 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01- 27

# **Análisis de patrones de franja en imágenes computacionales de fotoelasticidad digital basado en matrices de co-ocurrencia y correlogramas de colores**


---

Pablo Daniel Giraldo Bustamante

Ingeniería de Sistemas

**INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO**

**6/05/2023**

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## RESUMEN

---

Las imágenes de fotoelasticidad con patrones de franja esconden en ellas información sobre el campo de esfuerzos, la cual es de interés recuperar. Actualmente existen varios procesos que permiten lograr esto, sin embargo, entre los varios factores externos que afectan a estos, se encuentra la calidad de los patrones de franja de las imágenes. Ha habido ya trabajos en los que se sugiere que descriptores de textura pueden dar información sobre la calidad, sin embargo, aún falta por abordar en esta cuestión. Así, en este trabajo, utilizando diferentes enfoques, se calcula el contraste sobre regiones que resultan de segmentar imágenes con patrones de franja generadas computacionalmente. El enfoque central involucra una estructura basada en el correlograma de colores. Los resultados obtenidos sugieren que el contraste es capaz de discriminar entre las regiones consideradas. Además, el enfoque central podría ser el más adecuado si se muestra formalmente que es más eficiente computacionalmente que otro en el que se utilizan matrices de coocurrencia.

*Palabras clave:* Fotoelasticidad, fotoelasticidad digital, patrones de franja, imágenes de fotoelasticidad simuladas, visión artificial, disco bajo compresión diametral, descriptores de textura, matrices de co-ocurrencia, contraste, correlograma de colores.

## ACRÓNIMOS

---


IFFS imágenes de franjas de fotoelasticidad simuladas

PS Phase Shifting

MPa Mega Pascales

PMMA polimetilmetacrilato


ROI(S) Region(s) of interest

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22


# TABLA DE CONTENIDOS

---

1. INTRODUCCIÓN .....	5
a. GENERALIDADES .....	5
b. OBJETIVOS .....	8
i. GENERAL .....	8
ii. ESPECÍFICOS .....	8
c. ORGANIZACIÓN DE LA TESIS.....	9
2. MARCO TEÓRICO.....	9
a. CAMPO DE ESFUERZOS.....	9
b. BIRREFRINGENCIA.....	11
c. FOTOELASTICIDAD .....	12
d. ANÁLISIS DE TEXTURA .....	15
e. DISTANCIA.....	17
f. MATRIZ DE CO-OCURRENCIA.....	18
g. CORRELOGRAMA DE COLORES.....	19
h. CONTRASTE.....	19
3. METODOLOGÍA.....	20
a. MATERIALES Y MÉTODOS .....	21
i. GENERACIÓN DE IMÁGENES DE FRANJAS DE FOTOELASTICIDAD SIMULADA .....	21
ii. ZONAS DE REFERENCIA CON DISTINTOS NIVELES DE DENSIDAD DE FRANJAS .....	23
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	27
5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO .....	33

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

a. TRABAJO FUTURO.....	33
REFERENCIAS .....	35
APÉNDICE A .....	37
APÉNDICE B.....	38

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

# 1. INTRODUCCIÓN


---

## a. GENERALIDADES

Un patrón de franjas se define como una "señal sinusoidal en la que un mapa continuo, análogo a la cantidad física que se mide, se modula en fase mediante un interferómetro; un sistema de Moiré, etc." (Servin, Quiroga, & Padilla, 2014, pág. 1). De hecho, en general, en problemas que implican análisis de patrones de franja, lo que estos hacen es codificar la información que en principio proviene de la medición de algún tipo de variable física, como puede ser, por ejemplo, la fuerza. Así, se hace uso de una función matemática que, al operar junto con la variable en cuestión, produce como resultado patrones de franja. Teniendo esto en cuenta, ya que hay información física subyacente asociada al patrón de franjas, es de interés recuperarla (decodificarla).

Por ejemplo, en los casos (Guo & Huang, 2010) y (Anguiano-Morales, Noé Arias, Garnica, & Martínez, 2014), se capturaron imágenes de rostros sobre los cuales se proyectaba un determinado patrón de franjas. En estos estudios se decodificó información sobre el relieve de los rostros, lo cual permitió modelarlos en un plano tridimensional. Esto último fue utilizado para entrenar clasificadores capaces de realizar reconocimiento facial. Otro ejemplo es el mencionado en (Fandiño Toro, Briñez De León, Restrepo Martinez, & W. Branch Bedoya, 2018), en el cual se trabajó con imágenes de franjas de fotoelasticidad simuladas (IFFS), las cuales codificaban información sobre los esfuerzos presentes en un disco sometido a compresión diametral. En el trabajo presente también se analizan IFFS.

La fotoelasticidad es una técnica experimental que permite evaluar el campo de esfuerzos de una pieza bajo carga, a partir del procesamiento de imágenes con patrones de franja. (Ramesh, Kasimayan, & Neethi Simon, 2011). Esta técnica es de interés en la comunidad científica porque permite análisis no invasivos, no destructivos, en tiempo real, y de campo completo, de muchos tipos de superficies bajo la acción de carga. Así, con un montaje óptico

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

y una fuente de iluminación adecuada, es posible evaluar las condiciones de operación de una pieza sin que esta llegue a condiciones de falla (Jaiber Acevedo, Briñez de León, & Fandiño Toro, 2022).


En sus inicios, era bastante tedioso decodificar patrones de franja utilizando fotoelasticidad. Sin embargo, con el uso de computadoras, en conjunto con técnicas de procesamiento de imágenes, surgió la fotoelasticidad digital, lo cual facilitó notablemente este proceso (Ramesh, Kasimayan, & Neethi Simon, 2011).

