multiparamétrico en condiciones de de iluminación natural (día) . . . . .	50
4.16. Imágenes a fusionar adquiridas por el ajuste multiparamétrico en condiciones de iluminación artificial (noche) . . . . .	51
4.17. Imágenes finales del sistema diseñado en condiciones de iluminación natural (día) . . . . .	52
4.18. Imágenes finales del sistema diseñado en condiciones de iluminación artificial (noche) . . . . .	53
4.19. Histogramas relevantes de las diferentes imágenes utilizadas en el proceso de mejoramiento de imágenes digitales de geles de electroforesis por medio de fusión y ajuste multiparamétrico de la captura en la prueba de día . . . . .	55
4.20. Histogramas relevantes de las diferentes imágenes utilizadas en el proceso de mejoramiento de imágenes digitales de geles de electroforesis por medio de fusión y ajuste multiparamétrico de la captura en la prueba de noche . . . . .	56

# Índice de tablas

2.1. Parámetros relevantes del píxel para el algoritmo EF . . . . .	17
4.1. Parámetros de adquisición de la cámara para las imágenes de la Figura 4.2 .	34
4.2. Intervalos de las medidas de aptitud globales . . . . .	36
4.3. Medidas de aptitud globales para las imágenes de la Figura 4.2 . . . . .	36
4.4. Intervalos de las medidas de aptitud locales . . . . .	37
4.5. Imágenes oscuras obtenidas por el sistema de adquisición . . . . .	41
4.6. Imágenes medias obtenidas por el sistema de adquisición . . . . .	42
4.7. Imágenes claras obtenidas por el sistema de adquisición . . . . .	44
4.8. Tiempos de duración del sistema $t$ en obtener las imágenes optimizadas . . .	44
4.9. Valores utilizados de los parámetros para el algoritmo EF en las tres imágenes de entrada . . . . .	45
4.10. Resultados globales del proceso de fusión del gel de electroforesis mediante los diferentes algoritmos . . . . .	48
4.11. Tiempos de fusión $t_f$ de los diferentes algoritmos implementados . . . . .	50
4.12. Resultados globales del mejoramiento de imágenes digitales de geles de elec- troforesis por medio de fusión y ajuste multiparamétrico de la captura en condiciones de iluminación natural (día) . . . . .	51
4.13. Resultados globales del mejoramiento de imágenes digitales de geles de elec- troforesis por medio de fusión y ajuste multiparamétrico de la captura en condiciones de iluminación artificial (noche) . . . . .	54



# Lista de símbolos y abreviaciones

## Abreviaciones

CCD	Dispositivo de carga acoplada
CMOS	Semiconductor de metal-óxido complementario
EF	Exposure fusion
IIDC	The 1394 Trade Association Instrumentation and Industrial Control Working Group, Digital Camera Sub Working Group
MIMO	Múltiples entradas, múltiples salidas
NC	Nivel de calidad
NRE	Nivel de ruido estimado
RMS	Root mean square
SF	Simple fusion
SNR	Razón señal a ruido
SO	Sistema optimizador

## Notación general

<b>A</b>	Matriz
	$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nm} \end{bmatrix}$
<i>B</i>	Brillo
<i>C</i>	Contraste
<i>E</i>	Nivel de exposición de un píxel
$\mathcal{F}[\cdot]$	Sistema de fusión de imágenes
<i>f</i> [\cdot]	función
$\mathbb{G}^2$	Rejilla bidimensional, finita, discreta y compacta que se define como $\mathbb{G}^2 = [0 \dots M - 1] \times [0 \dots N - 1]$ , con $M, N \rightarrow \mathbb{N}^+$
<i>G</i>	Ganancia
$\mathcal{H}[\cdot]$	Transformación de histograma
<i>I</i>	Imagen
$(i, j)$	Par ordenado que denota la posición de un píxel, donde <i>i</i> es la fila y <i>j</i> la columna
$\hat{I}$	Imagen procesada por un algoritmo
<i>k</i>	Cantidad de objetos en un conjunto de objetos del mismo tipo
<i>L</i>	Intensidad
<i>l</i>	Iluminación

---

$\mu$	Media aritmética
$n_L$	Niveles de intensidad
$O$	Obturación
$p$	Elemento de imagen o píxel
$\mathbb{R}$	Conjunto de los números reales
$r$	Reflectancia
$S$	Saturación
$\mathcal{T}[\cdot]$	Transformación realizada por un sistema
$t$	tiempo
$V$	Vecindario de un píxel
$\sigma$	Desviación estándar
$\sigma^2$	Varianza
$W$	Peso de un píxel
$\underline{\mathbf{x}}$	Vector

$$\underline{\mathbf{x}} = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n]^T = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}$$

$y$	Escalar
-----	---------

# Capítulo 1

## Introducción

El análisis y procesamiento de imágenes digitales se aprovecha en diversas disciplinas debido a la capacidad de manipulación por computador de las mismas, con el objetivo de mejorar su calidad o bien estudiar su información para ejecutar acciones o tomar decisiones [8]. En este sentido este trabajo se ocupa del análisis y procesamiento de imágenes digitales de geles de electroforesis para el mejoramiento de su calidad.

A continuación se enmarca el trabajo en el contexto de caracterización molecular de organismos, después se detalla la importancia de mejorar la calidad de las imágenes de geles de electroforesis, con lo que se introduce la solución empleada para resolver el problema y así comprender el objetivo del trabajo realizado y la estructura de este documento.

### 1.1. Caracterización molecular de organismos

En el contexto de una aplicación para caracterización molecular de organismos, este trabajo se concentra específicamente en lo referente al mejoramiento de la calidad de imágenes de geles de electroforesis.

Se puede caracterizar molecularmente el ADN de organismos mediante un análisis de imágenes de geles, que resultan de procesos de electroforesis. El gel se emplea como una matriz para separar las moléculas, donde éste generalmente es un polímero. La electroforesis es una técnica de separación de moléculas basada en su tamaño molecular y carga eléctrica, en donde se utiliza una fuerza electromotriz para desplazar las moléculas a través del gel.

En la Figura 1.1 se muestra un ejemplo de una imagen de gel de electroforesis obtenida mediante la cámara digital Basler A631FC con chip CCD de 1/2", en donde las columnas corresponden a *carriles* y las pequeñas líneas en cada carril corresponden a *bandas*. Además, se aprecia que existe ruido y un bajo contraste en la imagen que dificulta su interpretación.

Generalmente, el análisis de las imágenes es realizado por biólogos moleculares de forma manual e inicia con la binarización de la imagen, donde una banda presente en la imagen de gel se representa con un uno binario y una banda ausente se representa con un cero binario.

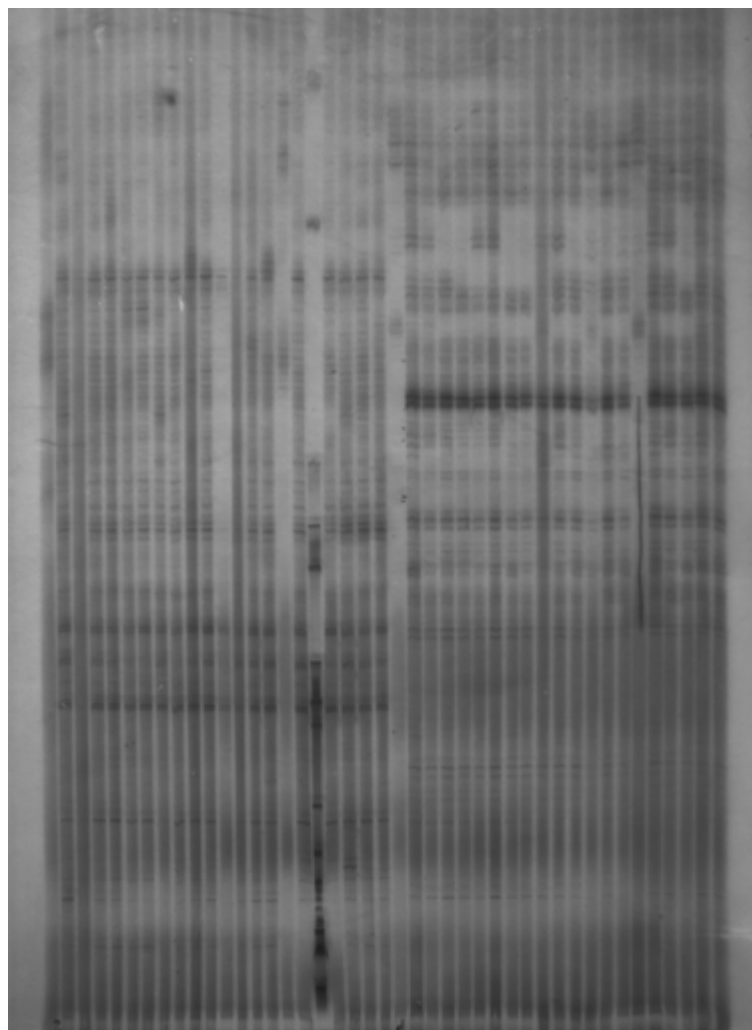


Figura 1.1: Ejemplo de imagen de gel de electroforesis

Seguidamente, se obtiene una matriz que organiza y resume la información extraída, donde el objetivo del análisis de la información depende de la tarea.

Debido al análisis manual de las imágenes, se pueden introducir errores humanos por las limitaciones en la calidad de la imagen, lo que pone en evidencia la necesidad de herramientas que permitan mejorar las imágenes adquiridas de forma digital para analizarlas de manera automática. El sistema propuesto de análisis automático de las imágenes de gels del proyecto de investigación del cual este trabajo forma parte se muestra en la Figura 1.2.

El primer elemento de este sistema es la adquisición de imágenes de gels mediante una cámara. Este proceso de captura de la imagen introduce imperfecciones a la misma, por lo que se hace necesaria una etapa de pre-procesamiento que reduzca el ruido, mejore el contraste, la nitidez y compense distorsiones geométricas de la imagen. Seguidamente la etapa de detección de *bandas* transforma cada *carril* en la imagen del gel a una representación vectorial adecuada para el posterior análisis. El módulo de estructuración de datos relaciona la imagen adquirida con meta-información, almacenada en una base de datos. El análisis de datos evalúa utilizando la información disponible a priori si los datos que provee la etapa de estructuración de datos tienen sentido o no. La etapa de interfaz facilita al experto su



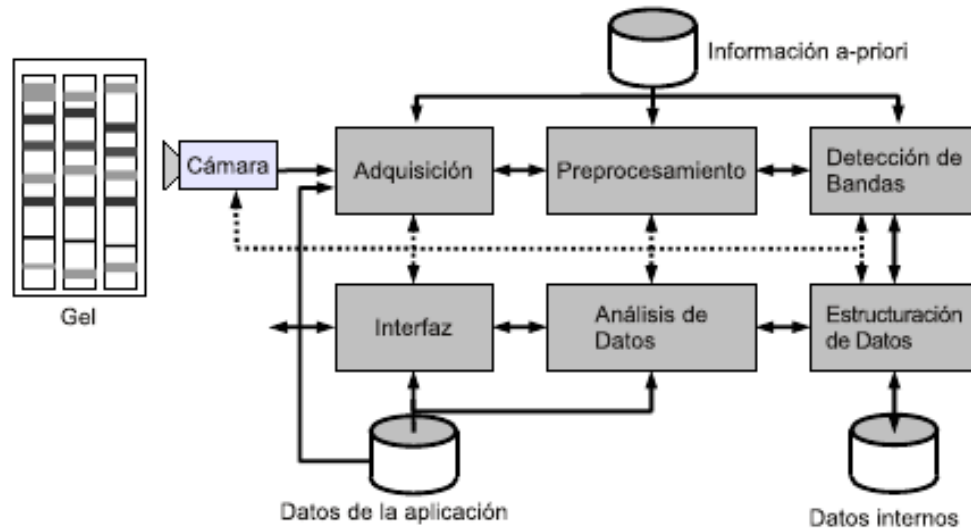


Figura 1.2: Diagrama de bloques del sistema automatizado de análisis de imágenes. Tomado de [3]

interacción con el sistema, en relación con la recolección, almacenamiento, manipulación, recuperación de información y acceso a la base de datos.

## 1.2. Calidad de imágenes de geles de electroforesis

En el proceso de adquisición en sistemas de procesamiento digital de imágenes, la información capturada posee imperfecciones asociadas al ruido y contraste. El ruido produce que el valor de un píxel de una imagen no corresponda con la realidad y el contraste es la diferencia relativa en intensidad entre un punto de una imagen y sus alrededores [8]. Estas imperfecciones pueden provenir del proceso de formación de la imagen y de las mismas imágenes de geles de electroforesis.

La cámara se utiliza para capturar digitalmente las imágenes de geles de electroforesis, donde las imágenes capturadas poseen una relación señal a ruido determinada por el proceso de formación de la imagen, defectos físicos en la cámara y errores en la transmisión de datos. Esto de igual forma establece el nivel de contraste en la imagen.

En trabajos anteriores ya se han realizado avances en la etapa de pre-procesamiento para mejorar la calidad de imágenes de geles de electroforesis [1], sin embargo, éstas mejoras se dan con la imagen ya adquirida, lo que hace indispensable el desarrollo de una etapa conjunta entre la adquisición y el pre-procesamiento para obtener imágenes de geles de electroforesis con la mejor calidad posible.

Motivos como los expuestos anteriormente sugieren que para un adecuado análisis automático de la imagen, se debe controlar la etapa de adquisición de las imágenes para reducir el ruido

y mejorar el contraste de las mismas. Esta etapa de adquisición es una necesidad común de sistemas de procesamiento digital de imágenes y depende de la cámara digital a utilizar y de las imágenes adquiridas.

Dentro de éste contexto el problema de una inadecuada calidad de las imágenes (se entiende por calidad de una imagen al grado de relación de los valores de los pixeles de la imagen con la realidad y a la diferencia relativa en intensidad entre un punto de una imagen y sus alrededores) se sintetiza mediante la siguiente pregunta:

*¿Cómo reducir el ruido y mejorar el contraste en el proceso de adquisición de imágenes digitalizadas de geles de electroforesis, para disminuir la inducción de error en su posterior análisis e interpretación?*

### 1.3. Estrategia propuesta para el mejoramiento de la calidad de imágenes de geles de electroforesis

El presente proyecto se centra en las etapas de adquisición de las imágenes digitales de geles de electroforesis mediante la cámara digital y el pre-procesamiento para obtener la información de contraste y razón señal a ruido en las imágenes capturadas, donde el mejoramiento de la calidad en una imagen en la etapa de adquisición depende del mejoramiento de contraste y la reducción de ruido como se muestra en la Figura 1.3.

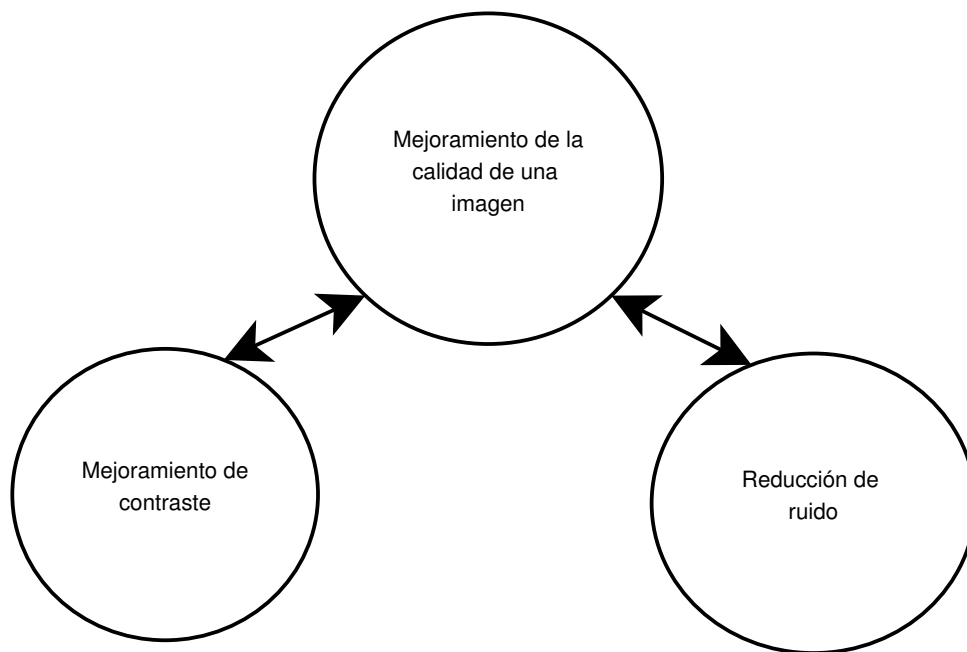


Figura 1.3: Elementos del mejoramiento de la calidad en una imagen en la etapa de adquisición

En esta etapa se desarrollan módulos de software que permiten mejorar la calidad de una imagen mediante el manejo de los parámetros necesarios de la cámara digital que ayudan a

mejorar el contraste y reducir el ruido como lo son ganancia, brillo y obturación. Además se desarrollan algoritmos de fusión de imágenes capaces de aumentar el contraste y mejorar la relación señal a ruido más allá de las limitaciones técnicas de la cámara. Puesto que a pesar que existen algoritmos de fusión para mejoramiento de contraste, como PSF tools y Enfuse, éstos están diseñados para escenas ‘naturales’, que tienen elementos visuales con varios colores, sombras, bordes y contrastes, mientras que las imágenes de geles de electroforesis son relativamente monótonas, por lo que esos algoritmos no aplican. En la Figura 1.4 se muestra la solución implementada para mejorar la calidad de imágenes de geles de electroforesis.

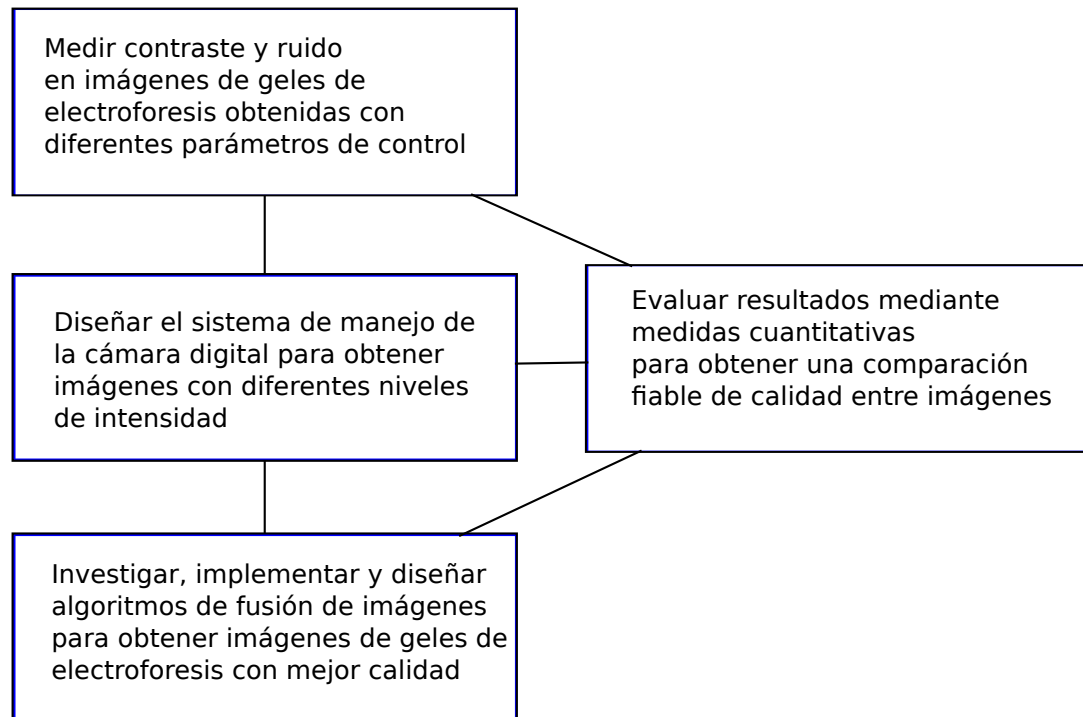


Figura 1.4: Solución desarrollada del mejoramiento de la calidad en imágenes

## 1.4. Objetivos y estructura del documento

El objetivo principal de este trabajo es implementar una etapa de adquisición y pre-procesamiento capaz de mejorar la calidad de imágenes digitalizadas de geles de electroforesis, mejorando el contraste y la razón señal a ruido de las mismas mediante fusión y ajuste multiparamétrico de la captura. Para lograr esto se realiza el control de los parámetros ganancia, brillo y obturación de la cámara digital que ayudan a mejorar el contraste y reducir el ruido de una imagen digital, así como la implementación de algoritmos de fusión de imágenes digitales obtenidas mediante el ajuste multiparamétrico de la captura. Finalmente se evalúan los resultados mediante medidas de aptitud de ruido y contraste en las imágenes de geles de electroforesis capturadas.

La estructura de este documento es la siguiente: en el capítulo 2 se incluye la teoría necesaria para el desarrollo de la solución, así como detalles de la cámara utilizada y conceptos genera-

les de análisis y procesamiento de imágenes; el capítulo 3 explica detalladamente el sistema de adquisición y pre-procesamiento implementado; el capítulo 4 contiene los resultados obtenidos con su respectivo análisis y finalmente en el capítulo 5 se plantean conclusiones y recomendaciones para trabajos futuros.

# Capítulo 2

## Marco Teórico

Como punto de partida de este trabajo se introducen los conceptos teóricos utilizados en el diseño del sistema presentado en el capítulo 3 para mejorar el contraste y la razón señal a ruido (SNR) de imágenes digitales.

Inicialmente se definen los conceptos en que se basan las mediciones cuantitativas realizadas en las imágenes digitales, luego se detallan los conceptos relacionados con la cámara digital utilizada, empleados en el ajuste multiparamétrico de la captura y por último se explican las bases teóricas para el diseño de los algoritmos de fusión de imágenes utilizados en el proyecto.

### 2.1. Imágenes digitales

La imagen digital es cualquier imagen fija que se capture en un medio electrónico y que se represente como un archivo de información que representa la cantidad de luz incidente en posiciones discretas en el espacio [8]. A partir de este concepto se observa que una imagen digital proporciona información de la realidad, propiedad indispensable para el análisis de geles de electroforesis, donde se necesita analizar la información que almacenan dichos geles y para ésto es necesario obtener imágenes con la mejor calidad posible para que no se de pérdida de información de la realidad.

Matemáticamente se presentan los siguientes conceptos básicos de imágenes digitales en el desarrollo del proyecto:

**Elemento de imagen o píxel** un elemento de imagen o píxel  $p$ , se define como  $p = (i, j) \in \mathbb{G}^2$ . Donde  $\mathbb{G}^2$ , es una rejilla bidimensional, finita, discreta y compacta que se define como  $\mathbb{G}^2 = [0 \dots M - 1] \times [0 \dots N - 1]$ , con  $M, N \rightarrow \mathbb{N}^+$ . En la Figura 2.1 se muestra la rejilla  $\mathbb{G}^2$ .

**Imagen digital** una imagen  $I$  es una función que se denota como  $I(i, j)$  o  $I(p)$ , tal que  $I : \mathbb{G}^2 \rightarrow \mathbb{R}$ .

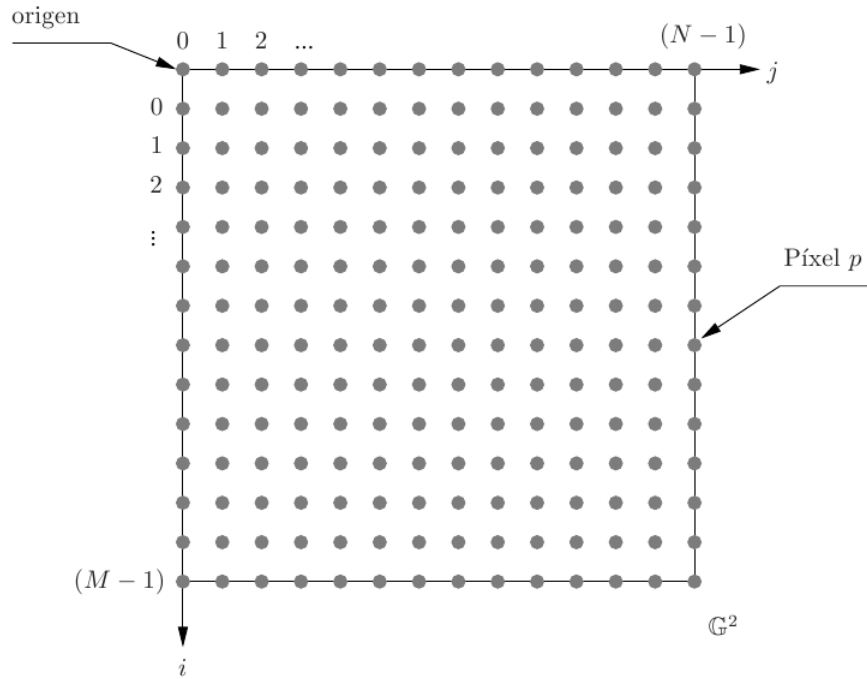


Figura 2.1: Rejilla  $\mathbb{G}^2$ . Tomado de [1]

**Vecindario de un píxel** el vecindario de un píxel está definido como el conjunto de píxeles adyacentes a un píxel central. Los posibles vecindarios de un píxel se expresan matemáticamente como

$$V_4(p) = \{(i + 1, j), (i - 1, j), (i, j + 1), (i, j - 1)\} \quad (2.1)$$

$$V_D(p) = \{(i + 1, j + 1), (i - 1, j + 1), (i + 1, j - 1), (i - 1, j - 1)\} \quad (2.2)$$

$$V_8(p) = V_4(p) \cup V_D(p) \quad (2.3)$$

donde  $V_4(p)$  se le llama vecindad de 4,  $V_D(p)$  es la vecindad diagonal y  $V_8(p)$  es el conjunto llamado vecindad de 8. En la Figura 2.2 se muestra un vecindario de manera visual.

**Histograma** el histograma es una representación estadística de una variable aleatoria por medio de celdas. El valor en una celda es proporcional a la frecuencia de ocurrencia de los valores asignados a dicha celda en la muestra evaluada. Gráficamente se representan los histogramas por medio de barras, en el eje vertical se representan las frecuencias y en el eje horizontal los valores de la variable aleatoria, de modo que será más alta, o tendrá más superficie, aquel valor que más se repite [19]. En imágenes digitales por lo general el eje horizontal representa el valor de intensidad luminosa de píxel y el eje vertical la cantidad de veces que se repite esa intensidad en la imagen, además se puede representar matemáticamente mediante

$$\underline{\mathbf{h}} = \mathcal{H}[I(i, j)] \quad (2.4)$$

donde  $\underline{\mathbf{h}}$  es el histograma generado y  $\mathcal{H}[\cdot]$  es la transformación de imagen digital  $I(i, j)$  a histograma. En la Figura 2.3 se muestra un ejemplo de histograma.

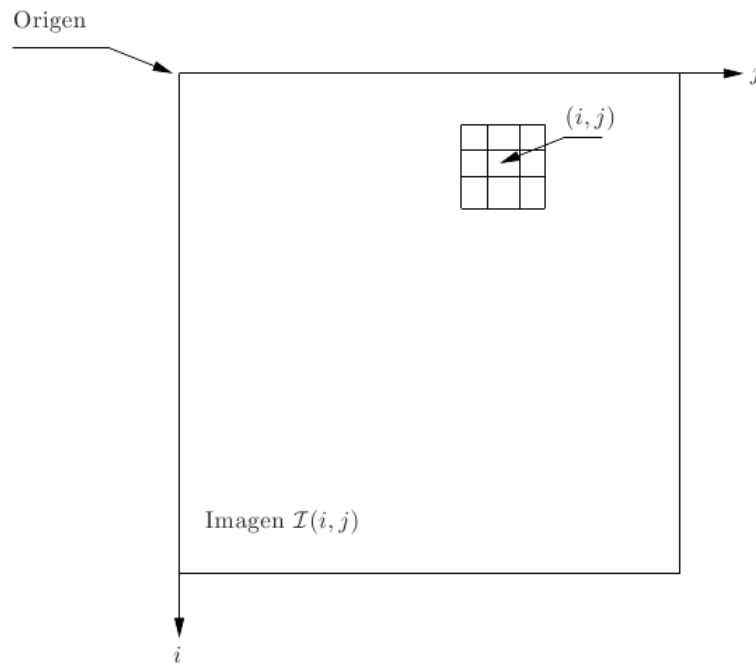


Figura 2.2: Vecindario de  $3 \times 3$  de un píxel en una imagen. Tomado de [1]

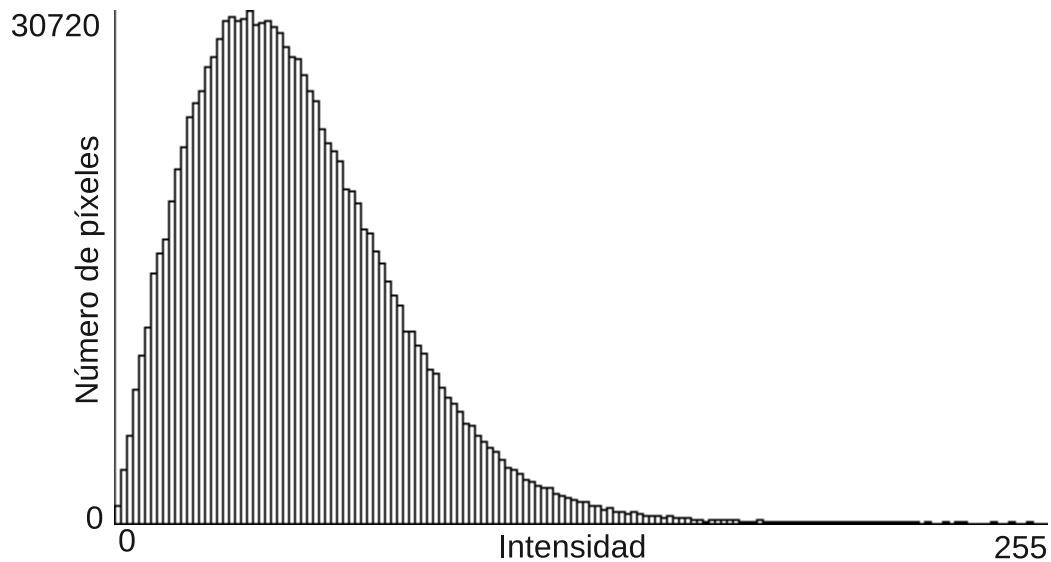


Figura 2.3: Histograma de una imagen digital de gel de electroforesis

**Dominio Espacial** el dominio es el modo en el que se trabaja en la imagen digital. En el dominio espacial los algoritmos operan directamente sobre los píxeles de la imagen [1]. En este proyecto se trabaja enteramente en este dominio cuando se aplica algún algoritmo sobre las imágenes digitales. Dichas operaciones se representan mediante

$$\hat{I}(i, j) = \mathcal{T}[I(i, j)] \quad (2.5)$$

donde  $I(i, j)$  es la imagen de entrada,  $\hat{I}(i, j)$  es la imagen procesada y  $\mathcal{T}[\cdot]$  es un

operador en  $I$  definido sobre algún vecindario de  $(i, j)$ .

Para analizar las imágenes digitales de geles de electroforesis, así como para cuantificar la calidad de cada imagen capturada se presentan algunos conceptos asociados a las imágenes digitales como lo son los siguientes:

- Intensidad
- Contraste
- Ruido

donde cada una de las características mencionadas se pueden medir de manera local o global para una imagen digital:

**Local** es el valor analizado de un píxel con su respectivo vecindario; excluye todos los píxeles que no forman parte de este conjunto.

**Global** es el valor analizado para la imagen digital como un todo.

### 2.1.1. Intensidad

En [2] se define la intensidad como la energía recogida en un cierto punto  $(i, j)$  o en toda la imagen digital  $I$  por el sistema de adquisición. Matemáticamente ésto se expresa como

$$L(i, j) = l(i, j)r(i, j) \quad (2.6)$$

donde  $L(i, j)$  es la intensidad de un píxel de la imagen en las cordenadas  $(i, j)$  o en toda la imagen digital y puede tomar valores en el rango  $0 < L(i, j) < \infty$ . La función  $l(i, j)$  es la cantidad de energía de la fuente de iluminación que incide en el objeto y se dirigiría al punto  $(i, j)$  de la imagen generada o toda la imagen generada y puede tomar valores en el rango  $0 < l(i, j) < \infty$ . Finalmente,  $r(i, j)$  es la fracción de la iluminación reflejada (no absorbida) por el objeto y puede tomar valores en el rango  $0 < r(i, j) < 1$ .

Es posible discretizar (digitalizar) el valor de intensidad mediante

$$n_L = 2^k \quad (2.7)$$

donde  $n_L$  son los niveles de intensidad y  $k$  es el número de bits usados para medir la intensidad una vez cuantificada la imagen. En este trabajo se utiliza  $k = 8$  bits lo que significa que se tienen 256 niveles de intensidad.

Además en este proyecto se trabaja con:

**Intensidad local** se define la intensidad local como el valor discreto de nivel de gris que toma un píxel  $p$  en las cordenadas espaciales  $(i, j)$ . Se trabaja con imágenes digitales de geles de electroforesis con intensidades en la escala de grises, que van de 0 a 255 (256 valores).

**Intensidad global** se define la intensidad global como el valor promedio de nivel de gris que toma una imagen digital.



### 2.1.2. Contraste

El contraste por sí mismo depende de la percepción del sistema visual humano, de donde se define el contraste de forma general como la diferencia visual que hace distinguible a un objeto de otros objetos y su fondo [16]. Ahora en el área de imágenes digitales se define contraste  $C$  como la diferencia relativa en intensidad entre un punto (píxel  $p$ ) de una imagen  $I$  y sus alrededores (vecindad  $V$  o el resto de la imagen) [8], donde para la determinación de contraste en imágenes usualmente se tienen dos componentes [13]:

1. La diferencia entre dos intensidades, donde diferencias altas producen mayor contraste.
2. Alguna medición describiendo la adaptación del ojo humano, por ejemplo la intensidad promedio del objeto (imagen) en cuestión.

A partir de estos conceptos se definen las diferentes expresiones de medición de contraste en imágenes digitales y en este trabajo se utilizan las siguientes:

**Contraste absoluto** ( $C_A$ ) es la diferencia normalizada entre la intensidad máxima  $L_{MAX}$  y mínima  $L_{MIN}$  de la región en estudio (toda la imagen o una parte de ésta) y se expresa matemáticamente por

$$C_A = \frac{L_{MAX} - L_{MIN}}{255} \quad (2.8)$$

**Contraste de Michelson** ( $C_M$ ) en [16] se define el contraste de Michelson como la diferencia de la intensidad máxima  $L_{MAX}$  y mínima  $L_{MIN}$  entre la suma de las mismas en la región de estudio (toda la imagen o una parte de ésta) y es útil cuando se tienen patrones periódicos. Se expresa matemáticamente por

$$C_M = \frac{L_{MAX} - L_{MIN}}{L_{MAX} + L_{MIN}} \quad (2.9)$$

**Contraste de Weber** ( $C_W$ ) en [13] se define el contraste de Weber como la diferencia entre la intensidad de un punto  $L(i, j)$  y la intensidad media  $\mu_L$  de la región de estudio (toda la imagen o una parte de ésta) dividido entre  $\mu_L$  y se expresa matemáticamente por

$$C_W = \frac{L(i, j) - \mu_L}{\mu_L} \quad (2.10)$$

**Contraste de intensidad** ( $C_L$ ) en [13] se define el contraste de intensidad como la diferencia de la intensidad máxima  $L_{MAX}$  y mínima  $L_{MIN}$ , entre la intensidad media  $\mu_L$  de la región de estudio (toda la imagen o una parte de ésta) y se expresa matemáticamente por

$$C_L = \frac{L_{MAX} - L_{MIN}}{\mu_L} \quad (2.11)$$

**Contraste RMS** ( $C_{RMS}$ ) en [16] se define matemáticamente el contraste RMS como

$$C_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{MN-1} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} (L(i,j) - \mu_L)^2} \quad (2.12)$$

donde el  $C_{RMS}$  utiliza los valores de intensidad de los píxeles en la región de estudio (toda la imagen o una parte de ésta) y su media aritmética para proporcionar un único valor de contraste.

Además en este proyecto se trabaja con:

**Contraste local** opera en pequeñas áreas la imagen digital y su valor depende del tipo de expresión de medición de contraste utilizado.

**Contraste global** opera en toda la imagen digital y su valor depende del tipo de expresión de medición de contraste utilizado.

### 2.1.3. Ruido

Ruido es la contaminación del valor de un píxel de una imagen que produce una divergencia entre valor medido y el valor real de dicho píxel [8]. Por lo tanto, el ruido afecta directamente la percepción de calidad de una imagen digital porque a mayor ruido, menor grado de relación entre los valores de los píxeles de la imagen y la realidad, lo que produce que el objeto no se represente en la imagen como es.

La principal fuente de ruido en imágenes digitales se da en el proceso de adquisición de éstas. Ésto se debe, la mayoría de las veces, al equipo electrónico utilizado para la captación de imágenes, en este caso la cámara digital. El desempeño de la cámara digital se ve afectado por una variedad de factores como condiciones ambientales y la calidad de la misma, lo que introduce ruido a las imágenes capturadas.

Algunos de los tipos de ruido más comunes presentes en imágenes digitales son:

**Ruido blanco normal** llamado así por la distribución estadística que lo describe, por eso también se le denomina ruido blanco gaussiano. El ruido blanco normal tiene un efecto general en toda la imagen, es decir, la intensidad de cada píxel de la imagen se puede ver alterada en cierta medida, de acuerdo con una distribución normal. En la Figura 2.4a se muestra un ejemplo de una imagen digital con ruido blanco normal.

**Ruido impulso (sal y pimienta)** el ruido impulsional por lo general es de tipo bipolar donde solo puede presentar dos valores en la imagen digital blanco o negro (de aquí su nombre sal y pimienta) distribuidos aleatoriamente por toda la imagen digital. Éste también puede ser de tipo unipolar si se presenta solo uno de los valores. A diferencia del ruido blanco normal el ruido impulsional tiene un efecto sobre un subconjunto del total de píxeles de la imagen. En la Figura 2.4b se muestra un ejemplo de una imagen digital con ruido impulsional.

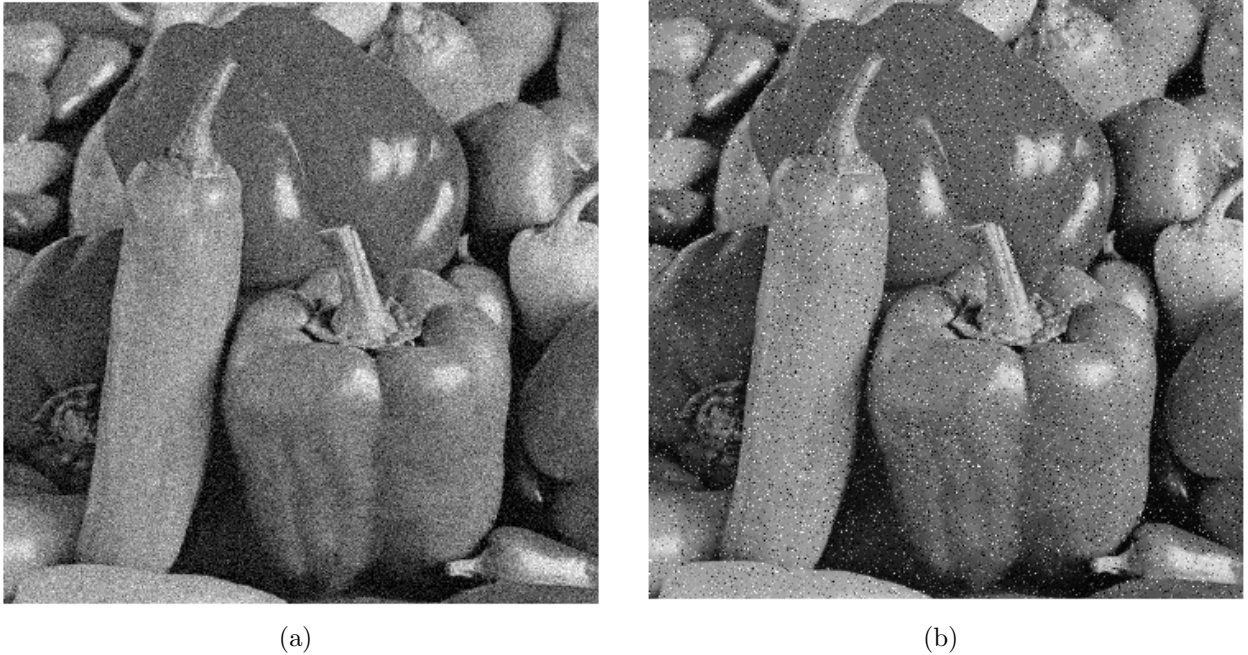


Figura 2.4: Imágenes digitales con ruido (a) blanco normal e (b) impulsional. Tomadas de [1]

## 2.2. Cámara digital

Una cámara digital es un sistema que captura imágenes mediante un sensor electrónico [11]. En la Figura 2.5 se observa una cámara digital de uso industrial.



Figura 2.5: Ejemplo de una cámara digital. Tomado de [18]

Los aspectos importantes a conocer de una cámara digital para seleccionar el dispositivo adecuado para el sistema de adquisición del proyecto son:

- Tecnología de fabricación
- Conectividad
- Parámetros controlables

### 2.2.1. Tecnología de fabricación

El sensor electrónico puede ser construido con dos tipos diferentes de tecnología, ya sea un dispositivo de carga acoplada (CCD) o un semiconductor de metal-óxido complementario (CMOS), donde el CCD es un sensor con diminutas celdas fotoeléctricas que registran la imagen y el CMOS es un sensor con varios transistores en cada píxel que amplifican y mueven la carga usando conexiones entre ellos, donde cada píxel es almacenado individualmente [4].

Existen diferencias entre los sensores CCD y CMOS entre las que se pueden listar:

1. Los sensores CCD generan imágenes de alta calidad y bajo ruido, mientras que los sensores CMOS tradicionalmente generan más ruido.
2. La sensibilidad a la luz de un chip CMOS tiende a ser menor.
3. CMOS tradicionalmente consume menos energía.

### 2.2.2. Conectividad

La mayor parte de las cámaras digitales se pueden conectar directamente a la computadora para transferir su información [11]. Existen diferentes formas para realizar ésta conexión, entre las más frecuentes encontramos las siguientes:

**USB** es el método más utilizado, donde la conexión es alámbrica, de tipo serial y la velocidad de transmisión de datos puede ser de hasta 480 Mbps.

**FireWire (IEEE1394)** es una conexión alámbrica, de tipo serial con velocidades de transmisión de datos de hasta 800 Mbps, lo que hace que sea muy utilizada en cámaras de alta calidad.

**Conexiones inalámbricas** existen diferentes tipos, como lo son bluetooth o Wi-Fi, todas con el inconveniente de velocidades de transmisión relativamente bajas, alrededor de los 11 Mbps, utilizadas en aplicaciones como cámaras de seguridad, donde dicho ancho de banda es suficiente para los tamaños de imagen y cuadros por segundo utilizados.

### 2.2.3. Parámetros controlables

Como ya se ha mencionado, la calidad de una imagen depende de la etapa de adquisición de las mismas, donde es deber del diseñador del sistema establecer las condiciones idóneas de iluminación, así como de conocer y definir los parámetros necesarios de la cámara digital para obtener la mejor calidad posible de una imagen digital. En el sistema diseñado se controlan tres diferentes parámetros de la cámara:

**Brillo** este parámetro altera el nivel de intensidad total de toda la imagen, variando el nivel de intensidad individual de cada píxel, por lo que el brillo simplemente representa un “offset” en los niveles de gris de la imagen. En la Figura 2.6 se ejemplifica el concepto, al observarse diferentes niveles de brillo para una misma imagen.

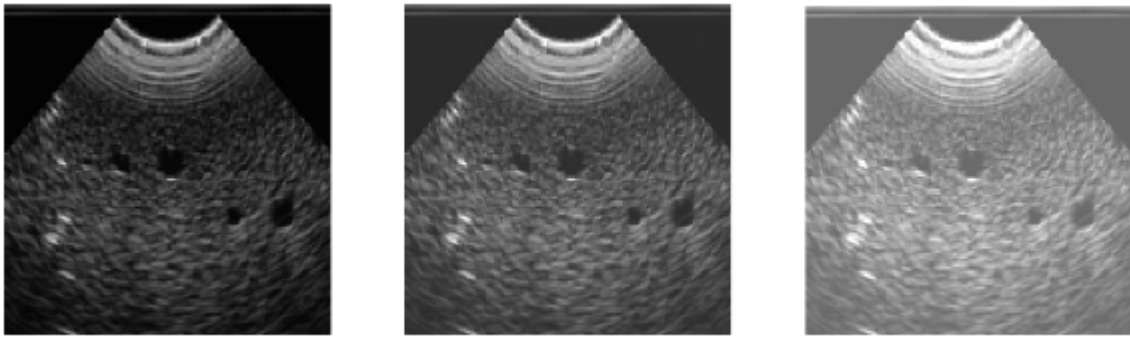


Figura 2.6: Efecto de la variación de brillo de menor a mayor en una imagen digital. Tomado de [6]

**Ganancia** este parámetro determina el nivel de amplificación de la señal de salida obtenida por el sensor de la cámara. Un incremento en la amplificación incrementa el contraste, sin embargo, produce imágenes más ruidosas. En la Figura 2.7 se ejemplifica el concepto, al observarse diferentes niveles de ganancia para una misma imagen.



Figura 2.7: Efecto de la variación de ganancia de menor a mayor en una imagen digital. Tomado de [6]

**Obturación** este parámetro determina el tiempo de exposición del sensor de la cámara, donde un nivel bajo de obturación produce un tiempo de exposición corto, lo que genera imágenes oscuras, mientras un nivel de obturación alto captura imágenes claras debido a que le llega luz durante más tiempo al elemento sensible. En la Figura 2.8 se ejemplifica el concepto, al observarse diferentes niveles de obturación para una misma imagen.

### 2.3. Fusión de imágenes

La fusión de imágenes es un proceso que combina información de diferentes imágenes de una misma escena para formar una imagen con mayor calidad [10]. Por lo general se da énfasis a la información más relevante de cada imagen, según los dominios a mejorar. Para este trabajo estos dominios son el contraste y el ruido en imágenes digitales de gels de electroforesis, donde se toman imágenes a diferentes niveles de intensidad para un mismo gel

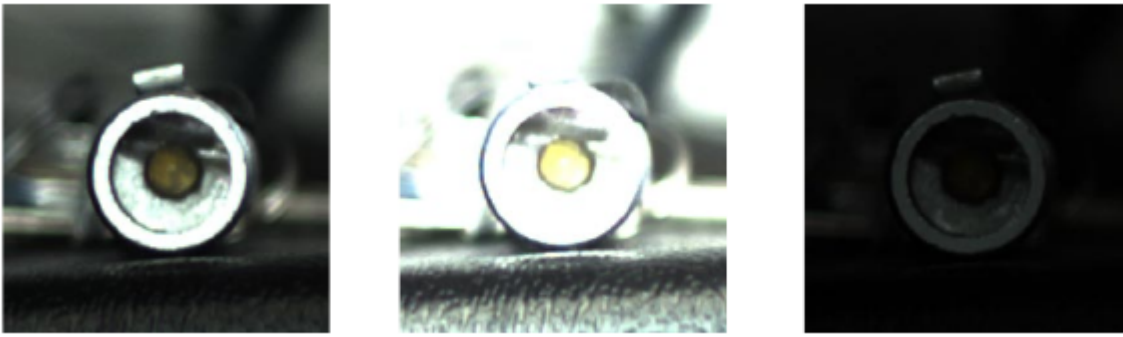


Figura 2.8: Niveles de obturación en una imagen digital, nivel medio, nivel alto y nivel bajo. Tomado de [6]

de electroforesis con el objetivo de formar una imagen digital del gel analizado con mejor contraste y el menor ruido posible.

Antes de realizar la fusión para generar la imagen fusionada  $I_f$  se debe elegir el conjunto de las imágenes a fusionar, conocidas como las imágenes de entrada  $I_{in}$  del sistema de fusión  $\mathcal{F}[\cdot]$  donde éstas deben ser seleccionadas de forma tal que que presenten valores de intensidad múltiples para captar detalles propios de cada imagen y mejorar la visualización final en una imagen con más detalles y valores de intensidad únicos [17].

En [10] se describe que el proceso de fusión puede ser realizado en tres niveles diferentes según lo que se requiera:

**Nivel de píxel** en este nivel los métodos de fusión operan directamente sobre las intensidades de los píxeles de las imágenes de entrada. Es útil cuando las imágenes son relativamente homogéneas; además, el procesamiento es rápido.

**Nivel de característica** en este nivel primero se extraen las características de las imágenes de entrada y mediante algún criterio se seleccionan las deseadas. Por último se realiza el proceso de fusión basado en las características seleccionadas. Este método proporciona la oportunidad de seleccionar qué características se desean mejorar en la fusión.

**Nivel de decisión** este nivel involucra la selección y clasificación de objetos en las imágenes fuente, donde los métodos de fusión pueden operar sobre objetos específicos. Es útil cuando las imágenes son muy heterogéneas y se desean fusionar solo partes de las imágenes de entrada.

A partir de este criterio los métodos de fusión seleccionados en los cuales se basan los algoritmos de fusión de imágenes implementados en este trabajo son:

- Fusión simple (SF: Simple Fusion)
- Fusión de exposición (EF: Exposure fusion)

### 2.3.1. Fusión simple (SF)

El método de fusión simple se presenta en [20] y el mismo consiste en obtener una imagen fusionada a partir de diferentes imágenes de entrada con distintos niveles de intensidad. Este sistema de fusión está dado por

$$I_f = \mathcal{F}_S[I_{in1}, I_{in2}, \dots, I_{ink}] \quad (2.13)$$

donde la expresión matemática del sistema  $\mathcal{F}_S[\cdot]$  para calcular la intensidad que se almacena en cada píxel de la imagen fusionada es

$$L_f(i, j) = \frac{1}{k} \sum_{x=1}^k L_{inx}(i, j) \quad (2.14)$$

donde  $k$  es el número de imágenes a fusionar.