Utilizando fotoelasticidad, el análisis de los esfuerzos presentes en las IFFS puede desarrollarse de dos formas:

- Estática: La carga a la que se somete la pieza es fija; no cambia.
- Dinámica: La carga a la que se somete la pieza varía a lo largo del tiempo.

En (Ramesh, Kasimayan, & Neethi Simon, 2011) y (Jaiber Acevedo, Briñez de León, & Fandiño Toro, 2022) se dice que, actualmente, para un análisis del campo de esfuerzos en condiciones de carga variable, existen estudios en los cuales se muestra que el cambio de la intensidad de píxeles en las imágenes de fotoelasticidad esta correlacionado con el cambio en la carga. Así, tiene sentido la utilización de métodos de procesamiento basados en la intensidad de píxeles para la adquisición de la información referente a los esfuerzos. Según (Ramesh, Kasimayan, & Neethi Simon, 2011), ya ha habido estudios que han mostrado que la utilización de métodos en el dominio de la frecuencia trae consigo limitaciones lo suficientemente considerables como para preferir, a largo plazo, los métodos en el dominio del espacio. Por ejemplo, se menciona que la transformada de Fourier, además de tener un alto costo computacional, no permite obtener simultáneamente tanto la diferencia como la dirección de los esfuerzos presentes en un patrón de franjas.


Por lo tanto, el enfoque propuesto en (Fandiño Toro, Briñez De León, Restrepo Martinez, & W. Branch Bedoya, 2018), donde se utilizan descriptores de textura para obtener información de los esfuerzos presentes en las IFFS, es pertinente y puede considerarse que utiliza métodos en el dominio del espacio. En general, los descriptores se utilizan con la

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

intención de representar (por ejemplo, cuantitativamente) los rasgos de una imagen que sean importantes según el problema que se esté abordando. En el caso de los descriptores de textura, estos son utilizados para llevar a cabo tareas como el reconocimiento de patrones en una imagen, tal y como se hace en (Haralick, Shanmugam, & Dinstein, 1973), o la recuperación de imágenes, tal y como sucede con el histograma y correlograma de colores mencionados en (Tian, 2013) y (Kumar & Sreekumar, 2014).

En este trabajo se calcula la métrica de contraste sobre varias IFFS generadas, tal y como se hizo en (Fandiño Toro, Briñez De León, Restrepo Martínez, & W. Branch Bedoya, 2018). Sin embargo, a diferencia de como se hizo en aquel trabajo, donde se utilizó el contraste calculado a partir de las matrices de co-ocurrencia propuestas en (Haralick, Shanmugam, & Dinstein, 1973), se extraerá esta métrica a partir de una estructura basada en el correlograma de colores propuesto en (Huang, Kumar, Mitra, Zhu, & Zabih, 1999). Una vez se haya calculado el valor de contraste sobre varias regiones de interés en cada una de las IFFS, se podrá hacer un análisis sobre la relación entre los valores obtenidos y los esfuerzos presentes en las regiones.

Este trabajo se justifica en la necesidad de avanzar en estrategias de caracterización de los patrones de franja en la aplicación concreta de estudios de fotoelasticidad. En (Fandiño Toro, Briñez De León, Restrepo Martínez, & W. Branch Bedoya, 2018) ya se mostró que esta técnica proporciona varias ventajas comparativas para la evaluación del campo de esfuerzos, pero al mismo tiempo, hay limitaciones en cuanto a la utilización de descriptores para analizar la calidad de los patrones de franja para las imágenes de esta técnica. Una limitación es que, mientras para otros tipos de imágenes hay muchos descriptores de imágenes como por ejemplo de contraste, de borrosidad, de atenuación de la información de color, etc., incluso en publicaciones de alto impacto en el área de fotoelasticidad, a veces se mencionan estos aspectos de manera comparativamente informal. Por lo tanto, el presente trabajo apunta hacia la adaptación de descriptores de la información visual de imágenes, aplicado al problema de imágenes con patrones de franja fotoelásticas.

 Institución Universitaria	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## **b. OBJETIVOS**


### **i. GENERAL**

Analizar el desempeño de descriptores de textura basados en matrices de coocurrencia y correlogramas de color, para reconocer zonas con diferentes niveles de densidad de franja en imágenes computacionales de fotoelasticidad digital.

### **ii. ESPECÍFICOS**

1. Determinar un conjunto de descriptores basado en matrices de coocurrencia y correlogramas de color para caracterizar la textura de imágenes computacionales de fotoelasticidad digital.
2. Establecer un conjunto de experimentos para caracterizar la textura de regiones de interés -ROI- cuadradas y de forma arbitraria, utilizando los descriptores de textura basados en matrices de coocurrencia y correlogramas de color determinados en el objetivo específico 1.
3. Especificar un conjunto de experimentos para reconocer zonas con diferentes niveles de concentración de franjas en imágenes computacionales de fotoelasticidad digital, utilizando los descriptores del objetivo específico 1, para casos donde se consideren ROIs cuadradas y de forma arbitraria.
4. Validar los resultados de los experimentos del objetivo específico 3, al comparar las zonas halladas en el objetivo específico 3, contra zonas de referencia halladas manualmente al aplicar la Ley de Esfuerzo-Óptico.