### 2.3.2. Fusión de exposición (EF)

El método de fusión de exposición se presenta en [15] y el mismo consiste en obtener una imagen fusionada a partir de diferentes imágenes de entrada con distintos niveles de intensidad, donde se asignan pesos  $W$  a cada píxel según su valor de contraste  $C$ , saturación  $S$  y nivel de exposición  $E$ . En la Tabla 2.1 se explica cada uno de estos parámetros del píxel y la forma matemática de obtener estos pesos es

$$W_{inx}(i, j) = (C_{inx}(i, j))^{w_C} \times (S_{inx}(i, j))^{w_S} \times (E_{inx}(i, j))^{w_E} \quad (2.15)$$

con los exponentes  $w_C$ ,  $w_S$  y  $w_E$  con valores en el intervalo de 0 a 1 según el grado de influencia que se le desea dar a cada parámetro en el proceso de fusión.

**Tabla 2.1:** Parámetros relevantes del píxel para el algoritmo EF

Parámetro	Descripción	Valor
$C$	Diferencia de intensidad del píxel con sus alrededores	Depende del método de medición de contraste utilizado
$S$	Desviación estándar entre los canales de color del píxel	Depende del método de medición de saturación utilizado
$E$	Relevancia que se le toma al nivel de intensidad del píxel	Dado por $\exp \left\{ -\frac{(L(i,j) - L_{central})^2}{2\sigma^2} \right\}$

Este sistema de fusión está dado por

$$I_f = \mathcal{F}_E[I_{in1}, I_{in2}, \dots, I_{ink}] \quad (2.16)$$

donde la expresión matemática del sistema  $\mathcal{F}_E[\cdot]$  para calcular la intensidad que se almacena en cada píxel de la imagen fusionada es

$$L_f(i, j) = \frac{1}{\sum_{x=1}^k W_{inx}(i, j)} \sum_{x=1}^k L_{inx}(i, j) W_{inx}(i, j) \quad (2.17)$$

con  $k$  es el número de imágenes a fusionar.





## Capítulo 3

# Sistema de mejoramiento de contraste y razón señal a ruido de imágenes

En este capítulo se presenta detalladamente el sistema diseñado para mejorar la calidad de una imagen, iniciando con el diseño de los algoritmos de medición de contraste y ruido en imágenes, el diseño e implementación del sistema de captura de la cámara digital, hasta el diseño e implementación de algoritmos de fusión de imágenes digitales para mejorar la calidad global y local de las imágenes adquiridas.

Para mejorar la calidad de una imagen se utilizan los parámetros que afectan directamente la captura de la misma. Por esta razón se emplean medidas cuantitativas para medir la calidad de una imagen. En el proyecto se utiliza el contraste y el nivel de ruido estimado (NRE) como medidas de aptitud de calidad, de aquí que en la solución al problema se inicie explicando las mediciones realizadas de éstas en distintas imágenes de geles de electroforesis capturadas con diferentes parámetros. Después, debido a que el sistema a utilizar es no lineal, se necesita una estrategia para el manejo del mismo. En este caso se utilizaron los resultados obtenidos por las mediciones de calidad en las diferentes imágenes de geles para realizar un estudio estadístico aplicable a la optimización del sistema de adquisición. Con el optimizador realizado, es posible seleccionar imágenes con baja intensidad luminosa (oscuras), media intensidad luminosa (medias), alta intensidad luminosa (claras), lo que facilita la selección de imágenes para la fusión, debido a que cada una de las imágenes con diferentes niveles de intensidad presenta características óptimas de contraste y ruido en diferentes zonas de la imagen. Al fusionarse las imágenes dan origen a otra con mayor índice de calidad. El esquema general propuesto se muestra en la Figura 3.1.

### 3.1. Algoritmos de medición

En las imágenes digitales de geles de electroforesis se necesitan conocer diferentes características para determinar el nivel de calidad de las mismas. Por esta razón en el proyecto se diseñan, seleccionan e implementan algoritmos de medición para los diferentes parámetros a

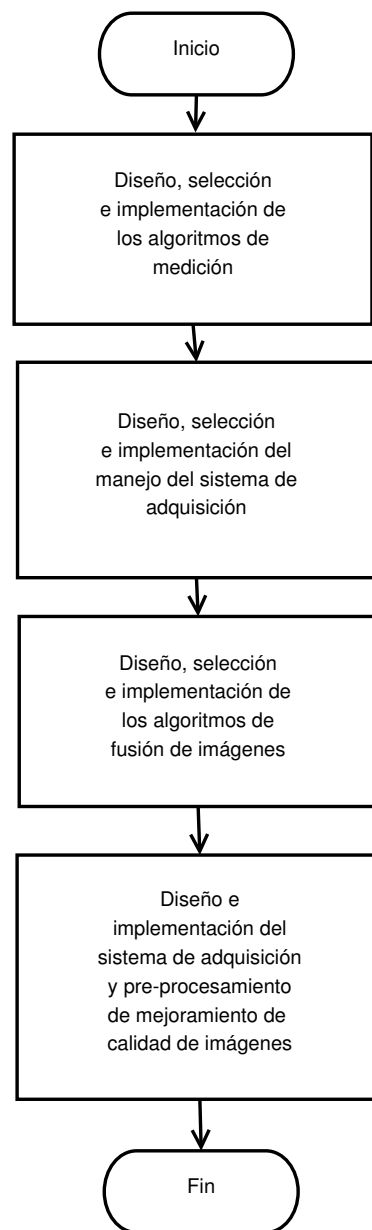


Figura 3.1: Diagrama completo de la solución realizada

mejorar en las imágenes de geles de electroforesis. Básicamente los algoritmos utilizados se pueden dividir en tres grupos:

- Algoritmos de medición de intensidad
- Algoritmos de medición de contraste
- Algoritmo de medición de ruido

### 3.1.1. Algoritmos de medición de intensidad

Estos algoritmos se utilizan para medir el nivel de intensidad luminosa de las imágenes digitales y así poder clasificarlas en imágenes “claras”, “medias” o “oscuras” según su valor. Los algoritmos de intensidad se separan en locales y globales según la información que

proporcionan.

### Intensidad local

La intensidad local  $L(i, j)$  en una imagen digital de gel de electroforesis es el valor discreto de nivel de gris que toma un píxel  $p$  en las coordenadas espaciales  $(i, j)$ , donde la escala de grises tiene 256 valores discretos que van de 0 a 255. Por lo tanto, en este trabajo se obtiene la intensidad local de un píxel en la imagen digital  $I$  leyendo el valor almacenado en las coordenadas espaciales  $(i, j)$  de la matrix de la imagen, obtenida mediante el sensor electrónico de la cámara.

### Intensidad global

La intensidad global en una imagen digital de gel de electroforesis es el valor promedio de nivel de gris, donde la escala de grises va de 0 a 255. Por lo tanto, en este proyecto se obtiene la intensidad global de una imagen digital mediante las siguientes expresiones:

**Media aritmética de intensidad** ( $\mu_L$ ) es el valor obtenido al sumar todos los píxeles  $p$  de la imagen y dividir el resultado entre el tamaño de la imagen digital  $M \times N$ , su expresión matemática es

$$\mu_L = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} L(i, j) \quad (3.1)$$

**Mediana de intensidad** ( $Me_L$ ) es el valor que ocupa el lugar central de todos los píxeles en la imagen cuando éstos están ordenados de menor a mayor. En la Figura 3.2 se muestra el algoritmo utilizado para calcular la  $Me_L$ .

### 3.1.2. Algoritmos de medición de contraste

Estos algoritmos de medición se utilizan como un factor de calidad en las imágenes de geles de electroforesis, debido a que se busca cuantificar la percepción del sistema visual humano en cuanto a la diferencia relativa en intensidad entre un punto (píxel  $p$ ) de una imagen  $I$  y sus alrededores (vecindad  $V$  o el resto de la imagen) [8]. De aquí que no exista una sola forma de cuantificar el contraste y por lo tanto, en este trabajo se utilizan diversos algoritmos para que evaluar las ventajas y desventajas de cada método. Por otra parte, los algoritmos se separan en locales y globales según actúen sobre áreas de la imagen o sobre la imagen completa respectivamente.

### Contraste local

El contraste local  $C_{lo}$  en una imagen se define como el grado de contraste en los límites de los detalles que tienen diferencias lumínicas. Cuanto más contraste haya en los límites entre

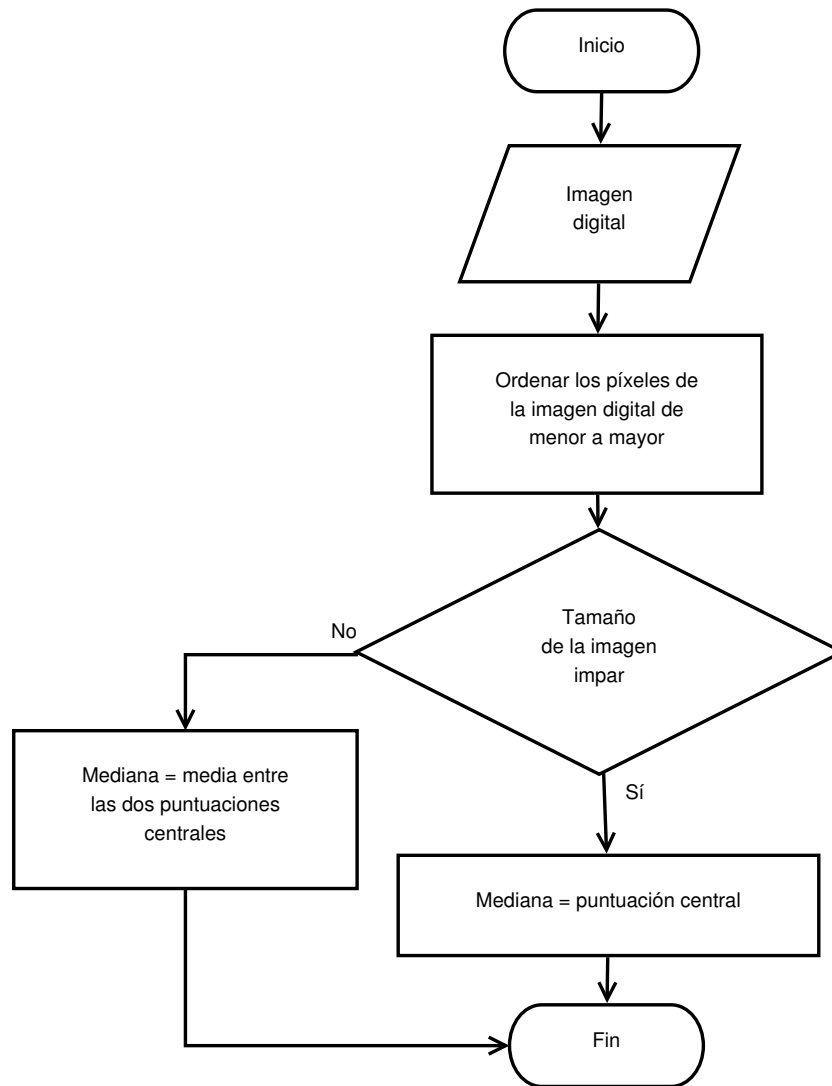


Figura 3.2: Diagrama de flujo del cálculo de  $Me_L$

una zona oscura y otra más clara, mayor será el contraste local y mayor será la percepción de la calidad de la imagen [5]. Con los algoritmos de contraste local se mide el contraste en pequeñas áreas de la imagen, lo que permite detectar cuáles zonas específicas de la imagen son en las que se necesitan mejorar el nivel de calidad para que el sistema de percepción visual humana y el sistema computacional sean capaces de distinguir más detalles.

Los algoritmos de contraste local generan matrices de contraste  $\mathbf{C}$  de igual tamaño que la imagen digital, donde cada píxel  $p$  de la imagen  $I$  tiene su valor de contraste local asociado en la posición  $(i, j)$ . Para esto se aplican operaciones de vecindad sobre pequeñas áreas de la imagen original con el fin de obtener las diferentes matrices de contraste. El tamaño de estas áreas está dado por el tamaño de la vecindad  $V_8(p)$  (rejilla cuadrada con píxel central  $p$  y vecinos  $q$ ) seleccionado, donde los valores de contraste se van almacenando en la matrix de contraste, exactamente en la posición del píxel  $p$  y no en la posición de sus píxeles vecinos  $q$ . Esta operación se realiza desde el píxel  $(0, 0)$  (primer píxel de la imagen) hasta el píxel  $(M - 1, N - 1)$  (último píxel de la imagen). En la Figura 3.3 se muestra el algoritmo implementado para calcular los diferentes contrastes locales. Se ofrecen las cinco opciones de

contraste presentadas en la sección 2.1.2 (absoluto, de Michelson, de Weber, de intensidad y RMS) en sus versiones locales.

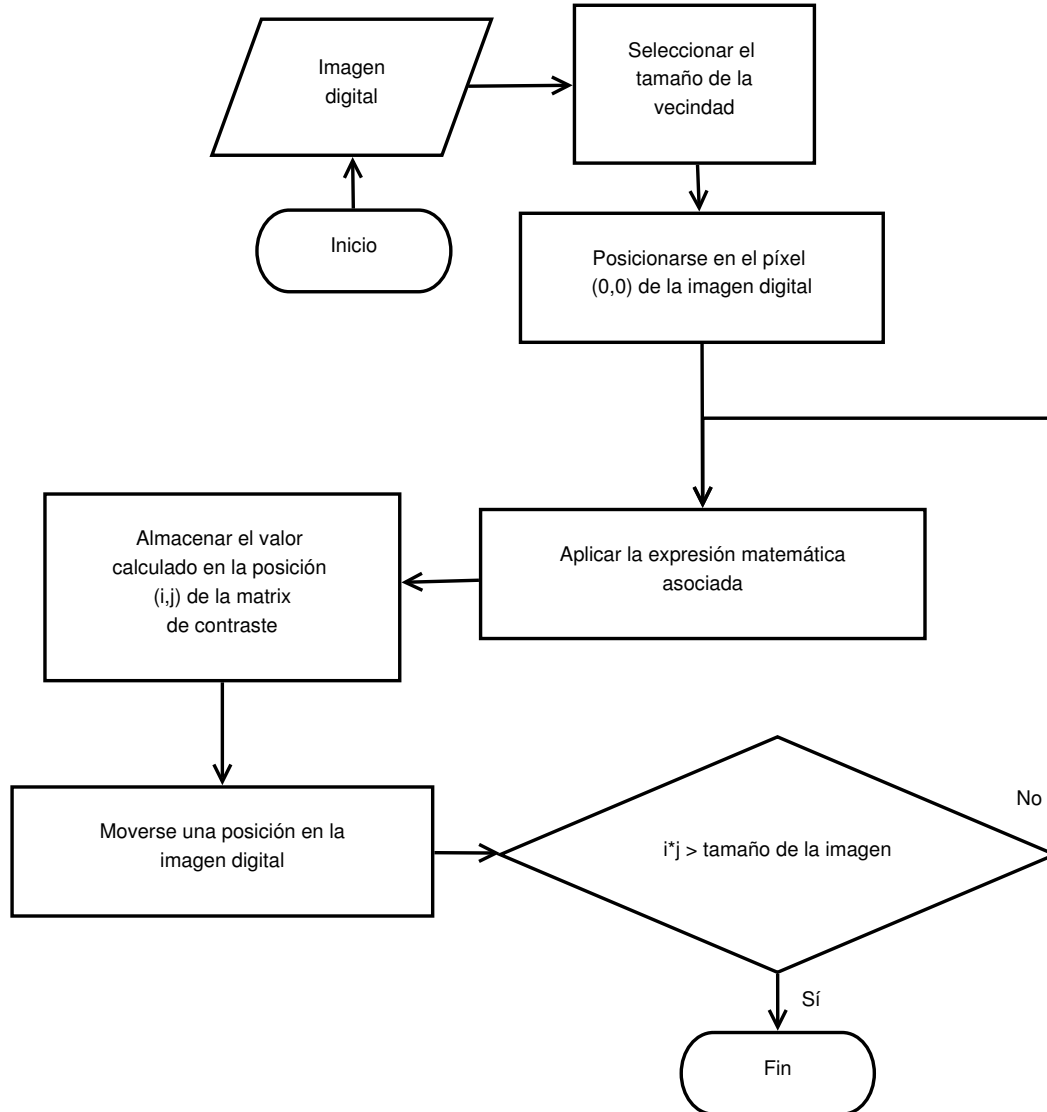


Figura 3.3: Diagrama de flujo del cálculo de contraste local

### Contraste global

El contraste global  $C_G$  en una imagen digital de gel de electroforesis corresponde a la diferencia total de valores extremos en ésta y proporciona una medición general de la calidad de la misma. Se puede seleccionar entre las 5 variables globales presentadas en la sección 2.1.2.

### 3.1.3. Algoritmo de medición de ruido

El ruido es un factor que afecta la calidad de una imagen digital, Un sistema de adquisición ideal debe reproducir la realidad en la imagen digital y el ruido produce que los píxeles de

la imagen diverjan entre su valor medido y su valor real. De aquí el diseño e implementación de un algoritmo que estime el nivel de ruido en imágenes digitales.

Como se mencionó en el marco teórico (sección 2.1.3) el ruido en imágenes digitales proviene principalmente del sistema de adquisición (en este caso la cámara digital con sensor CCD). El ruido producido por la cámara CCD no es simplemente aditivo, sino dependiente del nivel de intensidad de la imagen [7]. Por esta razón se diseña el algoritmo de medición de ruido como un sistema de estimación de ruido, que considera la imagen como una señal con áreas homogéneas de intensidad contaminadas con ruido. En la Figura 3.4 se muestra el algoritmo de estimación diseñado e implementado en este trabajo y se divide en las siguientes etapas:

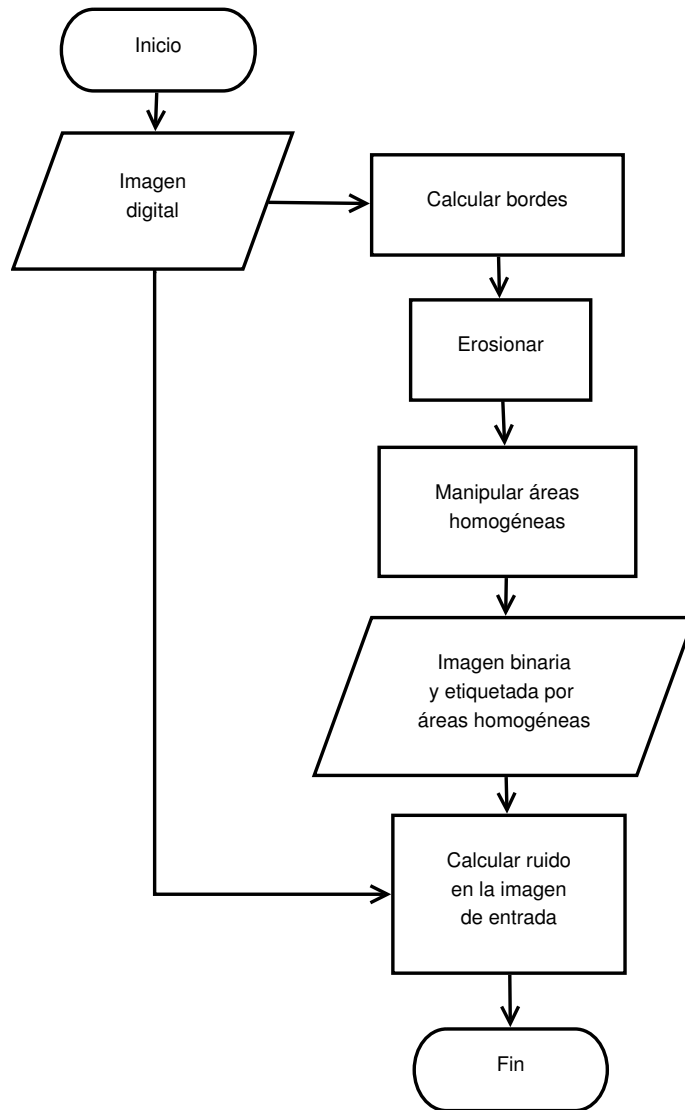


Figura 3.4: Diagrama de flujo del cálculo de ruido en imágenes digitales

### Detección de bordes

Los bordes de una imagen digital se definen como transiciones entre dos regiones de niveles de gris significativamente distintos. Suministran información sobre las fronteras de los objetos y

se utilizan para segmentar la imagen, reconocer objetos, etc. [8]. Aquí se calculan y detectan los bordes de la imagen de entrada, para separar las áreas homogéneas.

Por otra parte en el área de procesamiento de imágenes digitales, la detección de bordes es una operación conocida. Para efectos de este trabajo se seleccionó el algoritmo de Canny [19] que es un algoritmo estándar basado en la optimización de un criterio de “calidad de borde” definido en términos de gradientes, supresión de no-máximos y umbralización.

## Erosión

En la etapa de detección de bordes se aplica el algoritmo Canny y se genera una imagen de tipo binario con los bordes representando el 0 (color negro) y el fondo el 1 (color blanco). En esta etapa se realiza la operación morfológica de erosión con el objetivo de expandir los bordes y obtener áreas de la imagen de entrada más homogéneas para la siguiente etapa del algoritmo de medición de ruido. La erosión [8] es un método del área de procesamiento de imágenes que aplica un elemento estructural (dado por el tamaño y la forma de la vecindad de un píxel seleccionada) a la imagen de entrada, sin cambiar el tamaño de la imagen de salida.

## Áreas homogéneas

En esta etapa se determinan, clasifican y etiquetan las áreas homogéneas en la imagen procesada proveniente de la etapa de erosión. Para realizar esta operación se utilizó un algoritmo de etiquetación rápida [12], el cual detecta componentes conectados entre píxeles en imágenes binarias, donde los bordes son los separadores entre áreas homogéneas cuando encierran segmentos completos.

## Estimación del nivel de ruido

Esta etapa recibe la imagen binaria y etiquetada obtenida mediante todas las etapas anteriores. Se parte del supuesto que esta imagen aproxima los segmentos con valores de intensidad homogénea en la imagen original, por lo que diferencias en los valores de píxel en estas áreas homogéneas se deben al efecto del ruido producido principalmente por la cámara CCD.

Para estimar el ruido en la imagen original se realiza el cálculo de la diferencia de intensidades de cada píxel de la imagen original con la respectiva media aritmética del segmento de la imagen a la que pertenece este píxel, excluyendo los píxeles que determinan bordes expandidos en la imagen original. Por otra parte, puesto que esta diferencia de intensidades puede ser negativa, se utiliza

$$\text{NRE} = \sqrt{\frac{1}{\sum_{SH=1}^k T_{SH}} \sum_{SH=1}^k \sum_{p=1}^{T_{SH}} (L_{SH}(p) - \mu_{SH})^2} \quad (3.2)$$

expresión matemática similar a la desviación estándar, con la diferencia de que existe una única media aritmética  $\mu_{SH}$  para cada segmento homogéneo, obtenida mediante

$$\mu_{SH} = \frac{1}{T_{SH}} \sum_{p=1}^{T_{SH}} L_{SH}(p) \quad (3.3)$$

donde  $T_{SH}$  es el tamaño (número de píxeles) del segmento homogéneo utilizado y  $k$  el número de segmentos homogéneos. El NRE obtenido corresponde a la desviación que produce el ruido en los píxeles de la imagen de entrada.

## 3.2. Optimización del sistema de adquisición de imágenes

El sistema de adquisición de imágenes digitales está formado por la cámara digital y un optimizador donde se determinan los parámetros de brillo  $B$ , ganancia  $G$  y obturación  $O$  de la cámara para obtener imágenes con diferentes niveles de intensidad específicamente en tres rangos: baja intensidad luminosa (imagen oscura  $I_o$ ), media intensidad luminosa (imagen media  $I_m$ ) y alta intensidad luminosa (imagen clara  $I_c$ ); con el mayor contraste y menor ruido posible.

El sistema de adquisición es un sistema electrónico que depende tanto de las entradas como de las salidas (lazo cerrado) con las siguientes características:

- MIMO (Múltiples entradas, múltiples salidas)
- No lineal

El sistema presenta perturbaciones como la iluminación, temperatura, tipo de sensor de la cámara, modo de transmisión de datos, entre otras [14]. Por eso se utilizan técnicas de manipulación aproximadas que presentan rangos de equilibrio.

En la Figura 3.5 se muestra el sistema de optimización propuesto para la adquisición de imágenes digitales.

El manejo de la cámara debe ser capaz de auto-ajustar los parámetros manipulables ( $B$ ,  $G$  y  $O$ ) y además evaluar los resultados para saber si se obtuvo la imagen deseada. Para esto se necesita contar con una base de datos en el optimizador, adquirida previamente mediante la simulación de situaciones específicas. Se divide el diseño del optimizador en dos etapas;

- Análisis estadístico del comportamiento del sistema
- Evaluación y manipulación

### 3.2.1. Análisis estadístico

En esta etapa se generan imágenes digitales mediante simulaciones para obtener las condiciones necesarias para la etapa de manipulación y evaluación. El procedimiento a seguir es el siguiente:



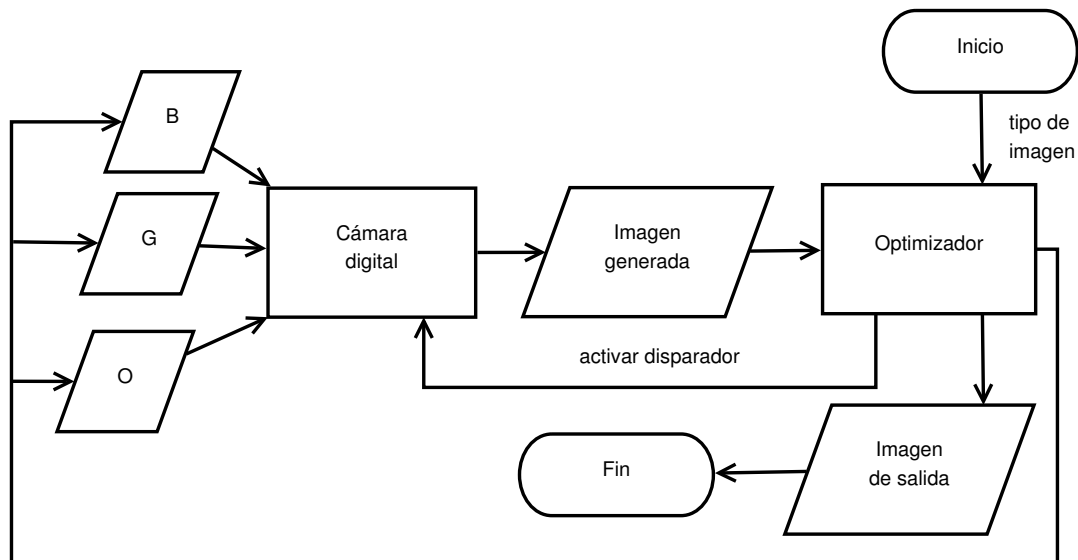


Figura 3.5: Diagrama del sistema de adquisición optimizado de imágenes digitales

1. Se generan imágenes variando cada uno de los parámetros a utilizar de la cámara ( $B$ ,  $G$  y  $O$ ) individualmente y grupalmente, a diferentes niveles de perturbación, como por ejemplo, imágenes generadas a diferentes horas del día y a niveles de iluminación artificial diferentes.
2. Después, se mide el efecto de estos parámetros sobre las características a mejorar (contraste y NRE) en las imágenes generadas.
3. Posteriormente, se obtienen relaciones entre las entradas y salidas del sistema en base a los resultados obtenidos en el punto anterior.
4. Finalmente, debido a que en el optimizador lo que se desea es obtener imágenes claras, medias y oscuras con el mejor contraste y NRE posibles, se asigna un rango de intensidades globales para lo que es detectado por el sistema como imágenes claras, medias y oscuras, considerando que éstas no pueden ser ni extremadamente claras, ni extremadamente oscuras.

### 3.2.2. Etapa de evaluación y manipulación

En esta etapa se toman en cuenta las condiciones obtenidas en el análisis estadístico de las simulaciones realizadas y a partir de estas se diseña la evaluación de imágenes y manejo de la cámara digital.

Con el análisis estadístico del sistema de adquisición de este proyecto, se obtuvieron las siguientes condiciones para el diseño del optimizador:

1. El parámetro del brillo  $B$  en la cámara no realiza ningún efecto significativo sobre el ruido y el contraste en imágenes, por lo que se puede eliminar de las variables a manipular.

2.  $O$  y  $G$  se comportan similar, ambos aumentan la intensidad global de la imagen cuando se aumenta su valor.
3. El ruido incrementa con la ganancia, mientras que la tasa de captura disminuye con la obturación, por lo que para este sistema se utilizan  $G$  bajas (en el intervalo [350, 500] para la cámara utilizada) y  $O$  es la variable manipulada, puesto que lo que se desea son imágenes y no video.
4. El nivel de iluminación varía el valor de los parámetros necesarios para obtener intensidades globales iguales en las imágenes.
5. El ruido y el contraste se comportan de manera similar, sin embargo, ganancias bajas disminuyen el ruido pero no así el contraste.
6. Se define el rango de imágenes en la escala de grises como sigue,  $I_c$  en el intervalo [180, 220],  $I_m$  en el intervalo [130, 170],  $I_o$  en el intervalo [80, 120].

Tomando en cuenta estas condiciones se diseña el manejo automático del sistema de adquisición mediante el algoritmo de la Figura 3.6. La imagen de inicialización depende del tipo de imagen ( $I_o$ ,  $I_m$  o  $I_c$ ) a obtener por el optimizador, donde los valores de  $B$ ,  $O$  y  $G$  iniciales para capturarla se estimaron en el análisis estadístico para cada nivel de intensidad requerido. Después, con base en la intensidad global de la imagen de inicialización se selecciona entre las condiciones de poca iluminación o iluminación “normal” para generar diez imágenes con diferentes valores de  $B$ ,  $O$  y  $G$  estimados y por último seleccionar de este conjunto la que posee mejor valor de contraste global y menor nivel de ruido estimado.

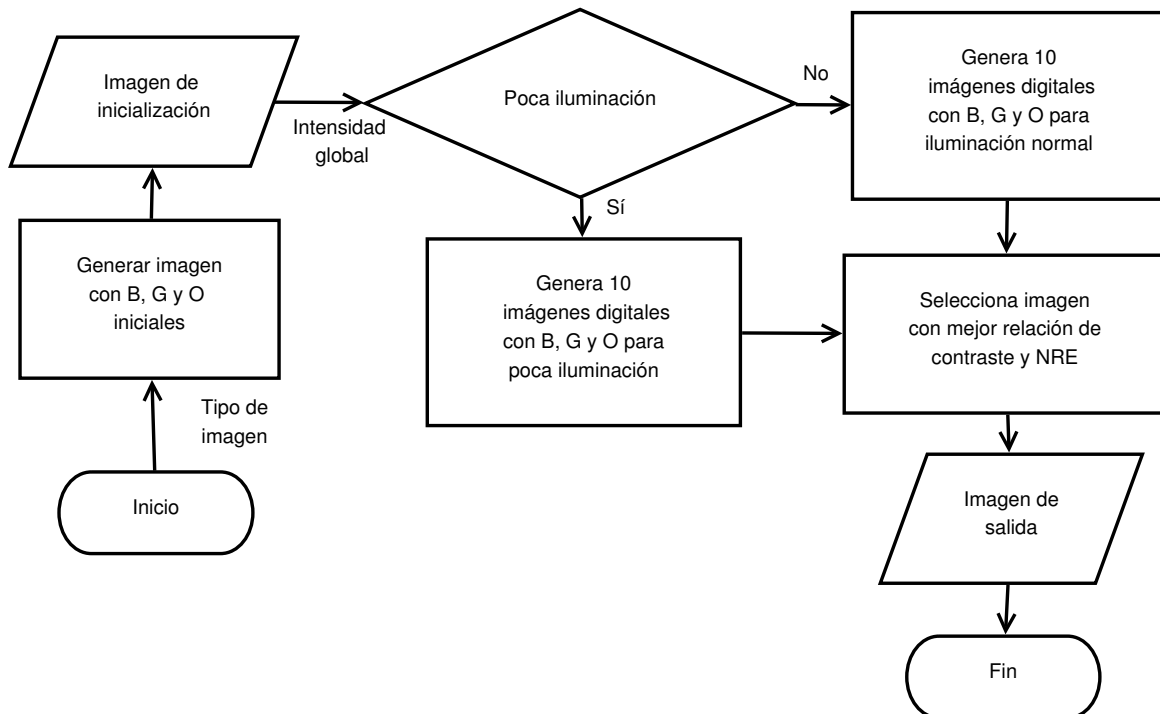


Figura 3.6: Diagrama de flujo del manejo para el sistema de adquisición

### 3.3. Algoritmos de fusión de imágenes

Estos algoritmos permiten mejorar el nivel de contraste y el NRE, mediante la fusión de imágenes a diferentes niveles de intensidad de una misma escena, con el objetivo de generar una imagen única de mejor calidad. Este procedimiento se muestra en la Figura 3.7.

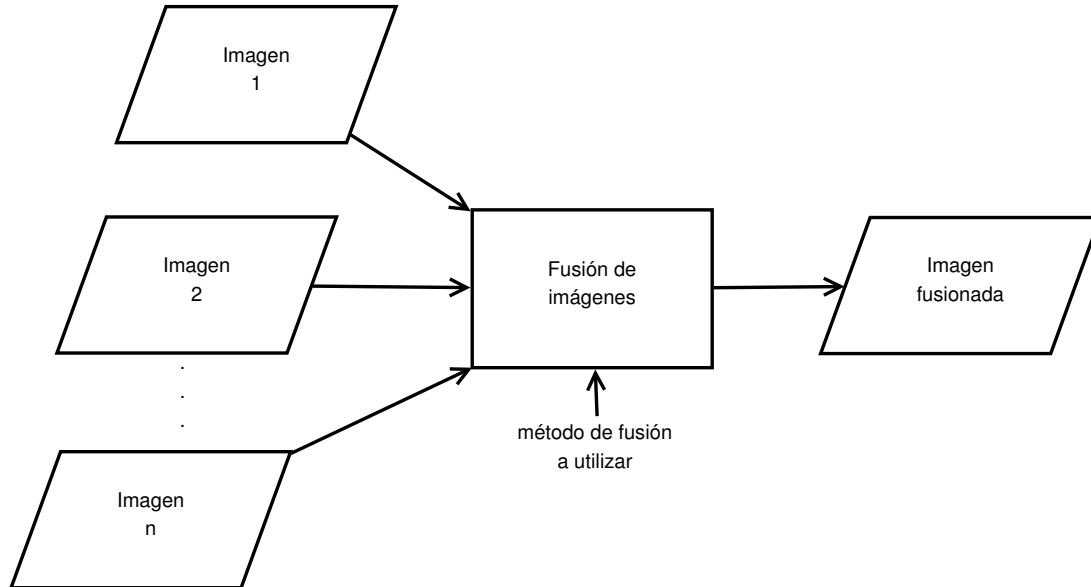


Figura 3.7: Diagrama de fusión de imágenes digitales

Para el diseño de los algoritmos de fusión implementados se toman en cuenta las siguientes consideraciones [10]:

1. El proceso de fusión debe preservar toda la información relevante de las imágenes de entrada en la imagen fusionada.
2. La técnica de fusión no debe provocar ninguna inconsistencia con la realidad en la imagen final.
3. Efectos indeseados (bajo contraste) y el ruido deben ser suprimidos al máximo.

Además como se mencionó en el marco teórico el proceso de fusión puede ser realizado en tres niveles diferentes y en este proyecto se selecciona un algoritmo a nivel de píxel y otro a nivel de característica para comparar resultados. No se selecciono ningun algoritmo a nivel de decisión debido a que las imágenes digitales de geles de electroforesis no presentan objetos diferentes y se desean mejorar sus propiedades en toda la imagen. Los algoritmos seleccionados son:

- Algoritmos de fusión simple (nivel de píxel)
- Algoritmo de fusión de exposición (nivel de característica)

#### 3.3.1. Algoritmo de fusión simple (SF)

Este algoritmo utiliza el método de fusión simple presentado en el marco teórico (sección 2.3.1), donde se obtiene una imagen fusionada a partir de diferentes imágenes de entrada

con distintos niveles de intensidad. En la Figura 3.8 se muestra el diagrama de este algoritmo.

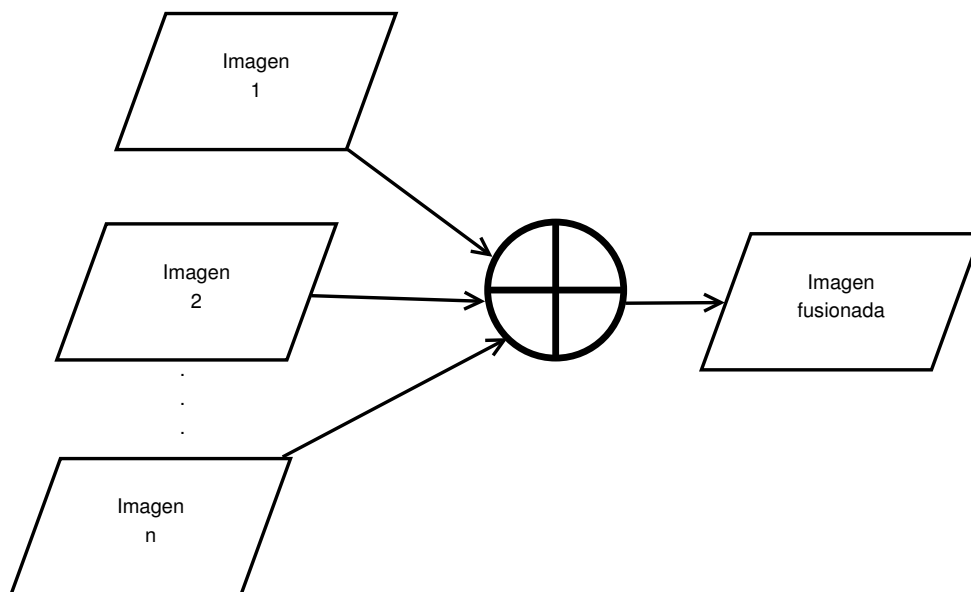


Figura 3.8: Diagrama de fusión simple

### 3.3.2. Algoritmo de fusión de exposición (EF)

Este algoritmo utiliza el método de fusión de exposición presentado en el marco teórico (sección 2.3.2.), donde se obtiene una imagen fusionada a partir de diferentes imágenes de entrada con distintos niveles de intensidad y pesos para cada píxel.

Como las imágenes de geles utilizadas son adquiridas en la escala de grises se elimina el parámetro de saturación, puesto que éste solo afecta la calidad de la imagen si se utilizan imágenes a color. En la Figura 3.9 se muestra el diagrama de este algoritmo.

## 3.4. Sistema de adquisición y pre-procesamiento de mejoramiento de calidad de imágenes

El sistema final que se implementa para mejorar la calidad de las imágenes digitales de geles de electroforesis se muestra en la Figura 3.10.

Como se observa en la Figura 3.10 este sistema se puede dividir en las siguientes etapas:

### 3.4.1. Etapa de captura de imágenes

En esta etapa se utiliza el sistema de adquisición optimizado de la cámara digital diseñado (sección 3.2) para capturar tres imágenes del gel de electroforesis en estudio a diferentes

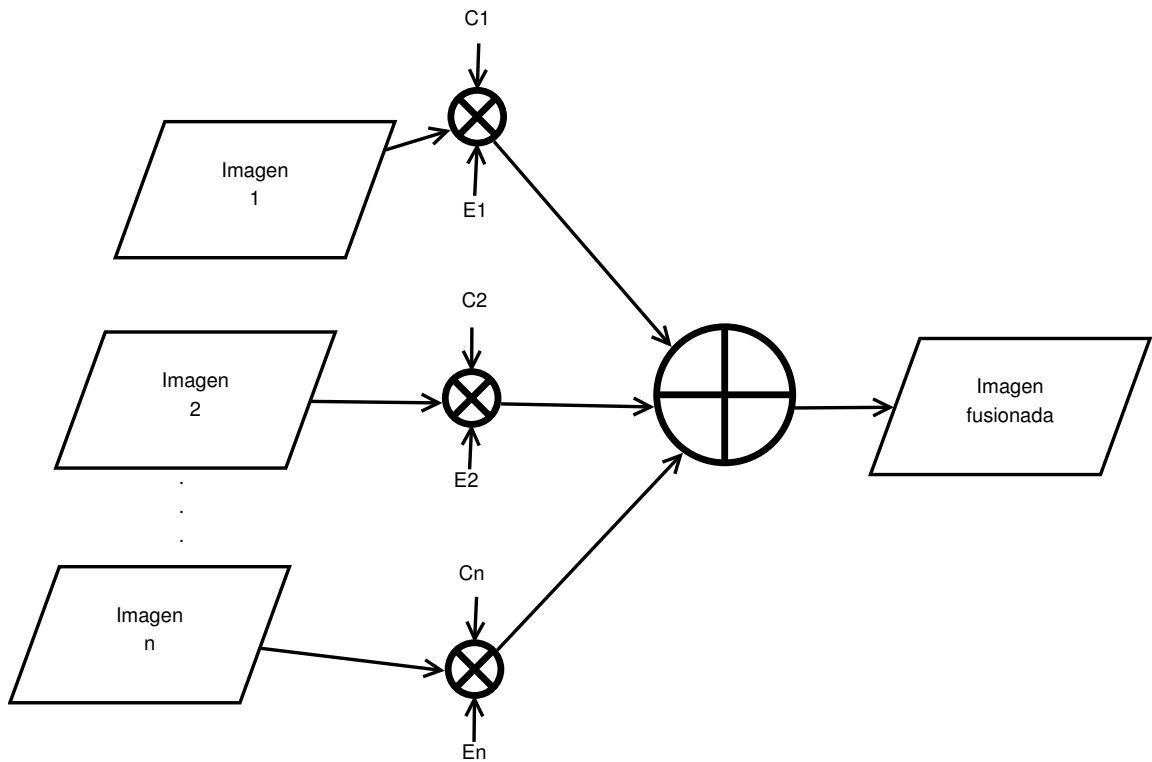


Figura 3.9: Diagrama de fusión de exposición

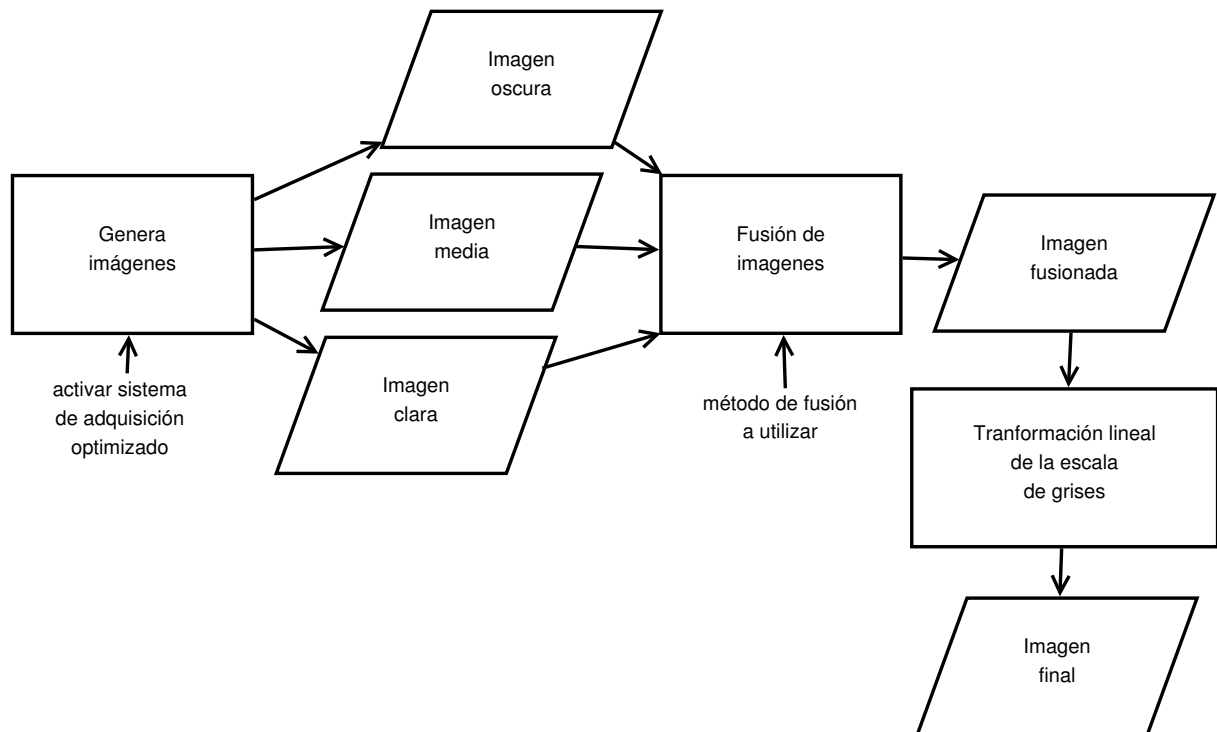


Figura 3.10: Diagrama de bloques del sistema de adquisición y pre-procesamiento de mejoramiento de calidad de imágenes

niveles de intensidad; baja intensidad luminosa (imagen oscura  $I_o$ ), media intensidad luminosa (imagen media  $I_m$ ) y alta intensidad luminosa (imagen clara  $I_c$ ), donde cada imagen

generada tiene características que la diferencian de las otras.

### 3.4.2. Etapa de fusión

En esta etapa se realiza el proceso de fusión de las imágenes generadas para obtener una imagen fusionada  $I_f$  con mejor calidad y mayor nivel de detalles. En el proceso de fusión se puede seleccionar cualquiera de los dos métodos implementados en este trabajo (sección 3.3).

### 3.4.3. Etapa de linealización

En esta etapa se pretende aumentar más los índices de calidad de la imagen fusionada mediante la transformación lineal de la escala de grises de ésta al intervalo  $[0, 255]$ , para obtener la imagen final  $I_{out}$  del sistema con la mejor calidad posible.

A continuación se explica el método de linealización utilizado:

#### Transformación lineal de la escala de grises

Este método de transformación convierte cada píxel de la imagen de entrada al intervalo  $[p_{out_{min}}, p_{out_{max}}]$  deseado y consiste en aplicar la función lineal

$$\begin{aligned} f(p_{out}) &= mp_{in} + b \\ m &= \frac{p_{out_{max}} - p_{out_{min}}}{p_{in_{max}} - p_{in_{min}}} \\ b &= p_{out_{max}} - mp_{in_{max}} \end{aligned} \quad (3.4)$$

a cada uno de los píxeles de la imagen de entrada, donde  $p_{in_{max}}$  y  $p_{in_{min}}$  se obtienen de la imagen de entrada [9].

Para este trabajo se utiliza el intervalo máximo de linealización y (3.4) queda

$$\begin{aligned} f(p_{out}) &= mp_f + b \\ m &= \frac{255}{p_{f_{max}} - p_{f_{min}}} \\ b &= 255 - mp_{f_{max}} \end{aligned} \quad (3.5)$$

donde  $p_{f_{max}}$  y  $p_{f_{min}}$  se obtienen de la imagen fusionada.

# Capítulo 4

## Resultados y Análisis

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en el proyecto, iniciando con el análisis de los algoritmos de medición implementados, puesto que estos son la base para la comprobación del sistema de mejoramiento de calidad de imágenes digitales de geles de electroforesis.

Después, se analiza el optimizador del sistema de adquisición mediante la captura de imágenes con intensidades bajas, medias y oscuras, así como el tiempo de duración del sistema en adquirir estas imágenes digitales con el mejor contraste y NRE posibles, con base en las medidas de aptitud diseñadas.

Por otra parte, se comprueba la implementación de los algoritmos de fusión de imágenes, mediante el análisis de resultados de fusión obtenidos con los diferentes métodos utilizados, además se comparan tiempos de procesamiento entre éstos, así como los resultados obtenidos en cuanto a la calidad de las imágenes fusionadas de geles de electroforesis.

Por último, se demuestra la implementación del sistema de mejoramiento de contraste y razón señal a ruido de imágenes digitales de geles de electroforesis por medio de fusión y ajuste multiparamétrico de la captura, el cual corresponde al objetivo general del proyecto. Se analiza este sistema utilizando medidas de contraste y NRE en las imágenes finales generadas.

Todos los resultados obtenidos corresponden del análisis del gel de electroforesis mostrado en la Figura 4.1. Además todas las imágenes digitales presentan tamaño de  $480 \times 640$  y se obtuvieron con una cámara digital Basler A631FC con chip CCD de  $1/2''$  y objetivo Tamron 12VM412ASIR con distancia focal de 4 mm a 12 mm y apertura  $f/1,2$  hasta 0 conectada a una computadora con un procesador Intel de doble núcleo y con 3 GB de memoria RAM mediante el bus IEEE1394 usando el protocolo IIDC 1.31.

### 4.1. Medidas de aptitud

En esta sección se muestran resultados de los algoritmos de medición de intensidad, contraste y ruido propuestos (sección 3.1), tanto globales como locales, mediante el cálculo de estas medidas de aptitud en imágenes capturadas del gel de electroforesis.