 Institución Universitaria	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

### c. ORGANIZACIÓN DE LA TESIS

El trabajo se desarrolla a lo largo de las siguientes secciones:

- Marco teórico: Se explican conceptos teóricos necesarios para el buen entendimiento de las secciones posteriores.
- Metodología: Se especifica cómo utilizar una estructura basada en el correlograma de colores para el cálculo del contraste, y se explica como se realiza este cálculo.
- Materiales y métodos: Se presenta y describe la muestra de IFFS utilizadas. También se explica como será llevado a cabo el experimento (la extracción del contraste).
- Conclusiones: Se resumen los hallazgos que resultaron de este trabajo.
- Resultados: Se presentan y analizan una serie de tablas en la que se registran los distintos valores de contraste extraídos de las IFFS.
- Trabajo futuro: Se mencionan las cosas que no se alcanzaron a abordar en este trabajo, pero que son de importancia en el problema considerado.
- Apéndice A: Se menciona lo que podría ser una estrategia alternativa (a la usada en este trabajo) para la caracterización de regiones en imágenes con patrones de franja.
- Apéndice B: Se muestran los resultados completos del experimento llevado a cabo en este trabajo.


## 2. MARCO TEÓRICO

---

En este trabajo se analizan imágenes con patrones de franja en estudios de fotoelasticidad digital. Por esta razón, es conveniente describir previamente algunos elementos teóricos, para entender el origen de dichas imágenes con patrones de franja.

### a. CAMPO DE ESFUERZOS

Cuando un material es sometido a carga mecánica, cada elemento infinitesimal de su geometría experimenta una serie de interacciones entre su superficie y dicha carga. El conjunto de relaciones entre la carga aplicada y cada punto del material, se denomina

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

campo de esfuerzos. En principio, las interacciones en cada elemento infinitesimal del material se describen mediante un tensor de esfuerzos: una matriz de  $3 \times 3$  con 9 elementos. Para el caso esfuerzo plano, donde se asume que solo actúan fuerzas en los ejes  $x$  e  $y$ , el tensor es una matriz de  $2 \times 2$  dada por:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} \end{bmatrix}$$

En este tensor, las componentes rectangulares  $\sigma_{ij}$  son componentes normales, cuyo efecto es el de producir una tracción o compresión. Por otra parte, las componentes  $\tau_{ij}$  son componentes de esfuerzo cortantes, cuyo efecto es el de rotar el elemento infinitesimal evaluado.


Usualmente, los análisis del campo de esfuerzos se hacen considerando los esfuerzos principales  $\sigma_1$  y  $\sigma_2$ , los cuales se calculan como los eigenvalores del tensor de esfuerzos. Los esfuerzos principales se calculan según las ecuaciones ( 1 ) y ( 2 ), y representan los esfuerzos máximos por compresión y tracción en cada elemento infinitesimal del material evaluado.

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}. \tag{1}$$

$$\sigma_2 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}. \tag{2}$$

$$\theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left( \frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y} \right). \tag{3}$$

Para algunas geometrías simples como discos, placas rectangulares, y versiones con perforaciones de estos dos, se conocen expresiones para calcular los esfuerzos rectangulares. Una de estas geometrías es el disco bajo compresión diametral, que es el modelo considerado en este trabajo. Las ecuaciones ( 4 ), ( 5 ) y ( 6 ) permiten calcular los esfuerzos normales y cortantes para este modelo.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

$$\sigma_x = \frac{-2F}{\pi h} \left\{ \frac{x^2(R-y)}{[(R-y)^2+x^2]^2} + \frac{x^2(R+y)}{[(R+y)^2+x^2]^2} - \frac{1}{2R} \right\}. \quad (4)$$

$$\sigma_y = \frac{-2F}{\pi h} \left\{ \frac{(R-y)^3}{[(R-y)^2+x^2]^2} + \frac{(R+y)^3}{[(R+y)^2+x^2]^2} - \frac{1}{2R} \right\}. \quad (5)$$

$$\tau_{xy} = \frac{2F}{\pi h} \left\{ \frac{x(R-y)^2}{[(R-y)^2+x^2]^2} - \frac{x(R+y)^2}{[(R+y)^2+x^2]^2} \right\}. \quad (6)$$

En estas ecuaciones,  $R$  y  $h$  se refieren al radio y grosor del disco, respectivamente; y  $F$  es la carga en Newtons, aplicada al disco. Los términos  $x$  e  $y$  se refieren a coordenadas al interior de la geometría del disco.

## b. BIRREFRINGENCIA


Algunos materiales transparentes exhiben dos índices de refracción cuando son sometidos a cargas mecánicas. Esta propiedad se llama birrefringencia inducida por esfuerzos, y se puede calcular en términos de la diferencia de los índices de refracción  $n_1$  y  $n_2$ , o en términos de la diferencia de los esfuerzos principales (Hariprasad, Ramesh, & Prabhune, 2018), tal y como sugiere la ecuación ( 7 ).

$$\delta = n_1 - n_2. \quad (7)$$

Esta ecuación se puede reescribir como sigue:

$$\delta = C(\sigma_1 - \sigma_2). \quad (8)$$

En esta última ecuación,  $\delta$  es un retardo de fase, y su cálculo en toda la geometría evaluada, da lugar *al campo de esfuerzo analítico* de dicha geometría. La división del retardo de fase entre el término  $2\pi$  da lugar a una unidad denominada orden de franja. El parámetro  $C$  es propio de cada material y se denomina el coeficiente de esfuerzo-óptico relativo. La

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22


birrefringencia inducida por esfuerzos es propia de materiales transparentes, como el vidrio y algunos polímeros. A la expresión (7) se le denomina Ley de Esfuerzo-Óptico (Hariprasad, Ramesh, & Prabhune, 2018).

### c. FOTOELASTICIDAD

La Ley de Esfuerzo-Óptico permite calcular de forma exacta el campo de esfuerzos de una muestra bajo carga. Con la ecuación (7), el efecto de la carga mecánica sobre un material se calcula en términos de un retardo de fase: cuanta más carga aplicada, mayor retardo de fase. De forma análoga, la ecuación (8) indica que cuanto mayor sea la diferencia de los esfuerzos principales, mayor orden de franja.

No obstante, en escenarios experimentales, el campo de esfuerzos de un material birrefringente bajo carga no se puede calcular directamente a partir de las ecuaciones (7) o (8). En estos casos, la fotoelasticidad proporciona estrategias para evaluar el campo de esfuerzos mediante el procesamiento de colecciones de imágenes con patrones de franja desplazados; con desplazamientos de fase.

En este trabajo se considera la técnica de desplazamiento de fase, en inglés Phase Shifting (PS), propuesta por Patterson y Wang (A & F, 1991). En esta técnica la muestra birrefringente bajo carga se ubica dentro de un instrumento óptico llamado polariscopio circular, tal y como se muestra en la Figura 1.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

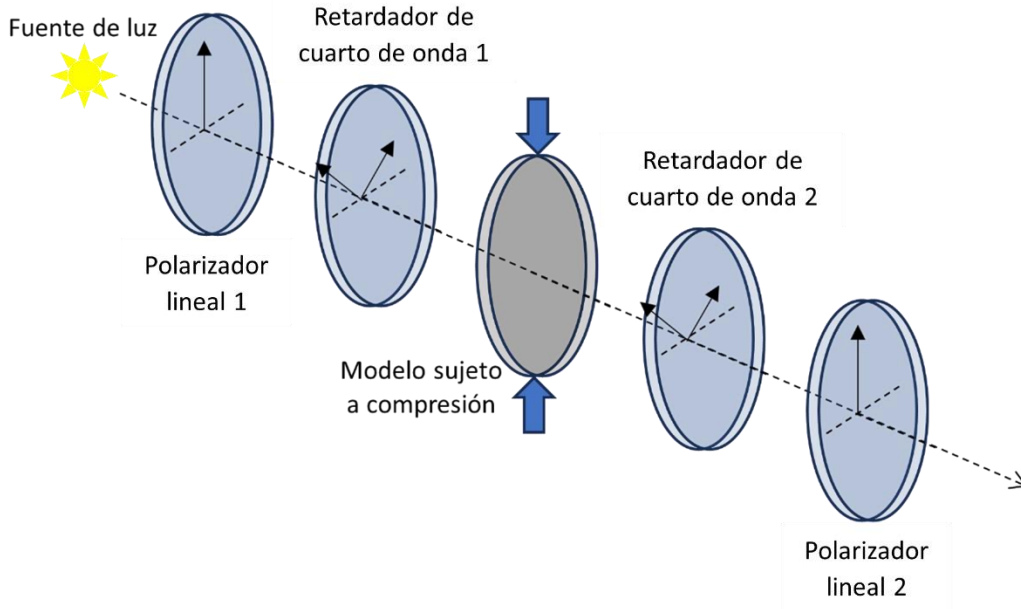


Figura 1. Representación gráfica de un polariscopio circular. Basada en (Prasath, Skenes, & Danyluk, 2013).

En el polariscopio circular se reconocen dos etapas: una a cada lado de la muestra bajo carga. La etapa a la izquierda de la muestra incluye una fuente de iluminación, un polarizador lineal y una placa de retardo de cuarto de onda. El objetivo de estos dispositivos es asegurar que la luz que incide sobre la muestra tiene polarización circular; de ahí el nombre del polariscopio.

La segunda etapa la conforman el segundo polarizador lineal y la segunda placa retardadora de cuarto de onda. El objetivo de esta etapa es recuperar la información de fase en la luz que se transmite a través de la muestra. El método PS, implica el procesamiento de 6 imágenes, las cuales se obtienen para 6 configuraciones ópticas del polariscopio, tal y como se indica en la Tabla 1.


 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Tabla 1. Ecuaciones de intensidad para el método PS de Patterson y Wang. Basada en (Prasath, Skenes, & Danyluk, 2013).


Polarizador lineal 1	Retardador de cuarto de onda 1	Retardador de cuarto de onda 2	Polarizador lineal 2	Ecuación de intensidad
$\pi/2$	$3\pi/4$	0	$\pi/4$	$I_1 = I_b + \frac{I_a}{2} [1 + \cos(\delta)]$
$\pi/2$	$3\pi/4$	0	$3\pi/4$	$I_2 = I_b + \frac{I_a}{2} [1 - \cos(\delta)]$
$\pi/2$	$3\pi/4$	0	0	$I_3 = I_b + \frac{I_a}{2} [1 - \sin(2\theta)\sin(\delta)]$
$\pi/2$	$3\pi/4$	$\pi/4$	$\pi/4$	$I_4 = I_b + \frac{I_a}{2} [1 + \cos(2\theta)\sin(\delta)]$
$\pi/2$	$3\pi/4$	$3\pi/4$	0	$I_5 = I_b + \frac{I_a}{2} [1 + \sin(2\theta)\sin(\delta)]$
$\pi/2$	$3\pi/4$	$\pi/4$	0	$I_6 = I_b + \frac{I_a}{2} [1 - \cos(2\theta)\sin(\delta)]$

En las anteriores ecuaciones,  $I_a$  es la intensidad que se tiene cuando todos los ejes del polariscopio y el disco son paralelos, el término  $I_b$  se refiere a la desviación de luz o luz nula, y  $\delta$  es el parámetro que cuantifica el retraso en radianes, en cada punto de la geometría del modelo (ver (A & F, 1991)).