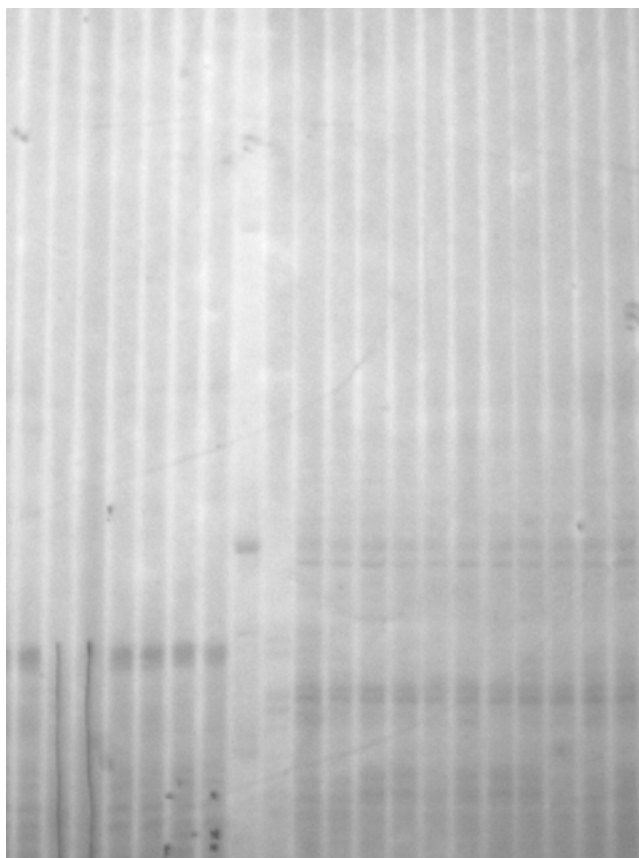


Figura 4.1: Imagen del gel de electroforesis empleado para la evaluación del proyecto

#### 4.1.1. Medidas globales

Para analizar el funcionamiento de las medidas de aptitud globales se adquieren las imágenes de la Figura 4.2 con los parámetros de brillo  $B$ , ganancia  $G$  y obturación  $O$  de la cámara digital mostrados en la Tabla 4.1.

**Tabla 4.1:** Parámetros de adquisición de la cámara para las imágenes de la Figura 4.2

Parámetro	Imagen (a)	Imagen (b)	Imagen (c)	Imagen (d)	Imagen (e)	Imagen (f)
$B$	0	0	0	255	0	0
$G$	600	350	350	600	1023	1023
$O$	300	3325	2500	500	100	70

Diferentes parámetros de captura generan diferentes niveles de intensidad, contraste y ruido por lo que se realizan los cálculos de las medidas de aptitud globales mediante los algoritmos de medición global de cada una de estas características para compararlas con la percepción visual tomando en cuenta sus valores límites mostrados en la Tabla 4.2. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 4.3.

De la Tabla 4.3 se observa que los algoritmos de medición de intensidad global cumplen su función, ya que los valores  $\mu_L$  y  $Me_L$  son afines a la percepción visual en las imágenes. Por



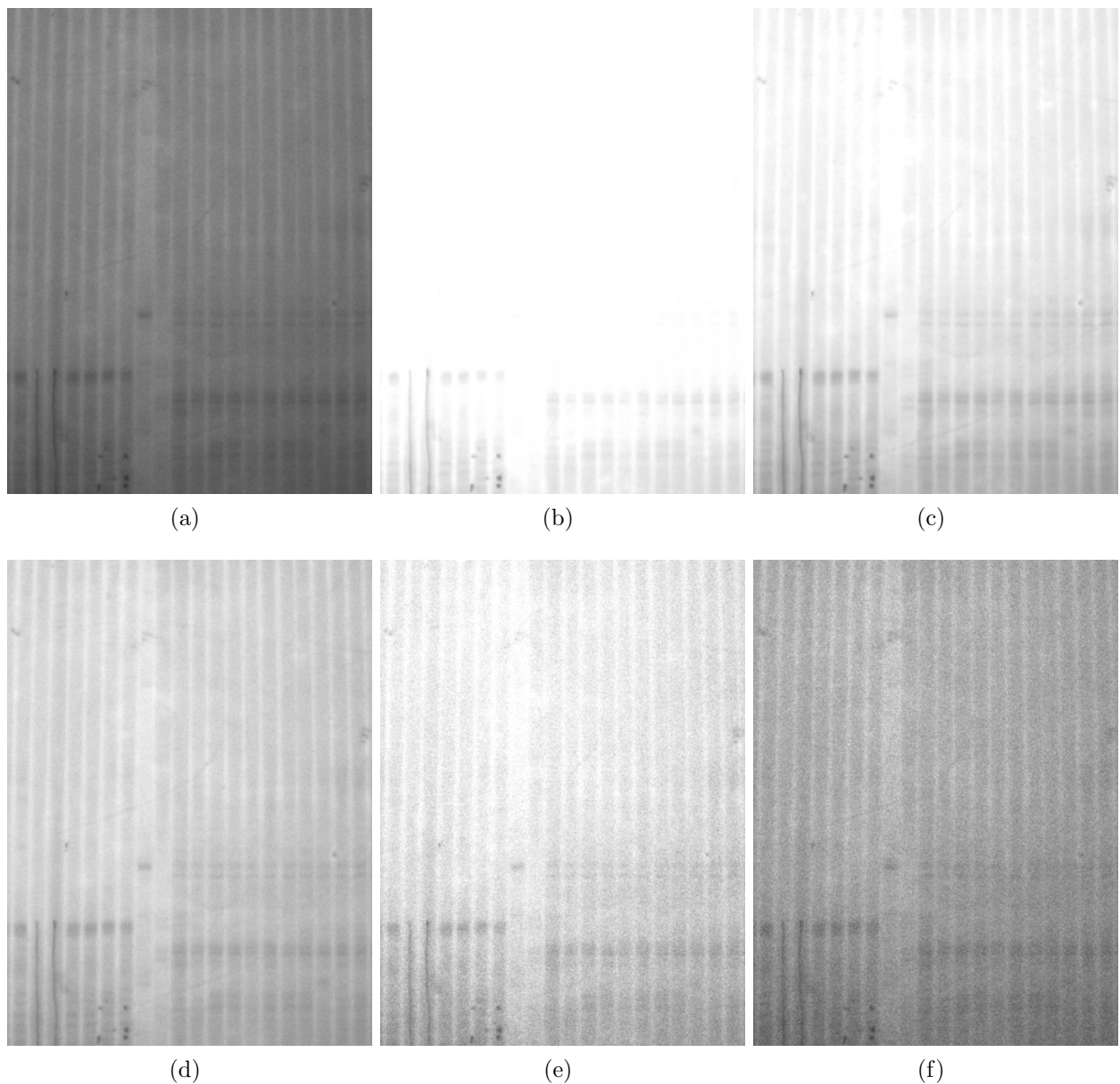


Figura 4.2: Imágenes adquiridas para la comprobación de las medidas de aptitud globales

otra parte, se observa que los algoritmos de medición de contraste global generan diferentes valores, debido a que cada uno de los métodos utilizados difieren en la manera de definir qué es contraste en una imagen. En imágenes con niveles de intensidad extremos, o sea muy oscuras (Figura 4.2a) o muy claras (Figura 4.2b), estos algoritmos concuerdan en que se presenta bajo nivel de contraste. Por último, se demuestra que el algoritmo de medición de ruido diseñado e implementado es confiable, debido a que se ajusta a la realidad visual. Donde las imágenes digitales con mayor NRE son la Imagen (e) y la Imagen (f).

**Tabla 4.2:** Intervalos de las medidas de aptitud globales

Parámetro	Menor valor	Mayor valor
$\mu_L$	0	255
$Me_L$	0	255
$C_{AG}$	0	1
$C_{MG}$	$\sim 0$	1
$C_{W_Gmin}$	-1	$\sim 0$
$C_{W_Gmax}$	$\sim 0$	$\sim 0,5$
$C_{LG}$	$\sim 0$	$\sim 1$
$C_{RMSG}$	$\sim 0$	$\sim 30$
NRE	0	$\sim 50$

**Tabla 4.3:** Medidas de aptitud globales para las imágenes de la Figura 4.2

Parámetro	Imagen (a)	Imagen (b)	Imagen (c)	Imagen (d)	Imagen (e)	Imagen (f)
$\mu_L$	120,375	251,943	228,856	202,188	219,853	160,018
$Me_L$	123	255	237	207	227	164
$C_{AG}$	0,423	0,451	0,592	0,580	0,643	0,647
$C_{MG}$	0,5	0,291	0,421	0,418	0,473	0,551
$C_{W_Gmin}$	-0,551	-0,444	-0,545	-0,490	-0,586	-0,581
$C_{W_Gmax}$	0,345	0,012	0,114	0,241	0,159	0,449
$C_{LG}$	0,897	0,456	0,659	0,731	0,745	1,031
$C_{RMSG}$	15,62	9,684	26,654	21,553	28,112	23,139
NRE	10,082	1,777	11,7468	9,603	20,182	21,647

### 4.1.2. Medidas locales

Para la demostración del funcionamiento de los algoritmos de medición local se generan histogramas de imágenes del gel de electroforesis obtenidas a diferentes niveles de obturación de la cámara digital, ya que de la teoría (sección 2.2.3) se sabe que el nivel de intensidad es proporcional a la obturación  $O$ . Los histogramas de intensidad de las imágenes capturadas se muestran en la Figura 4.3 y los histogramas de contraste en la Figura 4.4, donde se ajustan sus rangos de valores, mostrados en la Tabla 4.4, en 256 celdas.

En la Figura 4.3 se observa que el histograma generado con la imagen que se obtuvo con un nivel de obturación medio-alto es el que presenta el mayor rango dinámico, puesto que presenta el intervalo más ancho en la escala de grises de 130 a 250 aproximadamente.

En la Figura 4.4 se observa que en la imagen capturada con un nivel de obturación medio-alto, los histogramas de contrastes  $C_{A_{io}}$  y  $C_{RMS_{io}}$  presentan el mayor rango dinámico, puesto que cubren alrededor de un 25 % de su rango total de valores, ubicados en la mitad inferior de dicho rango, con valores más cercanos a su límite máximo. Mientras que en la imagen capturada con un nivel de obturación bajo-medio, los contrastes  $C_{W_{io}}$ ,  $C_{M_{io}}$  y  $C_{L_{io}}$  tienen

**Tabla 4.4:** Intervalos de las medidas de aptitud locales

Parámetro	Menor valor	Mayor valor
Intensidad	0	255
$C_{A_{lo}}$	0	255
$C_{M_{lo}}$	0	255
$C_{W_{lo\min}}$	0	255
$C_{W_{lo\max}}$	0	10
$C_{L_{lo}}$	0	10
$C_{RMS_{lo}}$	0	255

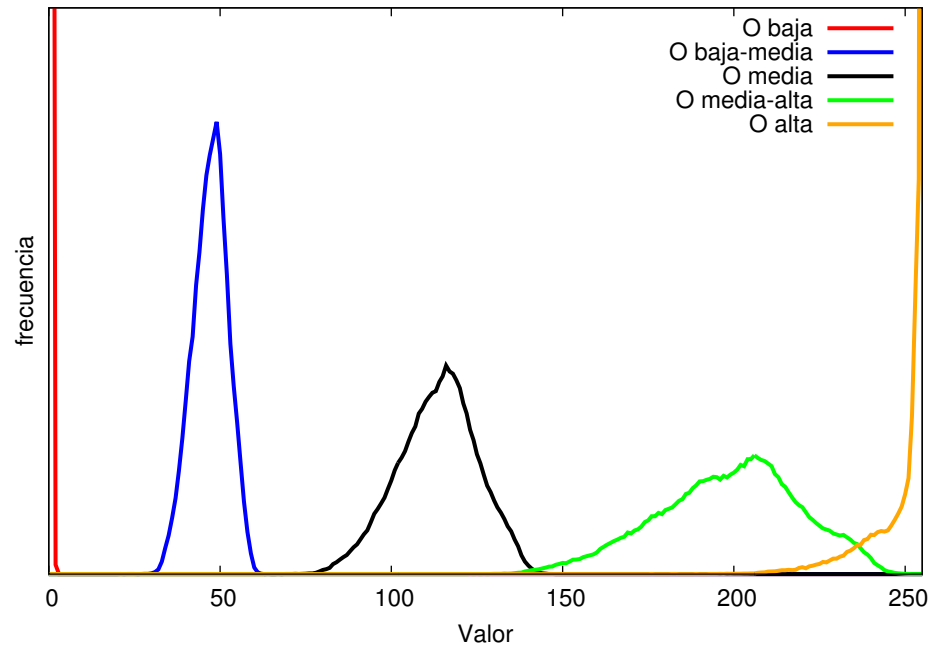


Figura 4.3: Histogramas de intensidad local  $L(i, j)$  de las imágenes adquiridas a diferentes niveles de obturación

histogramas que cubren alrededor de un 30 % de su rango total de valores, ubicados en la mitad inferior de dicho rango, con valores más cercanos a su límite máximo. Además, se verifica el funcionamiento de estas medidas de aptitud, debido a que las imágenes con valores extremos de intensidad (muy “claras”, capturadas a niveles de obturación bajos o muy “oscuras”, capturadas a niveles de obturación altos) presentan histogramas de contrastes ubicados en la mitad inferior de su rango, con valores más cercanos a su límite mínimo, lo que es consistente con el hecho de que esas imágenes están o saturadas en blanco o subexpuestas en negro.

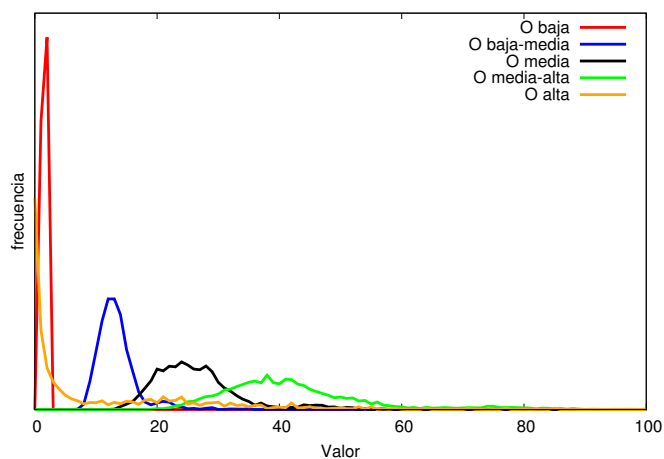
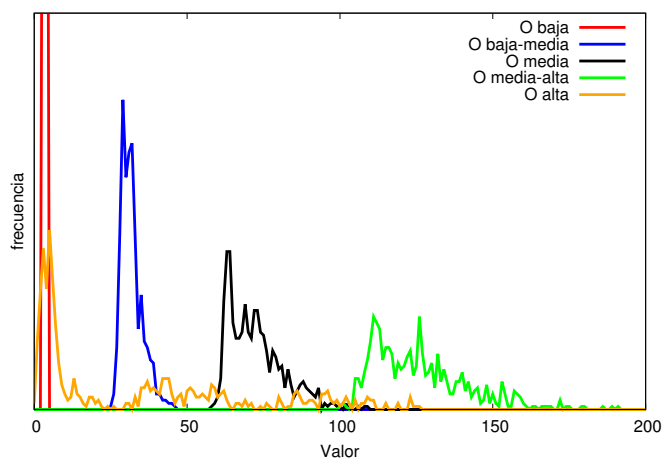
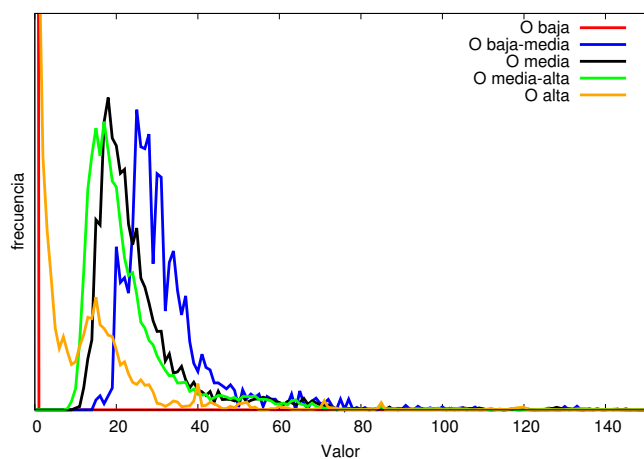
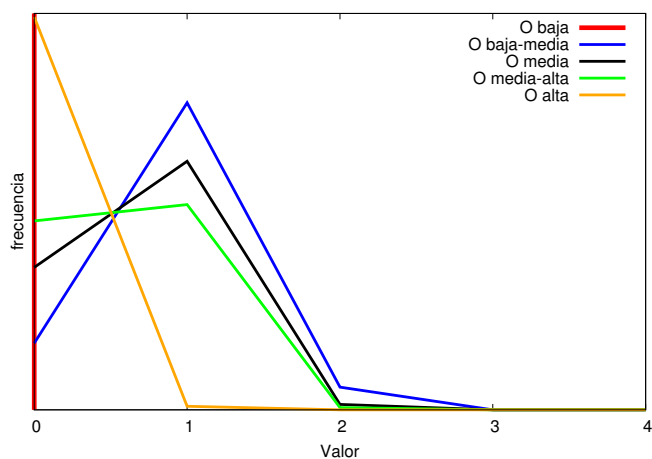
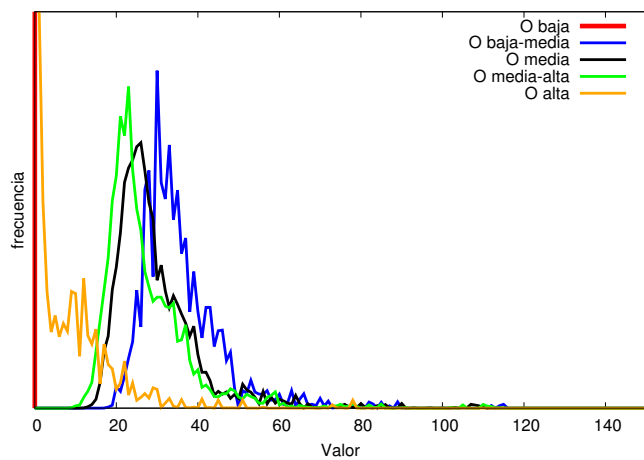
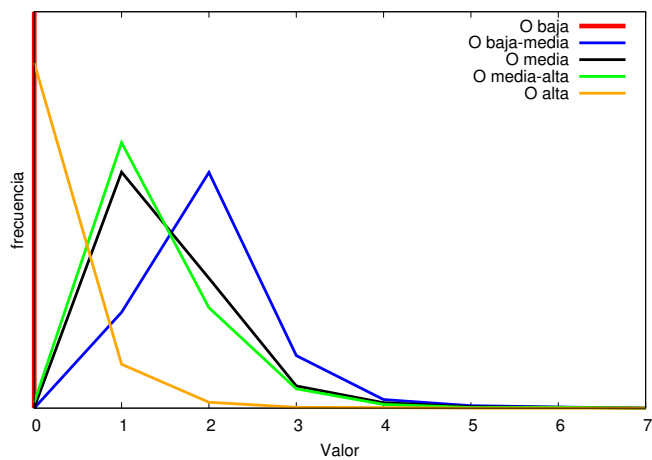
(a) Contraste absoluto  $C_{A_{Io}}$ (b) Contraste RMS  $C_{RMS_{Io}}$ (c) Contraste de Weber mínimo  $C_{W_{Iomin}}$ (d) Contraste de Weber máximo  $C_{W_{Iomax}}$ (e) Contraste de Michelson  $C_{M_{Io}}$ (f) Contraste de intensidad  $C_{L_{Io}}$ 

Figura 4.4: Histogramas de contraste local (ajustados) de las imágenes adquiridas a diferentes niveles de obturación

## 4.2. Evaluación del sistema de adquisición optimizado

En esta sección se analizan las pruebas realizadas con el sistema de adquisición para comprobar el funcionamiento del sistema optimizador (SO) implementado mediante el ajuste multiparamétrico de la captura.

Para evaluar el funcionamiento del optimizador se realizan dos pruebas. La primera es comparar las imágenes obtenidas con el sistema adquisición optimizado contra imágenes capturadas por el sistema de adquisición sin el optimizador. La segunda se evalúa el tiempo que tarda el optimizador del sistema de adquisición en adquirir las imágenes indicadas.

### 4.2.1. Comparación de imágenes con y sin optimización del proceso de captura

Para esta prueba se adquieren imágenes con los tres niveles de intensidad de adquisición para los que fue diseñado el sistema de optimización (sección 3.2) en condiciones similares de iluminación.

- Baja intensidad luminosa (imágenes oscuras  $I_o$ )
- Media intensidad luminosa (imágenes medias  $I_m$ )
- Alta intensidad luminosa (imágenes claras  $I_c$ )

En el diseño del sistema de optimización, se define el intervalo de  $I_o$  como  $[80, 120]$ ,  $I_m$  como  $[130, 170]$  e  $I_c$  como  $[180, 220]$ . Para la comprobación del sistema se adquieren tres imágenes mediante el optimizador y 3 sin él en cada rango.

Las imágenes capturas por el sistema de adquisición optimizado para el rango de  $I_o$  se muestran en la Figura 4.5 y las obtenidas por el sistema de adquisición sin el optimizador en este mismo rango se muestran en la Figura 4.6. Además las medidas de aptitud globales de cada imagen adquirida se muestran en la Tabla 4.5.

Las imágenes oscuras en la Figura 4.5 muestran mayor nitidez en los bordes de *carriles* y *bandas* que aquellas en la Figura 4.6. Por otra parte en la Tabla 4.5 se observa que el sistema de adquisición con SO en el modo de captura de imágenes oscuras obtiene las imágenes digitales con niveles de intensidad global ( $\mu_L$  y  $Me_L$ ) dentro del intervalo  $[80, 120]$ .

Otro objetivo planteado en el diseño del sistema de optimización ha sido la adquisición de imágenes maximizando el valor de contraste y minimizando el nivel de ruido estimado. En la captura de imágenes de bajo nivel de intensidad se logra este objetivo, lo que se evidencia en la Tabla 4.5, donde se observa que todas las imágenes capturadas por el sistema de adquisición presenta contrastes absolutos globales alrededor de 0,37, mientras que el sistema optimizador captura imágenes con solo un 41 % del ruido presente en las imágenes adquiridas de modo manual.

Para el rango de imágenes a niveles medios de intensidad  $I_m$ , las imágenes obtenidas con el sistema de adquisición optimizado se muestran en la Figura 4.7 y las obtenidas por el sistema de adquisición sin el optimizador en este mismo rango se muestran en la Figura 4.8. Además

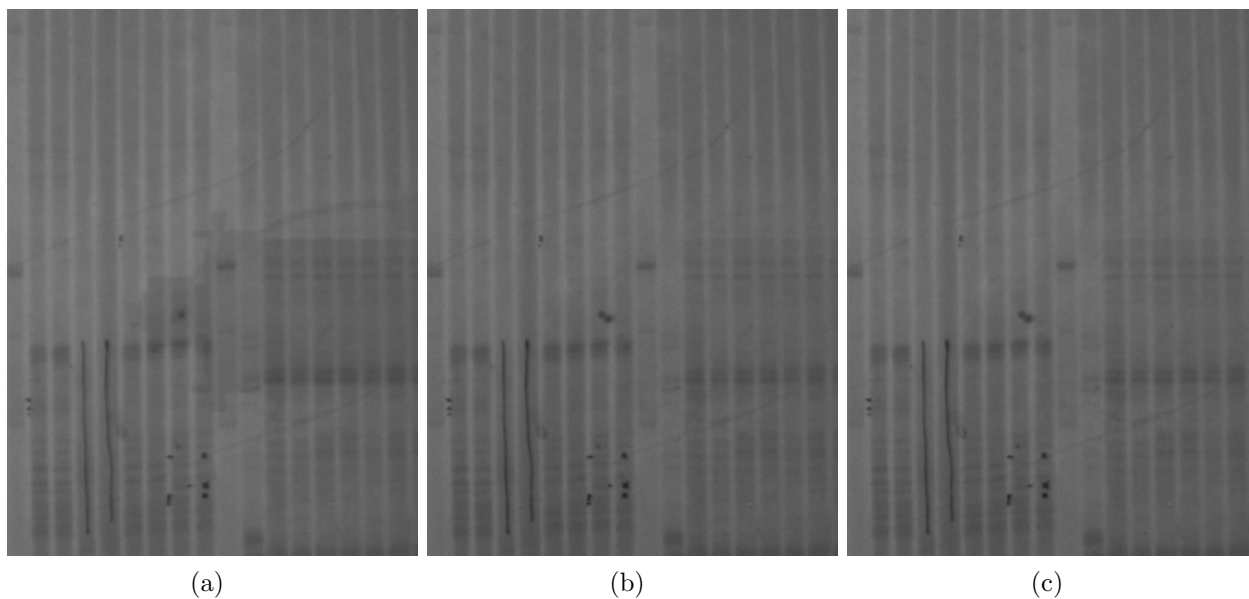


Figura 4.5: Imágenes oscuras adquiridas por el sistema de adquisición optimizado

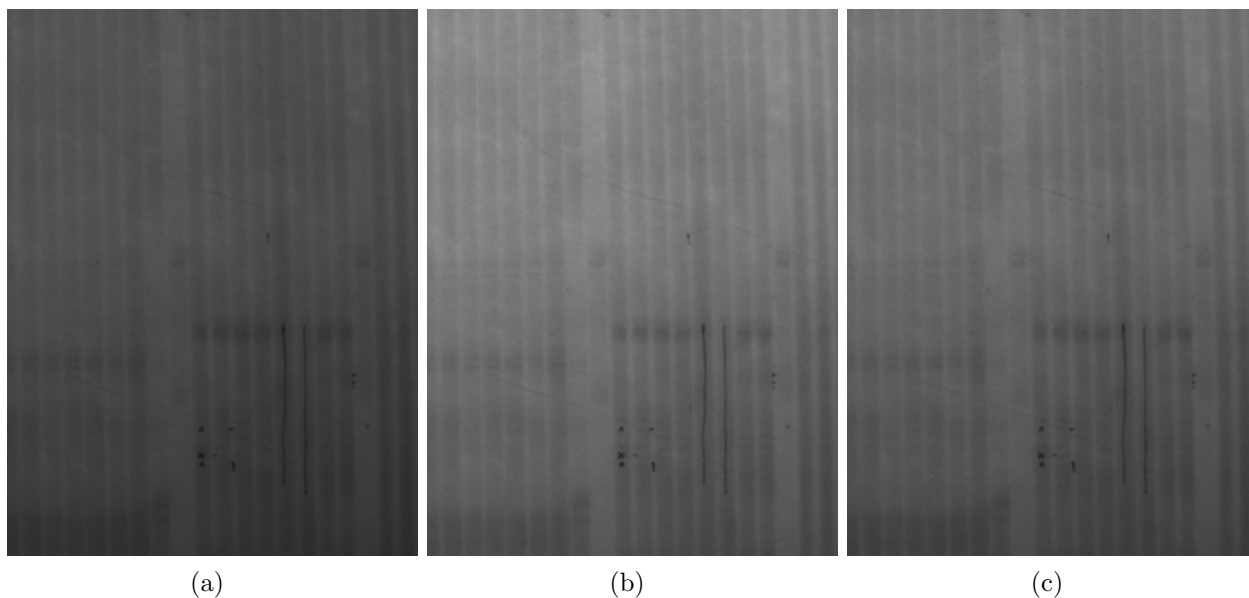


Figura 4.6: Imágenes oscuras adquiridas por el sistema de adquisición sin el optimizador

las medidas de aptitud globales de cada imagen adquirida se muestran en la Tabla 4.6.

Las imágenes medias en la Figura 4.7 muestran mayor nitidez en los bordes de *carriles* y *bandas* que aquellas en la Figura 4.8. Por otra parte en la Tabla 4.6 se observa que el sistema de adquisición con SO en el modo de captura de imágenes medias obtiene las imágenes digitales con niveles de intensidad global ( $\mu_L$  y  $Me_L$ ) dentro del intervalo [130, 170]. Además se observa que en la captura de imágenes medias, éstas presentan contrastes absolutos globales alrededor de 0,55, mientras que el sistema optimizador captura imágenes con solo un 38% del ruido presente en las imágenes adquiridas de modo manual.

**Tabla 4.5:** Imágenes oscuras obtenidas por el sistema de adquisición

Parámetro	Imágenes de la Figura 4.5 adquiridas con el SO			Imágenes de la Figura 4.6 adquiridas sin el SO		
	(a)	(b)	(c)	(a)	(b)	(c)
	$\mu_L$	105,275	100,404	101,175	94,121	111,606
$Me_L$	106	101	102	97	116	99
$C_{AG}$	0,345	0,361	0,372	0,341	0,408	0,384
$C_{MG}$	0,494	0,567	0,590	0,561	0,596	0,597
$C_{W_Gmin}$	-0,572	-0,651	-0,673	-0,637	-0,654	-0,65
$C_{W_Gmax}$	0,263	0,264	0,265	0,286	0,394	0,377
$C_{LG}$	0,835	0,916	0,938	0,924	1,048	1,028
$C_{RMSG}$	10,591	9,925	10,02	12,73	15,354	14,711
NRE	3,81	3,804	4,358	7,925	13,865	7,155

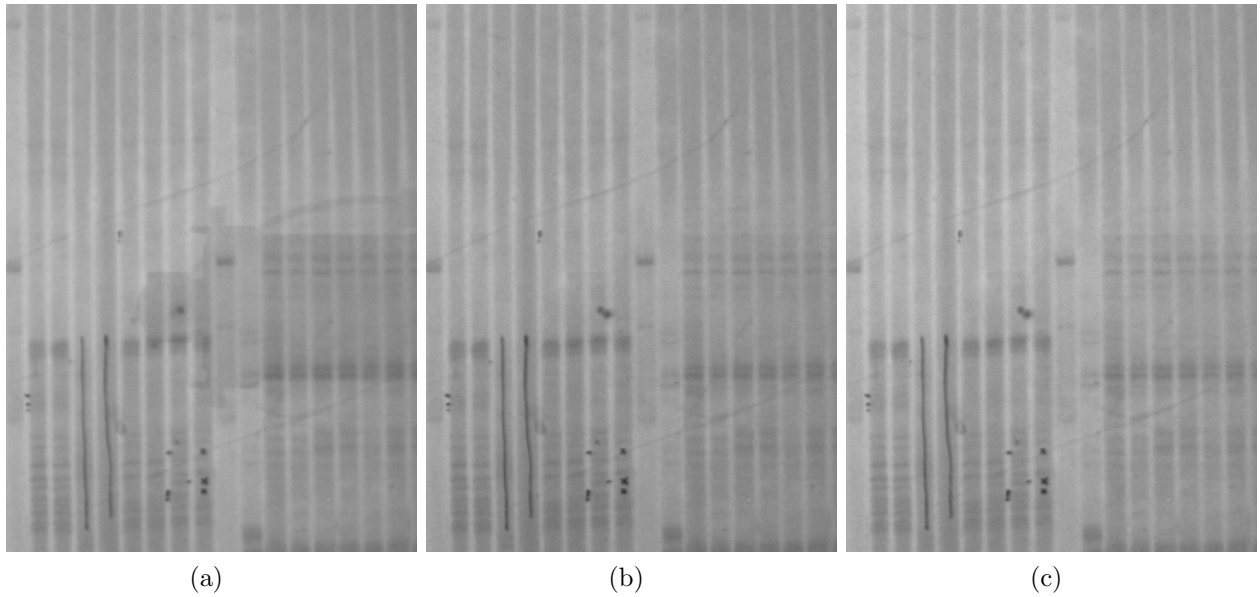


Figura 4.7: Imágenes medias adquiridas por el sistema de adquisición optimizado

Para el último rango de adquisición del sistema de optimización, las imágenes  $I_c$  obtenidas se muestran en la Figura 4.9 y las obtenidas por el sistema de adquisición sin el optimizador en este mismo rango se muestran en la Figura 4.10. Además las medidas de aptitud globales de cada imagen adquirida se muestran en la Tabla 4.7.

Las imágenes claras en la Figura 4.9 muestran mayor nitidez en los bordes de *carriles* y *bandas* que aquellas en la Figura 4.10. Por otra parte en la Tabla 4.7 se observa que el sistema de adquisición con SO en el modo de captura de imágenes claras obtiene las imágenes digitales con niveles de intensidad global ( $\mu_L$  y  $Me_L$ ) dentro del intervalo [180, 220]. Además se observa que en la captura de imágenes claras, éstas presentan contrastes absolutos globales alrededor de 0,65, mientras que el sistema optimizador captura imágenes con solo un 43%

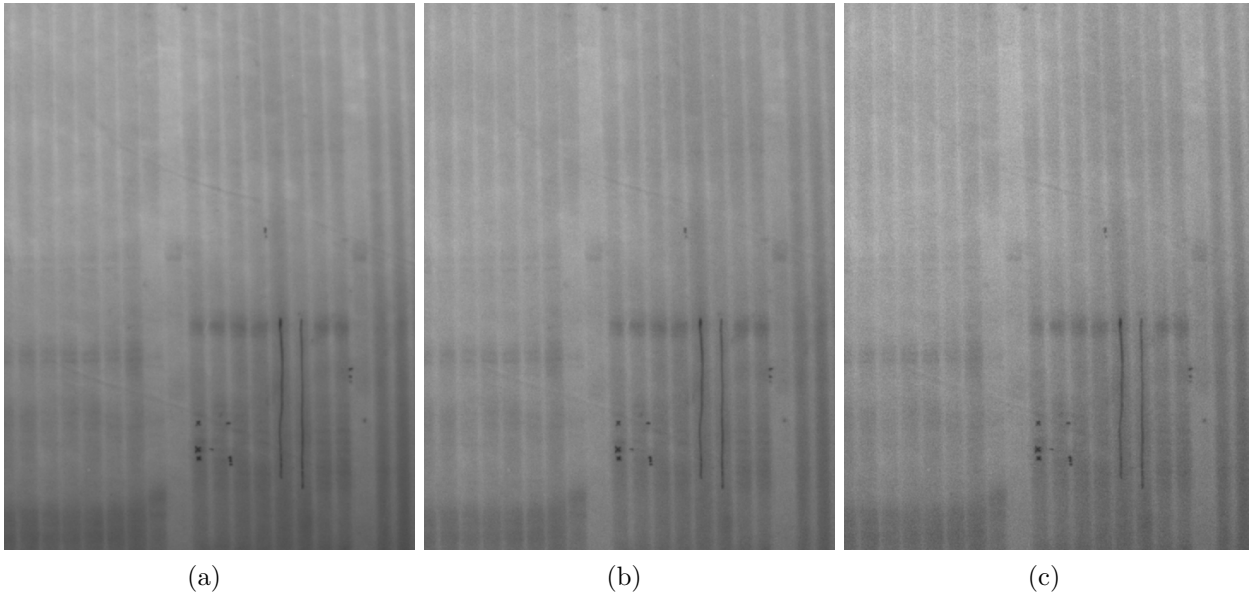


Figura 4.8: Imágenes medias adquiridas por el sistema de adquisición sin el optimizador

**Tabla 4.6:** Imágenes medias obtenidas por el sistema de adquisición

Parámetro	Imágenes de la Figura 4.7 adquiridas con el SO			Imágenes de la Figura 4.8 adquiridas sin el SO		
	(a)	(b)	(c)	(a)	(b)	(c)
$\mu_L$	157,857	152,897	162,526	132,821	137,141	140,998
$Me_L$	158	154	163	138	140	145
$C_{AG}$	0,502	0,561	0,596	0,537	0,513	0,565
$C_{MG}$	0,481	0,584	0,585	0,598	0,572	0,6
$C_{W_Gmin}$	-0,563	-0,667	-0,668	-0,662	-0,641	-0,652
$C_{W_Gmax}$	0,248	0,269	0,267	0,368	0,313	0,368
$C_{LG}$	0,811	0,935	0,935	0,985	0,955	0,986
$C_{RMS_G}$	14,8529	14,437	15,745	16,356	17,23	17,987
NRE	6,051	6,953	8,165	9,256	15,332	31,267

del ruido presente en las imágenes adquiridas de modo manual.

En general mediante los resultados obtenidos se observa que con el optimizador las imágenes capturadas presentan menor nivel de ruido estimado (alrededor de 60% menos) que las imágenes obtenidas sin el sistema de optimización, además valores de contraste similares para cada intervalo de optimización, como se observa en en las Tablas 4.5, 4.6 y 4.7 y se complementa con la percepción visual de las mismas donde se logra identificar mayor nitidez en las imágenes adquiridas por el sistema de optimización.

Se observa que las imágenes claras presentan mayor valor de contraste que las imágenes medias y oscuras con el orden de relación  $C_{I_c} > C_{I_m} > C_{I_o}$ , sin embargo, el NRE también es mayor en las imágenes claras con el orden de relación  $NRE_{I_c} > NRE_{I_m} > NRE_{I_o}$ . Estos



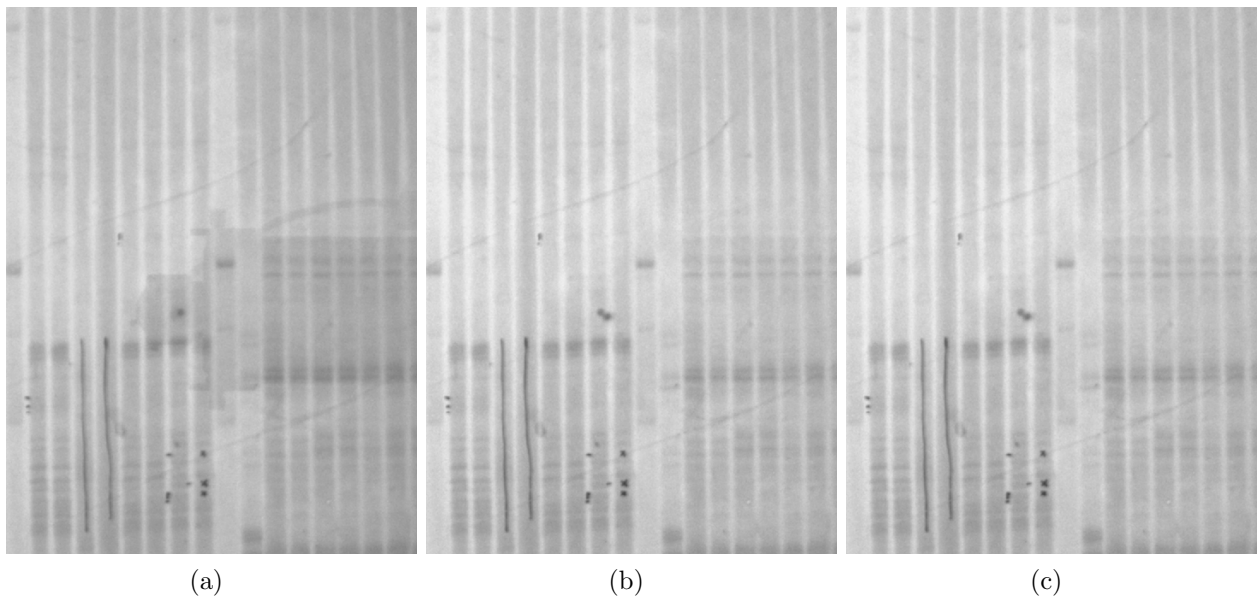


Figura 4.9: Imágenes claras adquiridas por el sistema de adquisición optimizado

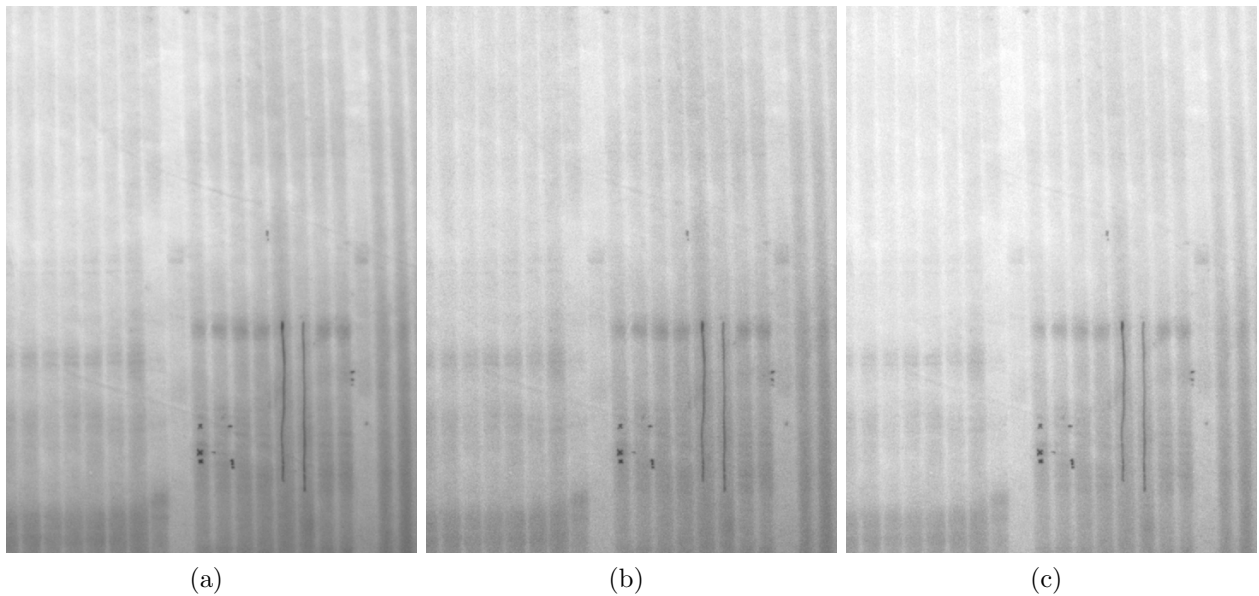


Figura 4.10: Imágenes claras adquiridas por el sistema de adquisición sin el optimizador

resultados se pueden observar en las Tablas 4.5, 4.6 y 4.7. Por lo que el contraste y el ruido en imágenes digitales son proporcionales a la intensidad.

#### 4.2.2. Duración del sistema en obtener las imágenes optimizadas

Otro aspecto a evaluar en el diseño del sistema de optimización es el tiempo total que tarda para obtener el conjunto de imágenes. Para esto se realizan 30 pruebas de captura para un mismo gel de electroforesis por cada uno de los tres niveles de intensidad ( $I_o$ ,  $I_m$  y  $I_c$ )

**Tabla 4.7:** Imágenes claras obtenidas por el sistema de adquisición

Parámetro	Imágenes de la Figura 4.9 adquiridas con el SO			Imágenes de la Figura 4.10 adquiridas sin el SO		
	(a)	(b)	(c)	(a)	(b)	(c)
$\mu_L$	185,102	199,566	186,687	189,093	191,672	210,097
$Me_L$	186	201	188	196	198	217
$C_{AG}$	0,596	0,678	0,658	0,706	0,713	0,705
$C_{MG}$	0,494	0,553	0,56	0,61	0,632	0,625
$C_{W_Gmin}$	-0,579	-0,649	-0,650	-0,490	-0,646	-0,642
$C_{W_Gmax}$	0,242	0,218	0,256	0,3011	0,303	0,214
$C_{LG}$	0,821	0,867	0,899	0,952	0,949	0,857
$C_{RMS_G}$	18,401	20,21	18,461	22,12	23,148	23,45
NRE	9,168	10,32	8,745	15,23	31,151	19,136

para los que se diseñó el optimizador, con el objetivo de tener una estimación promedio de la duración de éste en obtener las imágenes. Se miden los tiempos y se presentan en la Tabla 4.8.

**Tabla 4.8:** Tiempos de duración del sistema  $t$  en obtener las imágenes optimizadas

Modo de captura	$t$ (s)	$\sigma_t$ (s)
$I_c$	1,19	0,05
$I_m$	0,96	0,08
$I_o$	0,84	0,07
Todas	2,9	0,1

De la Tabla 4.8 se observa que el sistema de optimización implementado tarda menos de tres segundos si se desean obtener las tres imágenes (oscura, media y clara) con el mayor valor de contraste y menor NRE posible, donde la duración es directamente proporcional al nivel de intensidad de las imágenes requeridas, para una alta intensidad se da el mayor tiempo de adquisición y para un bajo nivel de intensidad se da el menor tiempo de adquisición. Ésto ocurre porque como se observó en el análisis del sistema, las imágenes en el nivel de intensidad  $I_c$  presentan más NRE que las del nivel de intensidad  $I_o$  y el optimizador tarda más en obtener imágenes con mayor ruido ya que el cálculo del NRE en las diez imágenes que compara el sistema es mayor.

### 4.3. Fusión de imágenes de geles de electroforesis

En esta sección se comparan los métodos de fusión de tres imágenes digitales del mismo gel de electroforesis capturadas con diferentes niveles de intensidad. Por otra parte se evalúa el tiempo que tardan los diferentes algoritmos implementados en realizar la fusión de imágenes.

Los métodos utilizados son la fusión simple (SF) y la fusión de exposición (EF) para la cuál se necesita asignar el valor de los parámetros de cálculo de intensidad del píxel fusionado resultante. En la Tabla 4.9 se observa que los valores  $w_C$  y  $w_E$  son iguales a uno para todas las imágenes de entrada. Ésto se debe a que en las pruebas realizadas se le da la misma importancia a las tres imágenes a fusionar, además de que en la fusión aplicada, se da el mismo nivel de influencia tanto del contraste local en las imágenes a fusionar  $C$ , como al valor de intensidad de cada píxel con respecto a una intensidad central  $E$ , con el fin de abarcar un mayor rango en la escala de grises en la imagen fusionada. Para la imagen oscura se considera  $L_{central}(I_o) = 0,25 \cdot 255 = 63,75$ ; para la imagen media  $L_{central}(I_m) = 0,55 \cdot 255 = 140,25$  y para la imagen clara  $L_{central}(I_c) = 0,9 \cdot 255 = 229,5$ , todas con  $\sigma = 0,2 \cdot 255 = 51$  lo que significa que para cada imagen de entrada se da mayor peso a los píxeles más cercanos de sus respectivas  $L_{central}$ . Además, los píxeles que estén 51 valores arriba o abajo en la escala de grises de  $L_{central}$  tendrán influencia en la imagen final.

**Tabla 4.9:** Valores utilizados de los parámetros para el algoritmo EF en las tres imágenes de entrada

Parámetro	Imagen oscura	Imagen media	Imagen clara
Contraste $C$			
$w_C$	1	1	1
Nivel de exposición $E$			
$w_E$	1	1	1
$L_{central}$	0,25	0,55	0,9
$\sigma$	0,2	0,2	0,2

### 4.3.1. Comparación de los métodos de fusión

Un objetivo primordial de este trabajo es mejorar la calidad de imágenes de geles de electroforesis tanto en contraste y NRE; sin embargo, como se observó en el análisis del sistema de adquisición de imágenes, cada nivel de intensidad seleccionado presenta detalles únicos que hacen necesaria la fusión de imágenes para mezclar las características de cada una de ellas y obtener la imagen con mayor valor de contraste global e histogramas de contraste local con valores más cercanos a su límite máximo, así como menor NRE.

Las imágenes a fusionar, o sea, las generadas por el sistema de adquisición con el optimizador, se muestran en la Figura 4.11. Por otra parte la Figura 4.12 muestra la imagen resultante del algoritmo de fusión simple y la Figura 4.13 muestra las imágenes fusionadas mediante el algoritmo de fusión de exposición utilizando las cinco definiciones de contraste local.

Los resultados globales de las imágenes fusionadas se muestran en la Tabla 4.10 y se obtienen como medidas de aptitud locales los histogramas de intensidad local  $L(i, j)$  y contraste absoluto local  $C_{A_{lo}}$  de las imágenes utilizadas en el proceso, mostrados en la Figura 4.14 .

De las mediciones globales realizadas para las imágenes de este proceso mostradas en la

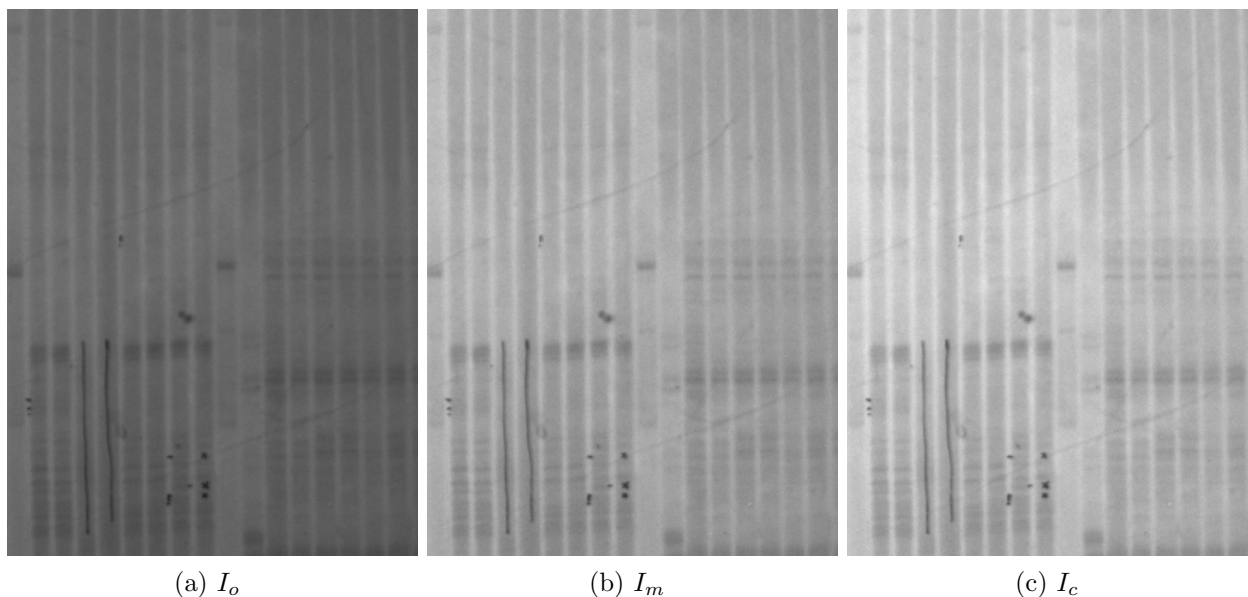


Figura 4.11: Imágenes a fusionar

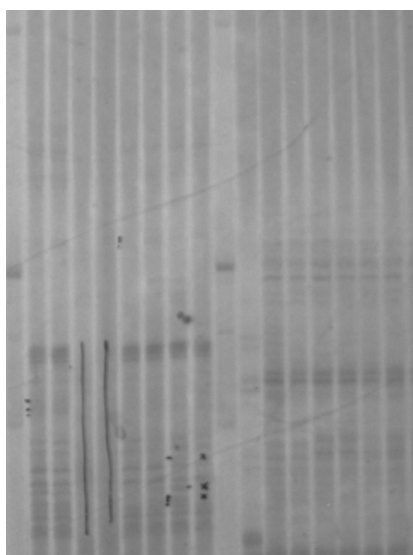


Figura 4.12: Imagen fusionada por el método de fusión simple

Tabla 4.10 se observa que las imágenes fusionadas ubican sus niveles de intensidad hacia la mitad de la escala de grises debido a que las medidas de aptitud de intensidad  $\mu_L$  y  $Me_L$  para las imágenes fusionadas andan alrededor de 150 unidades de intensidad. Además se complementa este análisis con la intensidad local de las mismas, mostradas en la Figura 4.14a, donde se observa que los histogramas de intensidad de las imágenes fusionadas presentan un mayor rango en la escala de grises que las imágenes de entrada (excepto el histograma de intensidad para la imagen fusionada obtenida por fusión simple). Se cumple así el objetivo correspondiente a la mezcla de características de las imágenes de entrada en una imagen fusionada.