Así mismo, el método PS establece que, para determinar los parámetros isoclínicos ( $\theta_c$ ) e isocromático ( $\delta_c$ ), donde este último viene a ser el equivalente reconstruido del parámetro delta en la ecuación ( 7 ).

$$\theta_c = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left( \frac{I_5 - I_3}{I_4 - I_6} \right).$$

(9)

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

$$\delta_c = \tan^{-1} \left( \frac{(I_5 - I_3) \sin 2\theta + (I_4 - I_6) \cos 2\theta}{(I_1 - I_2)} \right).$$

( 10 )


Inicialmente, el cálculo del parámetro isocromático produce un mapa discontinuo o de retardo de fase envuelta, que se debe al uso de la función tangente en la ecuación ( 10 ). Para obtener un mapa de retardo de fase desenvuelta es necesario utilizar una técnica de desenvolvimiento de fase.

Durante la evaluación del campo de esfuerzos en estudios experimentales de fotoelasticidad, es necesario que los patrones de franja en las imágenes evaluadas tengan buena calidad. En caso contrario, pueden ocurrir errores al momento de evaluar el campo de esfuerzos. La forma de analizar la calidad de la información visual en los patrones de franja en este trabajo es mediante el análisis de la textura de los patrones de franja.

Cuando se utiliza el método PS, la evaluación del campo de esfuerzos implica el cálculo de seis imágenes, cuyas ecuaciones de intensidad se describen en la Tabla 1. No obstante, hay métodos (no considerados en este trabajo) donde se muestra que el campo de esfuerzos se puede aproximar mediante el proceso de las imágenes  $I_1$  e  $I_2$ ; y más aún, algunos trabajos indican que la imagen  $I_2$  se puede obtener a partir de la imagen  $I_1$ . Por esta razón, en este trabajo se evaluarán únicamente imágenes para la configuración óptica  $I_1$  de un montaje de PS.

#### d. ANÁLISIS DE TEXTURA

En el procesamiento digital de imágenes, el análisis de la textura permite obtener información cuantificable para representar las características que son, según el contexto, las más importantes en la imagen. Al hacer esto, es posible utilizar esta información para muchas aplicaciones. Una de ellas, puede ser una descripción cualitativa de la imagen. Ahora bien, otra más compleja consiste en el entrenamiento de clasificadores capaces de reconocer imágenes. En (Tian, 2013) y (Kumar & Sreekumar, 2014) se mencionan y

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22


describen de manera diferentes descriptores de textura, resaltando las fortalezas y debilidades de cada uno.

En este trabajo se considera la información de textura de IFFS. En estas imágenes se aprecian patrones de franjas que codifican información del campo de esfuerzos de un cuerpo bajo carga. El trabajo se hace bajo la hipótesis de que la información de textura, calculada a partir de la distribución espacial de las franjas y de la intensidad de los píxeles en las imágenes bajo inspección, puede tener valores que influyen en la capacidad para evaluar el campo de esfuerzos.

En (Ramesh, Kasimayan, & Neethi Simon, 2011), se menciona que los métodos para analizar la textura se pueden clasificar en: (1) métodos en el dominio del espacio y (2) métodos en el dominio de la frecuencia. En el segundo tipo, en vez de trabajarse con la imagen original, esta se transforma para obtener información que no es tan evidente en la versión original. Un ejemplo sucede con la aplicación de la transformada de Fourier a una imagen. Según (Ramesh, Kasimayan, & Neethi Simon, 2011), métodos como ese tienen un alto costo computacional y no son prometedores a largo plazo para obtener información del campo de esfuerzos. Por otro lado, los métodos del dominio en el espacio trabajan con los píxeles originales de la imagen.

Análisis de textura como los propuestos por Haralick (Haralick, Shanmugam, & Dinstein, 1973), o aquellos basados en histogramas, o descriptores como los mencionados en (Tian, 2013) y (Kumar & Sreekumar, 2014), están dentro de los métodos en el dominio del espacio. De hecho, este enfoque fue utilizado en (Fandiño Toro, Briñez De León, Restrepo Martínez, & W. Branch Bedoya, 2018), en donde se utilizó el contraste propuesto en (Haralick, Shanmugam, & Dinstein, 1973) para describir imágenes de foto elasticidad. Considerando los resultados de ese trabajo, en este caso de estudio se busca caracterizar las IFFS utilizando el contraste propuesto en (Haralick, Shanmugam, & Dinstein, 1973) a partir de una estructura basada en el correlograma de colores propuesto en (Huang, Kumar, Mitra, Zhu, & Zabih, 1999).



	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

### e. DISTANCIA

Para poder entender de forma objetiva lo que resta de este trabajo, es necesario definir lo que se va a entender por distancia. Sean  $p_1 = (f_1, c_1)$  y  $p_2 = (f_2, c_2)$  dos píxeles en una imagen ubicados en la fila  $f_1$  y la columna  $c_1$ , y en la fila  $f_2$  y la columna  $c_2$ , respectivamente, entonces, a lo largo de este documento se entiende que la distancia entre ellos es igual a:  $\max(|f_1 - f_2|, |c_1 - c_2|)$ . En la Figura 2, se muestra una imagen en escala de grises en la cual se resaltan en amarillo los píxeles que se encuentran a una distancia de 3 del píxel blanco señalado con un punto rojo:

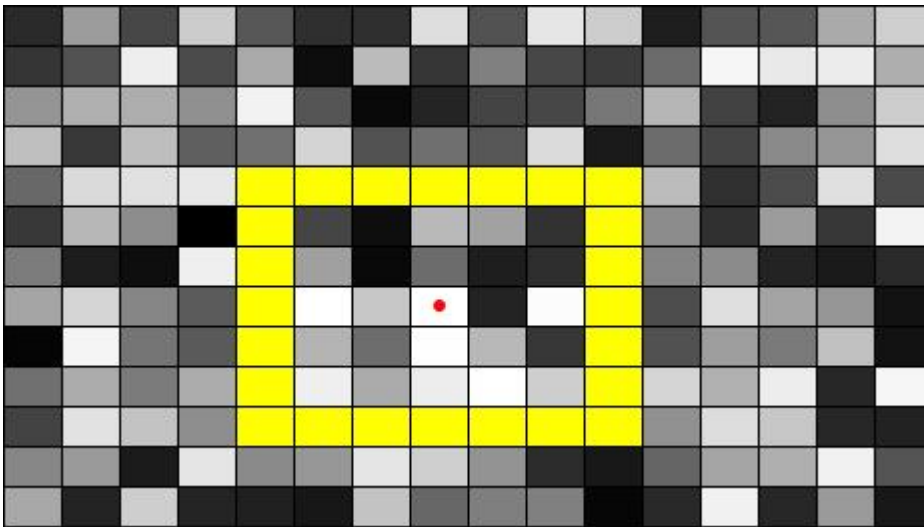



Figura 2. Píxeles posicionados a una distancia de 3 de un píxel blanco.

Esta distancia no es solo mencionada en (Huang, Kumar, Mitra, Zhu, & Zabih, 1999), sino también en (Haralick, Shanmugam, & Dinstein, 1973) como una distancia implícita en la definición de las matrices de co-ocurrencia (Sapiro & Haralick).

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## f. MATRIZ DE CO-OCURRENCIA

En (Saphiro & Haralick), se define una matriz de co-ocurrencia como aquella cuyo elemento en la fila  $i$  y la columna  $j$ , es una frecuencia relativa  $P_{ij}$  que cuenta las veces que hay dos píxeles vecinos, o separados por una distancia  $d$ , uno con un nivel de gris  $i$  y otro con un nivel de gris  $j$ . Adicionalmente, esta estructura se calcula a partir de una imagen para un ángulo  $a$  determinado, el cual delimita los píxeles vecinos que se tienen en cuenta al momento de calcular  $P_{ij}$ . Específicamente,  $a$  puede ser igual  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  o  $135^\circ$ , y, dependiendo de su valor, solo se toman los píxeles vecinos que intersecten con la dirección que fue asignada a  $a$ , tal y como se ilustra a continuación:

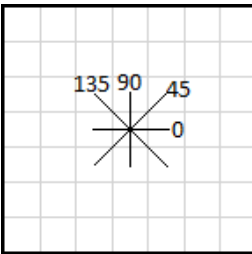



Figura 3. Posibles direcciones que puede tomar  $a$ .

Por ejemplo, la Figura 4 muestra una imagen y su correspondiente matriz de co-ocurrencia calculada para  $d = 1$  y  $a = 0^\circ$ . De esa manera, al momento de calcular los valores  $P_{ij}$  solo se tuvieron en cuenta los píxeles vecinos que estuvieran contiguos dentro de una misma fila:

		Imagen						Matriz de co-ocurrencia								
		1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	7	8	
1	6	7	6	1	7	5	0	0	0	1	0	1	1	0		
2	3	7	7	4	3	2	0	2	2	0	1	1	0	2		
3	8	2	3	8	5	2	0	2	0	1	0	3	1	2		
4	1	4	6	3	6	3	1	0	1	2	0	3	1	0		
5	4	4	6	5	8	7	0	1	0	0	0	1	1	2		
6	4	6	2	2	8	3	1	1	3	3	1	0	2	0		
7	1	0	1	1	1	2	2	1	1	0	1	1	1	2	2	1
8	0	2	2	0	2	0	1	0	0	2	2	0	2	0	1	0

Figura 4. Imagen de  $8 \times 8$  y su respectiva matriz de co-ocurrencia

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## g. CORRELOGRAMA DE COLORES

El correlograma de colores es un descriptor basado en las matrices de co-ocurrencia. Fue propuesto por Jing Huang y sus colegas en (Huang, Kumar, Mitra, Zhu, & Zabih, 1999), y da tanto información espacial como de la distribución de intensidades presentes en una imagen  $I$ . Esta estructura, puede verse como un arreglo  $\Gamma$  de  $\langle M \rangle \times \langle M \rangle \times \langle D \rangle$ , donde  $\langle M \rangle$  es el número de posibles intensidades  $M = \{1, 2, \dots, \langle M \rangle\}$  que puede tener un píxel en  $I$ , y  $\langle D \rangle$  es la cantidad de distancias en  $D = \{x | x \in \mathbb{Z}, x > 0\}$  para las cuales se midió la estructura. Así, por ejemplo, si se calcula  $\Gamma$  para una imagen en escala de grises, de 8 bits, para  $D = \{1, 2, 3, 5\}$ ,  $\Gamma$  sería un arreglo de  $256 \times 256 \times 4$ . En consecuencia, si  $D$  tiene un único elemento, el correlograma podría verse como una matriz de  $\langle M \rangle \times \langle M \rangle$ .


Para  $i, j = 1, 2, 3, \dots, \langle M \rangle$ , El elemento  $\Gamma[i, j, k]$ , es igual a la probabilidad de que un píxel, ubicado a una distancia  $k \in D$  de otro píxel de intensidad  $i$ , tenga una intensidad  $j$ .

## h. CONTRASTE

En (Fandiño Toro, Briñez De León, Restrepo Martinez, & W. Branch Bedoya, 2018) se mostró que el contraste es un descriptor adecuado para la clasificación de IFFS de acuerdo con la densidad de franjas presente en ellas. Así, en este trabajo, también, se caracterizan dichas imágenes con el contraste propuesto por Haralick (Haralick, Shanmugam, & Dinstein, 1973), pero utilizando una estructura diferente, aunque similar, a las matrices definidas en (Haralick, Shanmugam, & Dinstein, 1973). Originalmente, este contraste es calculado mediante la siguiente fórmula:

$$\text{contraste} = \sum_{n=0}^{\langle M \rangle - 1} n^2 * [\sum_{|i-j|=n} g(i, j)].$$

(11)

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22


Donde  $g(i, j)$  es el elemento en la fila  $i$  y la columna  $j$  de una matriz de coocurrencia normalizada  $g$ . Así, por ejemplo, si  $g$  fuera calculada para un ángulo de  $\alpha = 0$  grados, y una distancia de  $d = 1$ ,  $g(i, j)$  sería el porcentaje pares (no ordenados) de píxeles, uno con una intensidad de  $i$  y otro con una intensidad de  $j$ , que son contiguos dentro de una misma fila. Con esto en mente, puede pensarse en el contraste como en una suma ponderada en la cual se le da relevancia a los términos que involucran pares de píxeles con una diferencia de intensidades alta, ya que para ellos su peso de  $n^2$  es más grande.

### 3. METODOLOGÍA

---

En este trabajo, la matriz que se usa aquí para reemplazar a  $g$  en el cálculo del contraste es un arreglo  $\tau_k$  de  $\langle M \rangle \times \langle M \rangle$  normalizado tal que, para  $i, j = 1, 2, 3, \dots, \langle M \rangle$ ,  $\tau_k[i, j]$  es igual al total de veces que hay píxeles de intensidad  $j$  a una distancia  $k$  de uno de intensidad  $i$  dentro de una imagen. Se denota a la matriz  $\tau_k$  normalizada por  $\tau'_k$ . Así,  $\tau'_k[i, j]$  es igual al porcentaje de ocurrencias de pares de píxeles, distanciados por  $k$ , en los cuales uno de ellos tiene intensidad  $i$ , y la otra intensidad  $j$ . En este caso, no importa si es el primer o segundo píxel del par el que tiene intensidad  $i$  o  $j$ , ya que  $\tau_k$  es simétrica. Esto se debe a que es posible expresar a  $\tau_k$  como la suma de varias de las matrices definidas en (Haralick, Shanmugam, & Dinstein, 1973), las cuales son simétricas.

Si se calcula el contraste utilizando a  $\tau'_k$ , se obtendría una suma ponderada en la cual son más relevantes los términos que involucran intensidades muy diferentes, por lo que se estaría obteniendo un valor adecuado para medir el contraste. De hecho, al hacer esto se estaría midiendo el contraste en todas las direcciones. No fue sino hasta el final del experimento que se notó que, al utilizar a  $\tau'_k$ , se obtiene un valor del contraste casi idéntico al del promedio de contrastes obtenidos a partir de varias matrices de coocurrencia (una por cada dirección posible, y todas calculadas para la misma distancia  $k$ ). Esta similitud puede comprenderse al analizar la ecuación ( 11 ).

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## a. MATERIALES Y MÉTODOS


### i. GENERACIÓN DE IMÁGENES DE FRANJAS DE FOTOELASTICIDAD SIMULADA

A lo largo de este documento, se muestran los experimentos realizados sobre un conjunto de IFFS que, como lo indica su nombre, fueron generadas por medio de código. Estas imágenes muestran patrones de franjas para el experimento simulado donde un disco de polimetilmetacrilato (PMMA) es sometido a compresión diametral. Las especificaciones del disco y del experimento simulado están dados en la Tabla 2.

*Tabla 2. Condiciones bajo las cuales se llevó a cabo el experimento*

Condición	Valor
Materia	Polimetilmetacrilato (PMMA)
Carga	700, 1400 y 2800 Newtons.
Espesor	10 milímetros
Iluminación	Fluorescente, incandescente y láser.

Para generar las IFFS, se necesitaron las ecuaciones utilizadas en (Fandiño Toro, Briñez De León, Restrepo Martinez, & W. Branch Bedoya, 2018, pág. 2). Ya que las imágenes son generadas computacionalmente, no se consideran aspectos técnicos o factores externos que afecten la realización del experimento en la realidad. Estas imágenes muestran los patrones de franja que se obtienen al simular la aplicación de carga por compresión diametral a un disco birrefringente, tal y como sugiere la Figura 5.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