En la Figura 4.14b se observa que los histogramas de contraste absoluto local para las imágenes

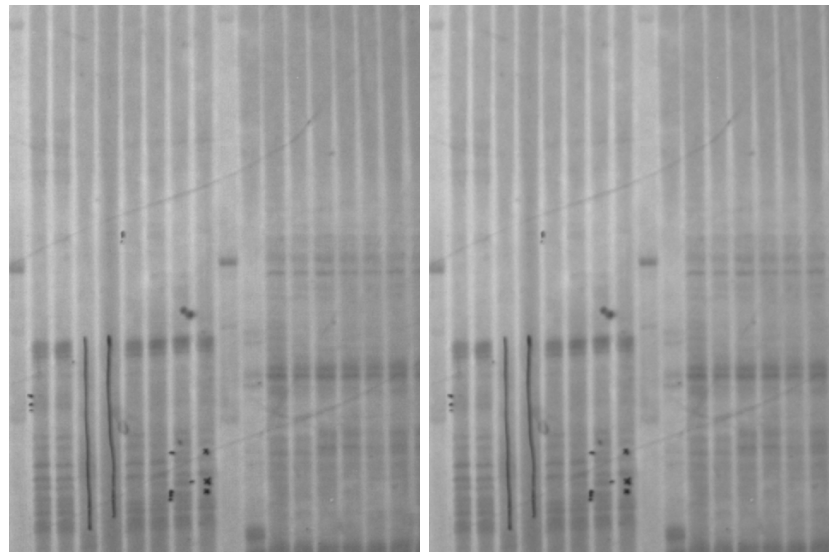
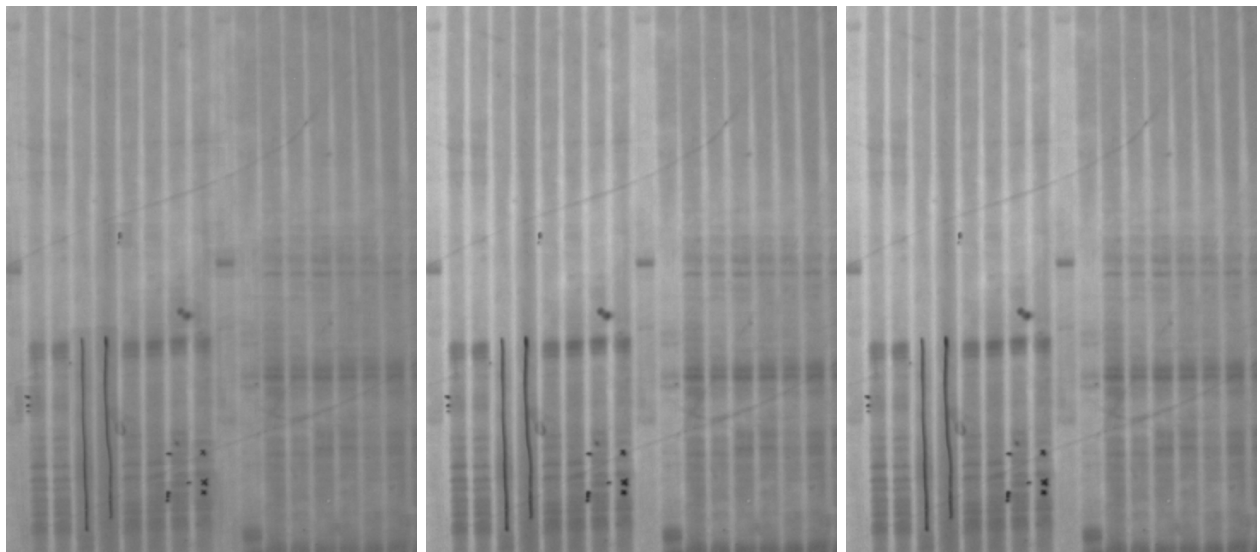
(a)  $C_{A_{10}}$ (b)  $C_{RMS_{10}}$ (c)  $C_{W_{10}}$ (d)  $C_{L_{10}}$ (e)  $C_{M_{10}}$ 

Figura 4.13: Imágenes fusionadas por el método de fusión de exposición

nes obtenidas por el algoritmo de fusión de exposición presentan el mayor rango dinámico, puesto que cubren alrededor de un 32 % de su rango total de valores, ubicados en la mitad inferior de dicho rango, con valores más cercanos a su límite máximo.

Por otra parte en la Tabla 4.10 se muestra que el algoritmo de fusión simple es ineficiente puesto que lo único que hace es ponderar las tres imágenes de entrada sin darse una mejora en calidad, ya que se obtienen medidas de contraste globales relativamente bajas, inclusive menores que las imágenes de entrada. De igual forma ocurre con los histogramas adquiridos para esta imagen, donde se observa que no se da un aumento en el rango dinámico de intensidad, ni en el contraste absoluto local.

Por último se observa que con el algoritmo de fusión de exposición se logra el objetivo donde

**Tabla 4.10:** Resultados globales del proceso de fusión del gel de electroforesis mediante los diferentes algoritmos

Parámetro	Imágenes a fusionar			Imágenes fusionadas					
	Nivel de intensidad			SF	EF				
	Figura 4.11				Figura 4.12	Figura 4.13			
(a)	(b)	(c)	(a)	(b)		(c)	(d)	(e)	
	$I_o$	$I_m$	$I_c$		$C_{A_{I_o}}$	$C_{RMS_{I_o}}$	$C_{W_{I_o}}$	$C_{L_{I_o}}$	$C_{M_{I_o}}$
$\mu_L$	101,1	162,5	186,6	149,8	157,4	157,6	141,7	149,2	149,2
$Me_L$	102	163	188	151	158	159	142	150	150
$C_{AG}$	0,372	0,596	0,655	0,533	0,663	0,657	0,514	0,623	0,623
$C_{MG}$	0,59	0,584	0,56	0,571	0,684	0,662	0,567	0,671	0,671
$C_{W_Gmin}$	-0,673	-0,667	-0,646	-0,659	-0,75	-0,733	-0,647	-0,738	-0,734
$C_{W_Gmax}$	0,265	0,267	0,253	0,247	0,321	0,312	0,276	0,326	0,326
$C_{LG}$	0,938	0,935	0,899	0,907	1,073	1,046	0,924	1,065	1,064
$C_{RMSG}$	10,02	15,74	18,46	13,95	18,99	18,94	13,21	18,03	18,03
NRE	4,358	8,165	8,745	8,375	11,97	10,74	6,618	9,9	9,552

se da una mejora en la nitidez de la imagen del gel de electroforesis. Visualmente se observa la diferencia en calidad de las imágenes fusionadas (imágenes de la la Figura 4.13) y las imágenes de entrada (imágenes de la la Figura 4.11). Cuantitativamente se muestra este efecto mediante las medidas de aptitud mostradas en la Tabla 4.10, donde las fusiones de exposición realizadas con  $C_{A_{I_o}}$  y  $C_{RMS_{I_o}}$  como parámetros de contraste son mayores con respecto a las imágenes de entrada y además amplían el rango dinámico como se muestra en la Figura 4.14a. El único inconveniente que se produce es un aumento ligero en el ruido de la imagen, ya que al fusionarse diferentes imágenes se introducen ligeras variaciones en el valor de los píxeles; sin embargo, la variación es de tan solo 5 % con respecto a la imagen de entrada con nivel de intensidad medio.

### 4.3.2. Duración de los algoritmos implementados

Siguiendo con el análisis planteado, en esta sección se evalúan los tiempos de procesamiento de los diferentes algoritmos de fusión implementados, para esto se realizaron 30 pruebas de cada algoritmo. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 4.11. Se observa que los algoritmos planteados son capaces de fusionar tres imágenes de  $640 \times 480$  píxeles en menos de cuatro segundos. El método de fusión simple tarda menos de un segundo en realizar la fusión, el cual es un resultado esperado puesto que este método opera a nivel de píxel donde solo se realizan operaciones aritméticas simples, en este caso el promedio de intensidad de las tres imágenes de entrada. Por otra parte el algoritmo de fusión de exposición es más lento debido a que éste opera a nivel de características, lo que necesita mayor procesamiento de las imágenes para la toma de decisiones; sin embargo, tardan menos de cuatro segundos. Por último el tiempo de procesamiento de este algoritmo depende del tipo de contraste

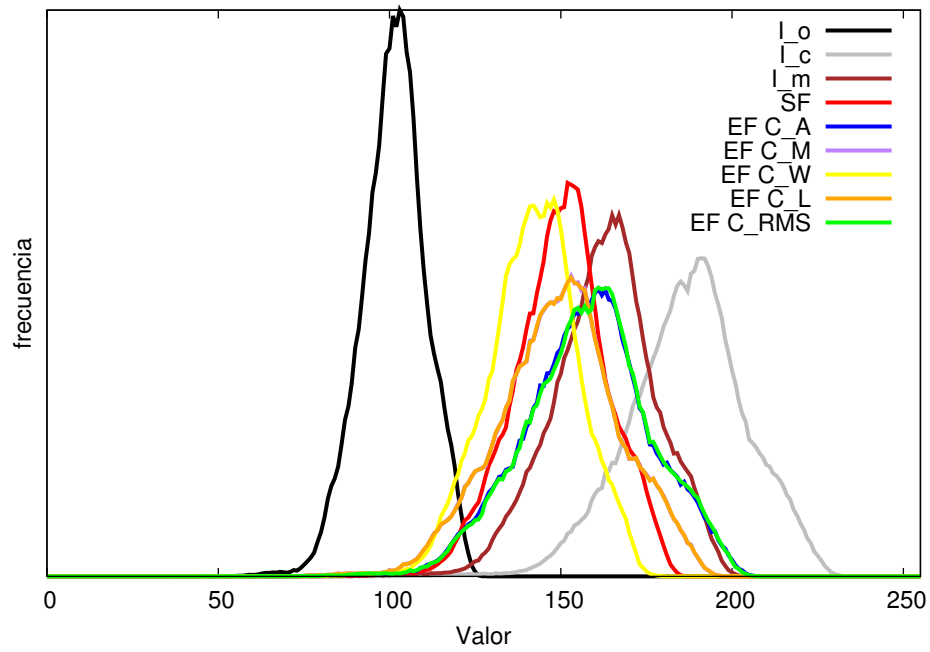
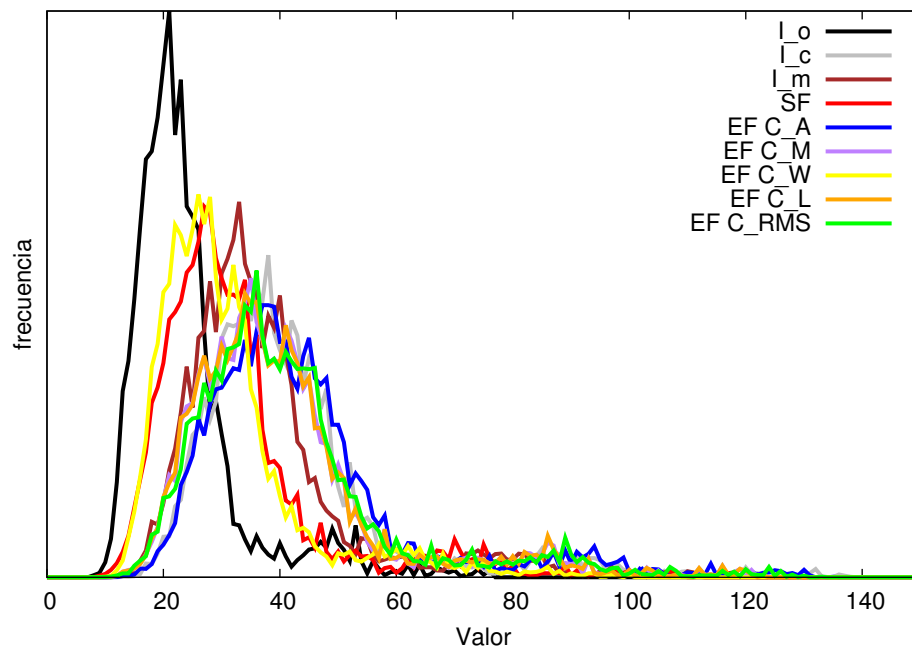
(a) Intensidad local  $L(i, j)$ (b) Contraste  $C_{A_{I_o}}$ 

Figura 4.14: Histogramas relevantes de las diferentes imágenes utilizadas en el proceso de fusión analizado

local utilizado, donde la fusión mediante el contraste RMS es en la que se obtienen menores tiempos seguido por el algoritmo con contraste global.

**Tabla 4.11:** Tiempos de fusión  $t_f$  de los diferentes algoritmos implementados

Tipo de fusión	$t_f$ (s)	$\sigma_{t_f}$ (s)
Simple	0,010	0,006
Exposición con $C_{A_{I_o}}$	1,40	0,01
Exposición con $C_{M_{I_o}}$	1,41	0,02
Exposición con $C_{W_{I_o}}$	3,63	0,04
Exposición con $C_{L_{I_o}}$	2,53	0,03
Exposición con $C_{RMS_{I_o}}$	1,17	0,01

## 4.4. Evaluación global del sistema

Como evaluación final del proyecto se utiliza el sistema presentado en la sección 3.4 por el método de fusión de exposición utilizando los contrastes locales  $C_{A_{I_o}}$  y  $C_{RMS_{I_o}}$  (en los que las imágenes fusionadas presentaban los mayores valores de contraste y menor NRE) y la etapa de linealización para extender el rango dinámico de las imágenes.

Para la adquisición de imágenes se generan dos procesos de mejoramiento a diferentes niveles de iluminación: una en el día (iluminación natural) y otra en la noche (iluminación artificial) para comprobar que el sistema funciona y se adapta a distintos ambientes de prueba. Las imágenes adquiridas se muestran en la Figura 4.15 para el día y en la Figura 4.16 para la noche. La fusión y linealización de las imágenes capturadas se muestran en la Figura 4.17 para el día y en la Figura 4.18 para la noche.

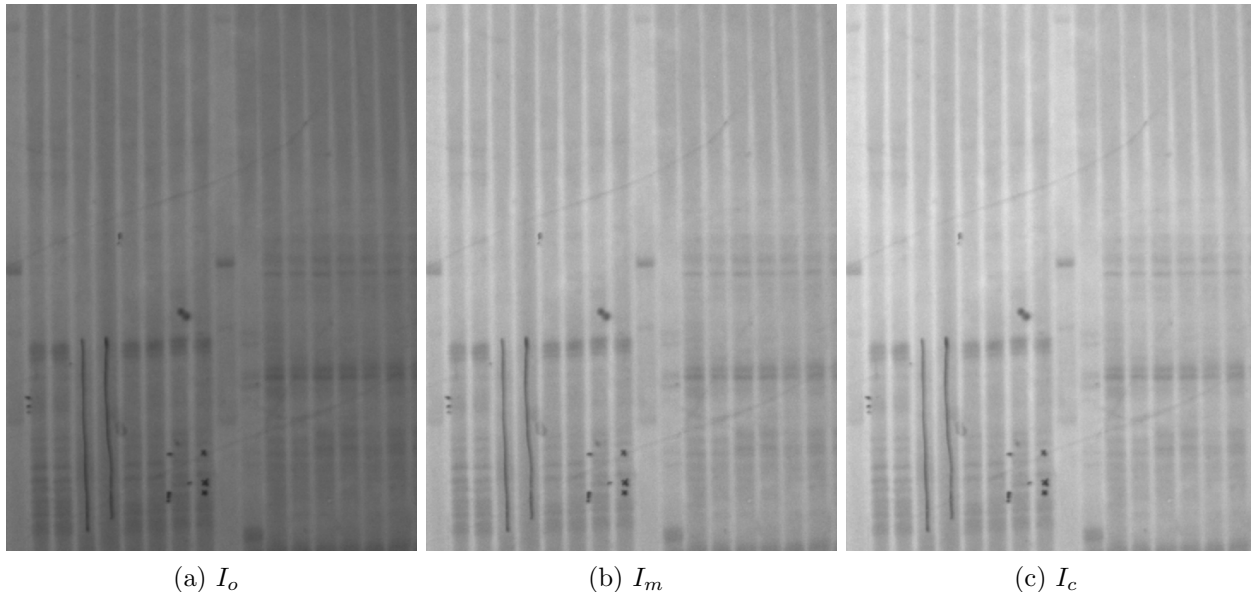


Figura 4.15: Imágenes a fusionar adquiridas por el ajuste multiparamétrico en condiciones de de iluminación natural (día)



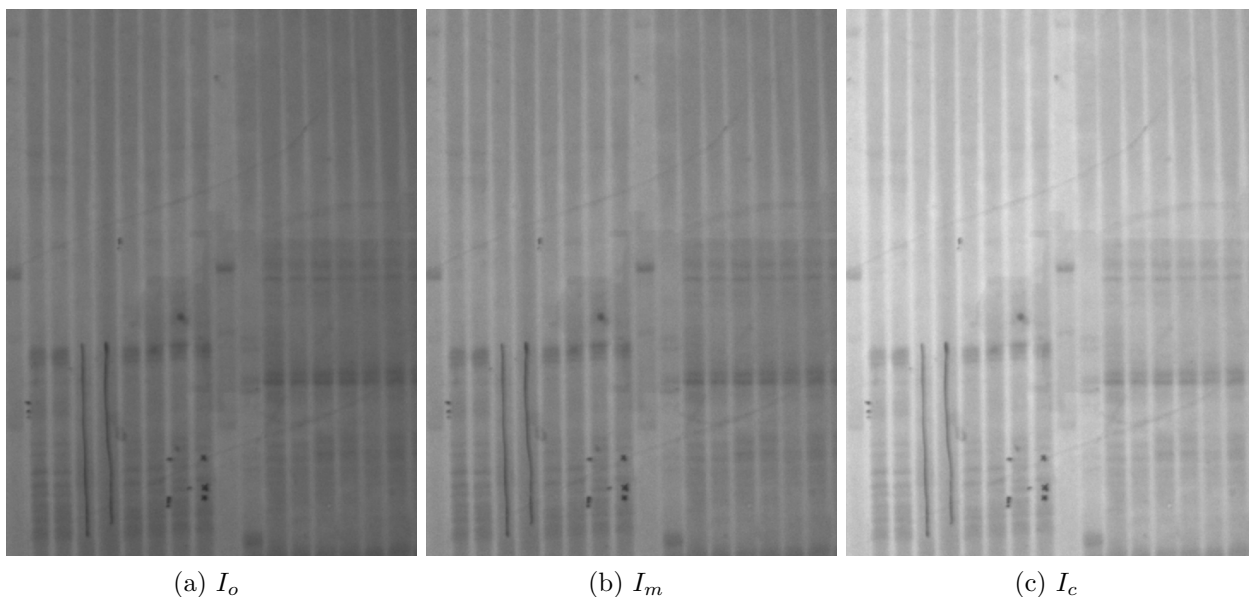


Figura 4.16: Imágenes a fusionar adquiridas por el ajuste multiparamétrico en condiciones de iluminación artificial (noche)

En la Tabla 4.12 se muestran las medidas globales de calidad para las imágenes obtenidas en el día y en la Tabla 4.13 para la noche. Como medidas de aptitud locales se calculan los histogramas de intensidad local  $L(i, j)$  y contraste absoluto local  $C_{A_{lo}}$  de las imágenes utilizadas en el proceso. Los histogramas para la prueba del día se muestran en la Figura 4.19 y para la noche en la Figura 4.20.

**Tabla 4.12:** Resultados globales del mejoramiento de imágenes digitales de geles de electroforesis por medio de fusión y ajuste multiparamétrico de la captura en condiciones de iluminación natural (día)

Parámetro	Imágenes iniciales Nivel de intensidad Figura 4.15			Imágenes finales EF y linealización Figura 4.17	
	(a)	(b)	(c)	(a)	(b)
	$I_o$	$I_m$	$I_c$	$C_{A_{lo}}$	$C_{RMS_{lo}}$
$\mu_L$	111,489	168,116	184,817	178,7	178,815
$Me_L$	112	169	186	180	180
$C_{AG}$	0,396	0,596	0,643	1	1
$C_{MG}$	0,564	0,567	0,558	1	1
$C_{W_G^{min}}$	-0,650	-0,655	-0,648	-1	-1
$C_{W_G^{max}}$	0,255	0,249	0,239	0,427	0,426
$C_{LG}$	0,905	0,904	0,887	1,427	1,426
$C_{RMS_G}$	11,162	16,288	17,809	29,01	29,02
NRE	4,759	8,146	8,802	16,44	17,6

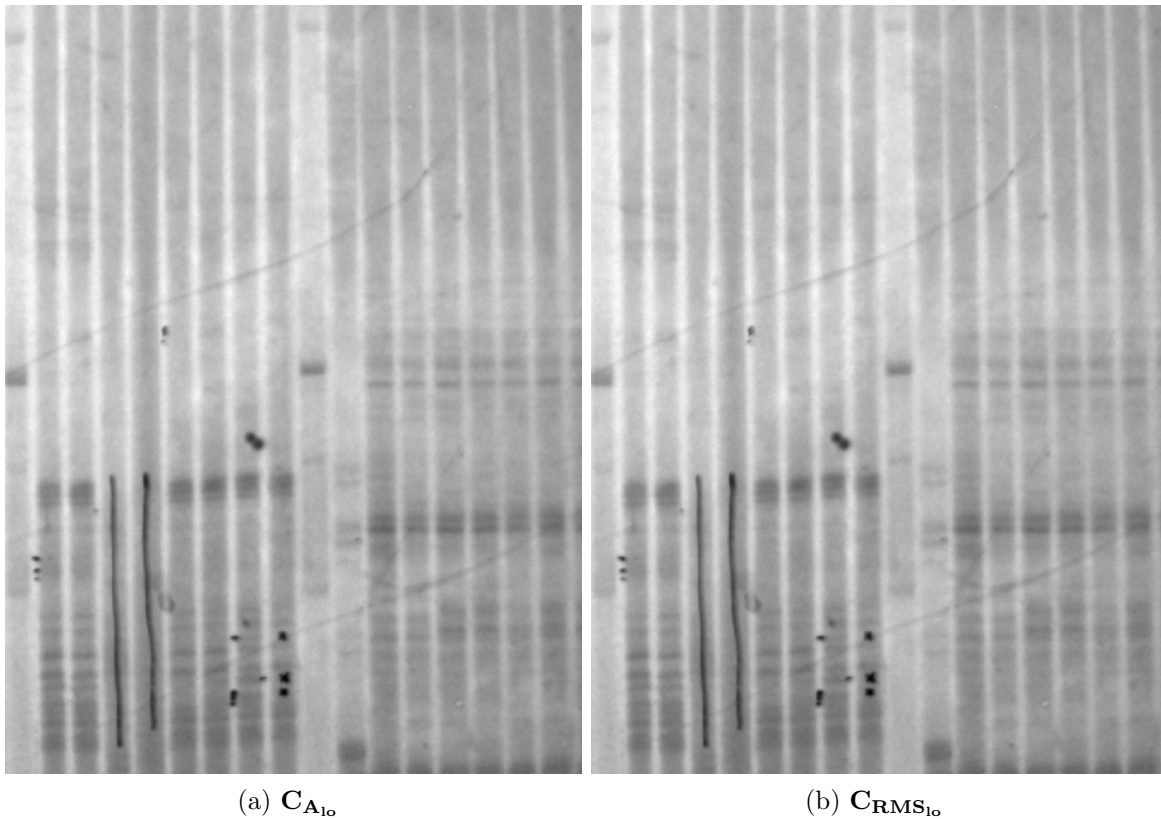


Figura 4.17: Imágenes finales del sistema diseñado en condiciones de iluminación natural (día)

En los dos procesos evaluados (día y noche) se obtuvieron medidas de aptitud de intensidad  $\mu_L$  y  $Me_L$  para las imágenes finales alrededor de 170 unidades de intensidad, como se muestra en Tabla 4.12 para el día y en la 4.13 para la noche. Además se observa que las medidas de aptitud para los dos ambientes de prueba presentan diferencias menores al 2% en las imágenes finales, lo que comprueba que el sistema funciona y se adapta a distintos ambientes de prueba.

En las Tablas 4.12 y 4.13 se observa que el sistema de mejoramiento de imágenes digitales de geles de electroforesis por medio de fusión y ajuste multiparamétrico de la captura aumenta los valores de las cinco mediciones de contraste realizadas (absoluto, de Michelson, de Weber, de intensidad y RMS) en sus versiones globales, alrededor de un 100% con respecto a la imagen con valores de contraste menores (imagen oscura) y en un 60% con respecto a la imagen con valores de contraste mayores (imagen clara). Además en las Figuras 4.15 y 4.16 se observa que los histogramas de intensidad de las imágenes finales presentan un mayor rango dinámico, alrededor de un 35% más en la escala de grises que las imágenes de entrada. Así se comprueba el aumento de las medidas de aptitud de calidad de las imágenes capturadas.

Por otra parte, en las Figuras 4.17 y 4.18 se observa que los histogramas de contraste absoluto local para las imágenes obtenidas por el sistema global presentan mayor rango dinámico que las imágenes de entrada, puesto que cubren alrededor de un 20% más de su rango total de valores y con valores más cercanos a su límite máximo. Ésto proporciona mayor nitidez en

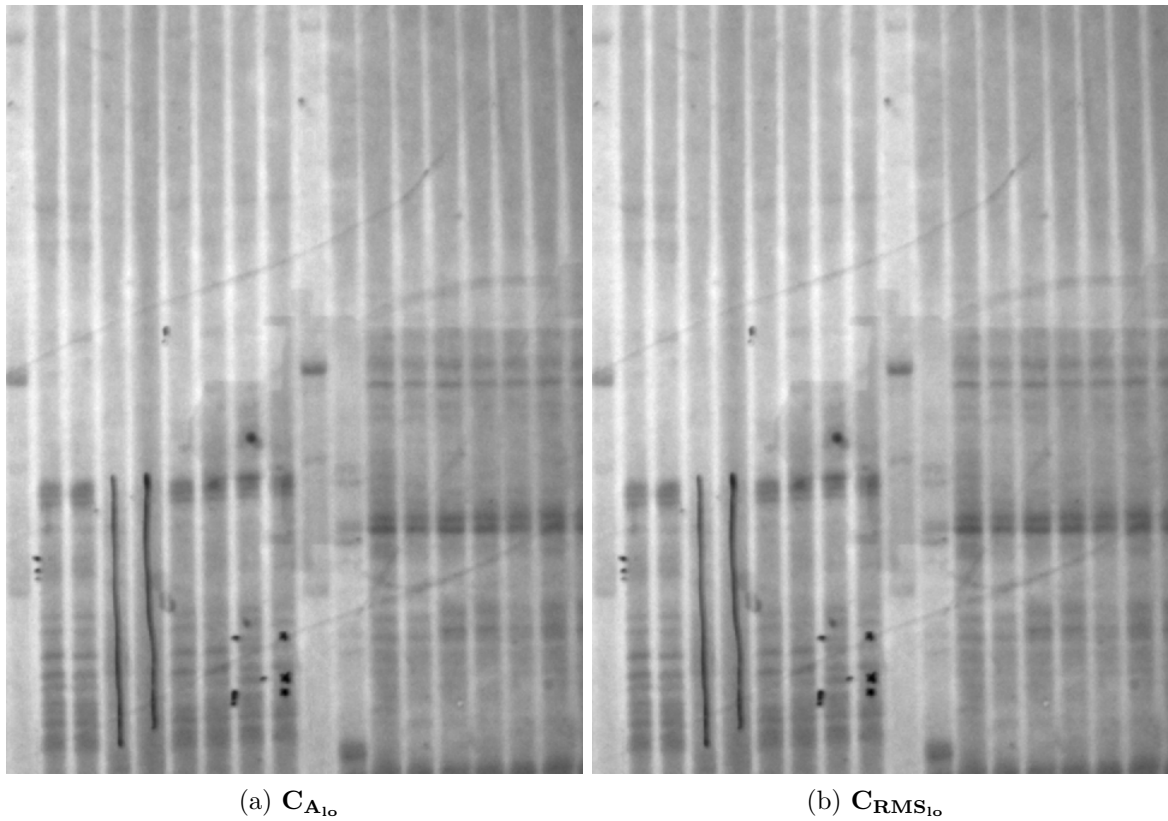


Figura 4.18: Imágenes finales del sistema diseñado en condiciones de iluminación artificial (noche)

las imágenes finales.

Por último en las Tablas 4.12 y 4.13 se puede observar un aumento alrededor de 8 unidades de ruido en el NRE de las imágenes de entrada, debido a la fusión y la linealización realizadas. Este efecto se tolera debido a la disminución del 60 % en las imágenes iniciales adquiridas por el sistema optimizador, por lo que el NRE en las imágenes finales adquiridas por el sistema global implementado son menores que las imágenes capturas sin éste en intensidades  $\mu_L$  y  $Me_L$  aproximados, como las imágenes adquiridas de manera manual en este capítulo.

**Tabla 4.13:** Resultados globales del mejoramiento de imágenes digitales de geles de electroforesis por medio de fusión y ajuste multiparamétrico de la captura en condiciones de iluminación artificial (noche)

Parámetro	Imágenes iniciales Nivel de intensidad Figura 4.16			Imágenes finales EF y linealización Figura 4.18	
	(a)	(b)	(c)	(a)	(b)
	$I_o$	$I_m$	$I_c$	$C_{A_{I_o}}$	$C_{RMS_{I_o}}$
$\mu_L$	110,932	133,971	184,368	172,756	173,367
$Me_L$	111	134	185	173	174
$C_{AG}$	0,372	0,439	0,604	1	1
$C_{MG}$	0,519	0,504	0,506	1	1
$C_{W_Gmin}$	-0,253	-0,589	-0,593	-1	-1
$C_{W_Gmax}$	0,253	0,246	0,242	0,476	0,471
$C_{LG}$	0,856	0,836	0,835	1,476	1,471
$C_{RMS_G}$	10,616	11,85	17,014	30,778	31,027
NRE	4,319	5,765	8,245	17,64	16,95

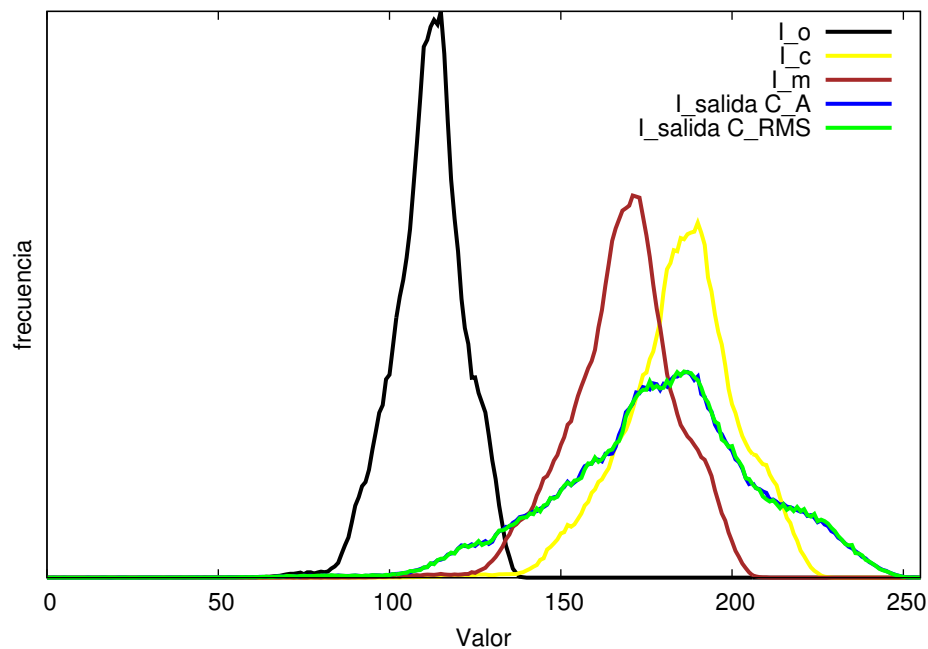
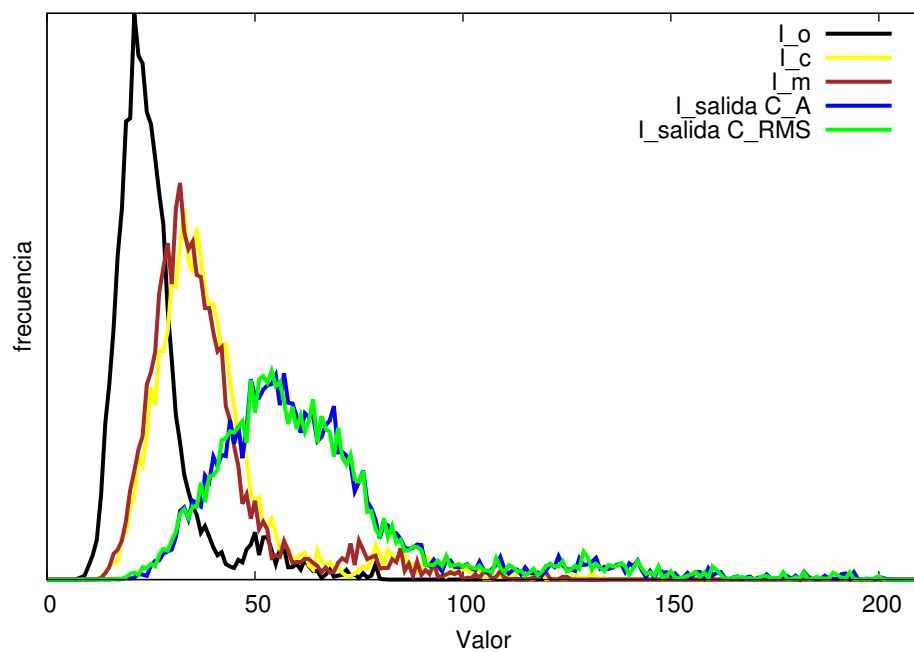
(a) Intensidad local  $L(i, j)$ (b) Contraste  $C_{A_{I_0}}$ 

Figura 4.19: Histogramas relevantes de las diferentes imágenes utilizadas en el proceso de mejoramiento de imágenes digitales de geles de electroforesis por medio de fusión y ajuste multiparamétrico de la captura en la prueba de día

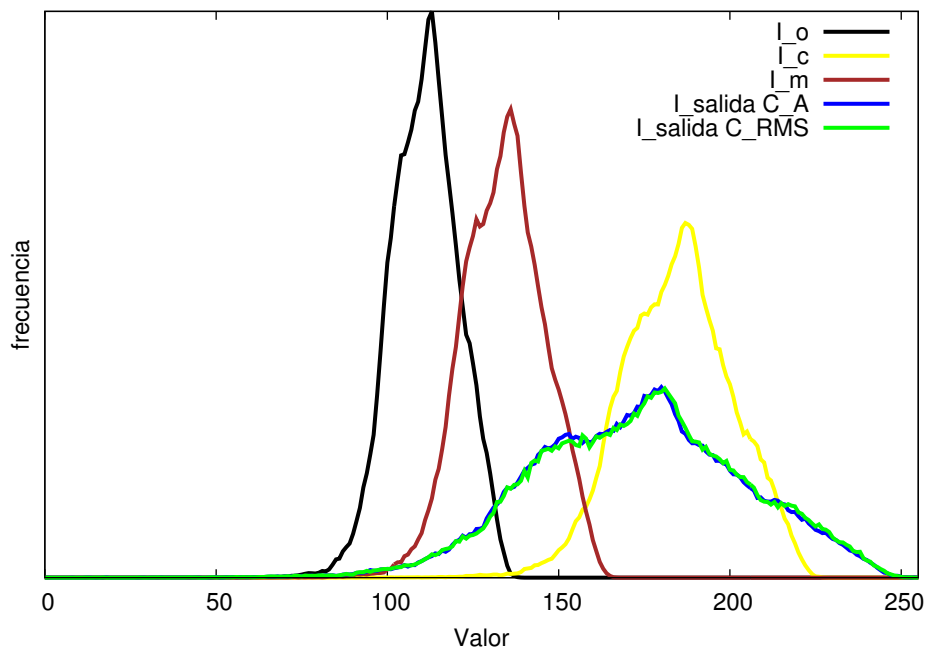
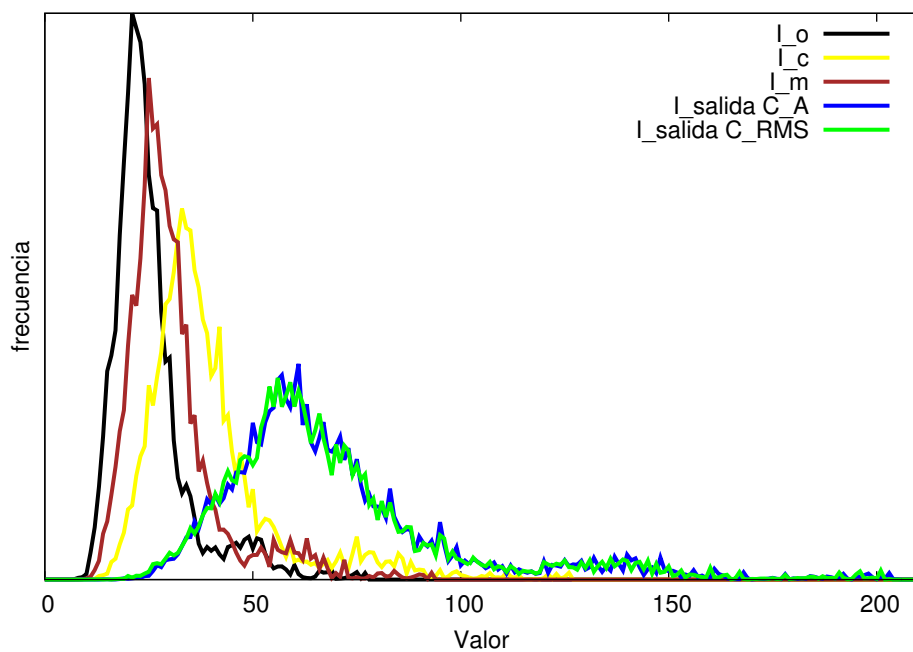
(a) Intensidad local  $L(i, j)$ (b) Contraste  $C_{A_{I_o}}$ 

Figura 4.20: Histogramas relevantes de las diferentes imágenes utilizadas en el proceso de mejoramiento de imágenes digitales de geles de electroforesis por medio de fusión y ajuste multiparamétrico de la captura en la prueba de noche

# Capítulo 5

## Conclusiones y Recomendaciones

En este capítulo se presentan los principales aportes que se obtuvieron en el proyecto, específicamente en el mejoramiento de calidad en imágenes digitales. Se plantean las conclusiones del trabajo que comprueban el cumplimiento de los objetivos planteados, así como posibles recomendaciones en caso de continuar la investigación en esta área de interés.

### 5.1. Conclusiones

La calidad en imágenes digitales es una característica subjetiva, dependiente de la percepción visual que tenga cada individuo; sin embargo, los programas computacionales utilizan medidas cuantificables para tomar decisiones, lo que hace necesario el diseño de algoritmos de medición de calidad como los generados en este proyecto. Se demuestra que las medidas locales analizan la imagen por segmentos, mientras las medidas globales dan una evaluación general de la imagen. A través de este trabajo se obtuvieron medidas de la calidad de una imagen, que permiten realizar evaluaciones objetivas, específicamente de intensidad, contraste y ruido.

Uno de los principales aportes de este trabajo es el diseño de un sistema de adquisición mediante el ajuste multiparamétrico de la captura, donde se demostró el incremento de las medidas de contraste y reducción del nivel de ruido estimado en las imágenes capturadas mediante la optimización del sistema. El análisis estadístico realizado para diseñar la etapa de ajuste multiparamétrico de la captura, le permitió al sistema actuar y tomar decisiones iniciando en un punto concreto con la evaluación de una imagen de entrada generada con base en el rango solicitado, lo que le permitió llegar al resultado en menos de 3 segundos, sin más iteraciones que las diez requeridas por el sistema para realizar comparaciones de calidad y seleccionar la mejor de las diez imágenes generadas.

De los algoritmos de fusión implementados, el algoritmo de fusión de exposición obtuvo un mayor incremento de las medidas de calidad en las imágenes que el algoritmo de fusión simple. Se demostró una ampliación en el rango dinámico y un incremento en las medidas de contraste de las imágenes de salida con respecto a las imágenes de entrada.

Mediante el sistema global implementado se logró el objetivo principal de este trabajo, ya que en las imágenes digitales de geles de electroforesis visualmente se pueden determinar los *carriles* y las *bandas*, debido a un incremento en la nitidez de las imágenes de salida y objetivamente se obtuvieron mayores índices de calidad en las imágenes capturadas por el sistema que las obtenidas de manera manual.

## 5.2. Recomendaciones

Para la medición de contraste se recomienda utilizar los métodos de medición local, ya que el contraste global es sensible al entorno total. Un solo píxel con nivel alto de intensidad y otro con nivel bajo generan un excelente contraste global, aunque la imagen tenga un pésimo contraste visual.

Cuando se realice la mejora de una misma escena se recomienda manipular el sistema de adquisición y pre-procesamiento de mejoramiento de calidad de imágenes en un ambiente controlado, donde la iluminación sea aproximadamente la misma, sin importar si es de día o de noche, porque a pesar de que el sistema de adquisición optimizado de la cámara está diseñado para adaptarse al nivel de luz percibido, los resultados varían si se realizan a diferentes horas del día debido a que se necesitan variar los parámetros de la cámara para obtener imágenes con el mayor nivel de contraste y menor NRE posibles y estos afectan directamente el ruido percibido. Además los niveles de temperatura no deben ser extremos para que el sensor CCD no genere más ruido en las imágenes adquiridas.

Los resultados obtenidos en la optimización del sistema de adquisición son aplicables a la cámara digital Basler A631FC con chip CCD de 1/2" utilizada en este trabajo, por lo que si se cambia la cámara digital a utilizar se recomienda volver a realizar el análisis estadístico para el diseño del optimizador, puesto que los resultados pueden no ser los esperados debido a que no todos los sensores de captura de las cámaras responden igual al cambio de sus parámetros de captura; sin embargo, el algoritmo de optimización utilizado si funciona para cualquier cámara, por lo que basta con seguir los pasos para realizar el diseño de ajuste multiparamétrico de la captura.

Finalmente, en este trabajo se utilizaron algoritmos de fusión de imágenes en el dominio espacial donde las operaciones se realizan a nivel de píxel y características de la imagen. Por lo que se recomienda ampliar la investigación a diferentes dominios, como por ejemplo el dominio de la frecuencia o el dominio de la transformada Wavelet, para implementar algoritmos de fusión y compararlos con los resultados obtenidos en el dominio que se trabajó en este proyecto. De igual forma se recomienda diseñar e implementar otros sistemas para optimizar la captura de imágenes digitales, con el objetivo de comparar resultados.



# Bibliografía

- [1] Miguel Angel Aguilar. Desarrollo de una etapa de preprocesamiento para reducción de ruido, mejoramiento de contraste y de nitidez en imágenes digitalizadas de geles de electroforesis. Master's thesis, Escuela de Ingeniería Electrónica, ITCR, Cartago, Costa Rica, 2007.
- [2] F. Xabier Albizuri. *Procesamiento de imagen digital*. Universidad Euskal Herriko, España, Enero 2010.
- [3] P. Alvarado, A. Salazar, O. Murillo, F. F. Rojas, and J. Peraza. Análisis de imágenes de geles de electroforesis para la caracterización molecular de organismos. propuesta de proyecto de investigación. Technical report, VIE. Instituto Tecnológico de Costa Rica, 2007.
- [4] Discovery Channel Company. What is the difference between ccd and cmos image sensors in a digital camera?, 2011. URL <http://electronics.howstuffworks.com/cameras-photography/digital/question362.htm> [visitado el 30 de noviembre de 2011].
- [5] Antonio Díaz. Contraste local, enero 2010. URL <http://www.scribd.com/doc/27823375/Contraste-Local> [visitado el 30 de noviembre de 2011].
- [6] The Imaging Source Europe. Camera parameters. maximizing the image quality. Technical report, GmbH, 2005.
- [7] C.L.W.T. Freeman and R.S.S.B. Kang. Noise estimation from a single image. In *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2006.
- [8] R. C. Gonzalez and R. E. Woods. *Digital Image Processing, Third Edition*. Prentice Hall, 2008.
- [9] Alexander Hornberg. *Handbook of machine vision*. Wiley-VCH, 2005.
- [10] H. Irshad, M. Kamran, A.B. Siddiqui, and A. Hussain. Image fusion using computational intelligence: A survey. In *2009 Second International Conference on Environmental and Computer Science*, pages 128–132. IEEE, 2009.
- [11] Bernd Jähne. *Digital image processing (6. ed.)*. Springer, 2005.

- 
- [12] P. Jung-Me, C.G. Looney, and C. Hui-Chuan. Fast connected component labeling algorithm using a divide and conquer technique. In *CATA 2000 Conference on Computers and Their Applications*, pages 373–376, 2000.
- [13] Alex Logan and Galina Havin. Larry Arend. Luminance contrast, 2011. URL [http://colorusage.arc.nasa.gov/luminance\\_cont.php](http://colorusage.arc.nasa.gov/luminance_cont.php) [visitado el 30 de noviembre de 2011].
- [14] H. Lu, H. Zhang, S. Yang, and Z. Zheng. Camera parameters auto-adjusting technique for robust robot vision. In *Robotics and Automation (ICRA), 2010 IEEE International Conference on*, pages 1518–1523. IEEE, 2010.
- [15] T. Mertens, J. Kautz, and F. Van Reeth. Exposure fusion. In *Computer Graphics and Applications, 2007. PG'07. 15th Pacific Conference on*, pages 382–390. IEEE, 2007.
- [16] E. Peli. Contrast in complex images. *JOSA A*, 7(10):2032–2040, 1990.
- [17] G. Piella. Image fusion for enhanced visualization: a variational approach. *International journal of computer vision*, 83(1):1–11, 2009.
- [18] Inc. RMA Electronics. Vision products of industry, 2011. URL <http://www.rmassa.com/manu/hitachi.htm> [visitado el 30 de noviembre de 2011].
- [19] M. Sonka, V. Hlavac, and R. Boyle. Image processing, analysis, and machine vision. *CL-Engineering*,, 2007.
- [20] Q.K. Vuong, S.H. Yun, and S. Kim. A new auto exposure and auto white-balance algorithm to detect high dynamic range conditions using cmos technology. In *Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science*. Citeseer, 2008.

# Índice alfabético

- algoritmo
  - fusión, 29
    - exposición, 30
    - simple, 29
  - medición, 19
    - contraste, 21
    - intensidad, 20
    - ruido, 23
- análisis, 33
- brillo, 14
- cámara
  - manejo, 26
- cámara digital, 13
- CCD, 14
- CMOS, 14
- conclusiones, 57
- conectividad, 14
- contraste, 3, 11
  - absoluto, 11
  - global, 12
  - intensidad, 11
  - local, 12
  - Michelson, 11
  - RMS, 11
  - Weber, 11
- dominio espacial, 8
- electroforesis, 1
- etapa
  - fusión, 32
  - linealización, 32
  - registro, 30
- fusión
  - característica, 16
  - decisión, 16
  - exposición, 17
  - imágenes, 15, 44
  - métodos, 45
  - píxel, 16
  - simple, 17
- ganancia, 14
- global, 10
- histograma, 8
- iluminación, 10
- imagen
  - calidad, 4
  - digital, 7
  - intensidad, 10
    - global, 10
    - local, 10
    - media, 21
    - mediana, 21
- local, 10
- medidas
  - aptitud, 33
    - globales, 34
    - locales, 36
- mejoramiento
  - calidad, 50
- niveles de intensidad, 10
- objetivos, 5
- obturación, 15
- optimizador
  - funcionamiento, 39

imágenes, 39

píxel, 7

recomendaciones, 58

reflectancia, 10

resultados, 33

ruido, 3, 12

    impulso, 12

    normal, 12

sistema

    final, 30

SNR, 7

tiempo

    captura, 43

    fusión, 48

transformación

    lineal, 32

vecindario, 7