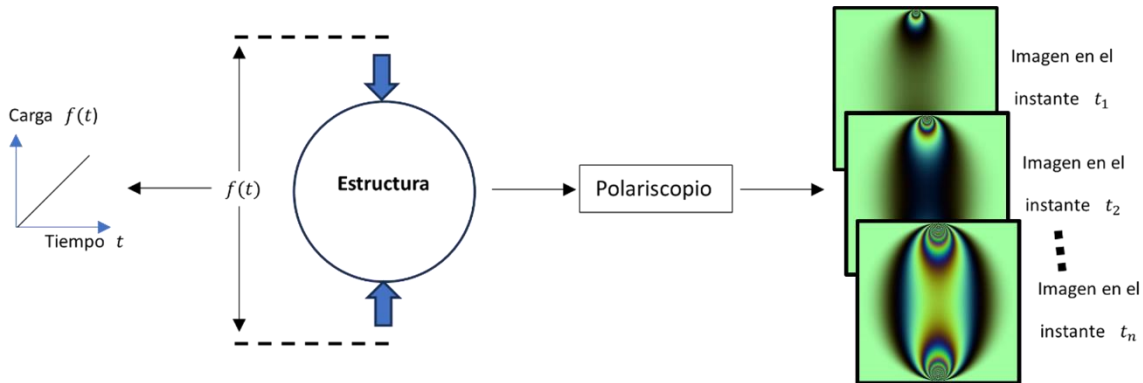


Figura 5. Imágenes con patrones de franja de diferente densidad, como resultado de considerar una carga incremental aplicada a una estructura birrefringente. Basada en (Jaiber Acevedo, Briñez de León, & Fandiño Toro, 2022).

La información visual de los patrones de franja, además de depender de la carga aplicada al disco, también varía según las características espectrales de la fuente de iluminación del polariscopio, y de la respuesta espectral de la cámara considerada. En este trabajo se consideraron tres fuentes de iluminación: fluorescente, incandescente y láser, y un único sensor. En la Figura 6 se muestran la respuesta espectral del sensor y el espectro de emisión de las fuentes luminicas incandescente, fluorescente y láser.

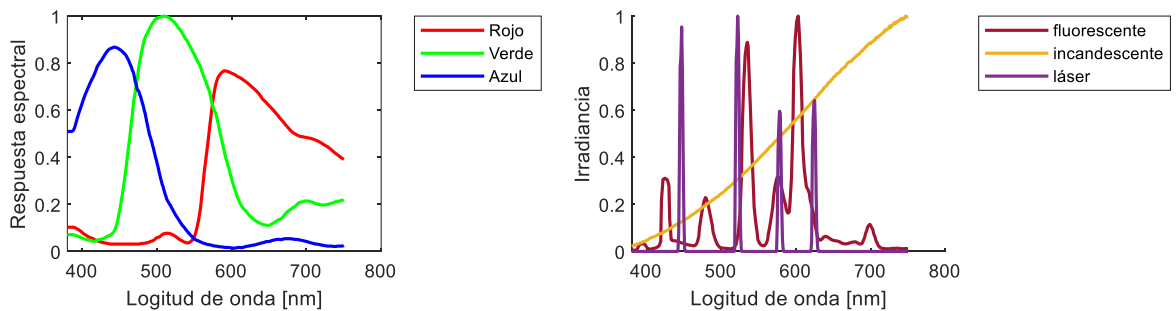



Figura 6. Respuesta espectral del sensor DCC3260C y espectro de emisión de las fuentes luminicas incandescente, fluorescente y láser. Basada en (Jaiber Acevedo, Briñez de León, & Fandiño Toro, 2022).

Así, se generaron nueve imágenes de  $513 \times 513$ , una por cada posible combinación de iluminación y carga. Por ejemplo, la Figura 7 muestra tres imagenes capturadas, cada una, con una de las tres fuentes de iluminación utilizadas. En este caso, la carga aplicada al disco es de 2800 Newtons. En esta figura, por cada imagen, se ven los patrones de franja cuya densidad aumenta a medida que se acercan a los puntos de aplicación de carga, los cuales están ubicados en los extremos superior e inferior del disco.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

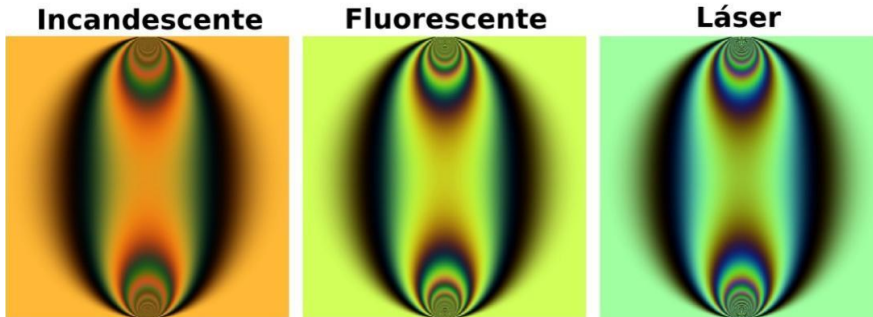



Figura 7. Imágenes capturadas con fuentes de iluminación incandescente, fluorescente y láser, que muestran patrones de franja correspondientes a los campos de esfuerzo de un disco sometido a una carga de 2800 Newton.

Las imágenes de la Figura 7, así como el resto, fueron generadas utilizando códigos programados en Matlab. La versión utilizada para este trabajo fue la 2022b.

## ii. ZONAS DE REFERENCIA CON DISTINTOS NIVELES DE DENSIDAD DE FRANJAS

Para tener zonas con distintos niveles de densidad de franja, se hizo un experimento adicional al descrito en la Subsección anterior, esta vez aplicando una carga de 3600 Newtons. A continuación, se identificaron zonas del disco donde la diferencia de los esfuerzos principales sean fracciones del límite elástico del PMMA, cuyo valor es aproximadamente 70 MPa (Mega Pascales). Estas zonas se pueden detectar a partir de la imagen que obtiene de la Ecuación ( 8 ). Las zonas identificadas se muestran con diferentes colores en la Figura 8. En las IFFS, se espera que la densidad de franjas (y por lo tanto el contraste) cambie según la diferencia de esfuerzos presente en cada zonas.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

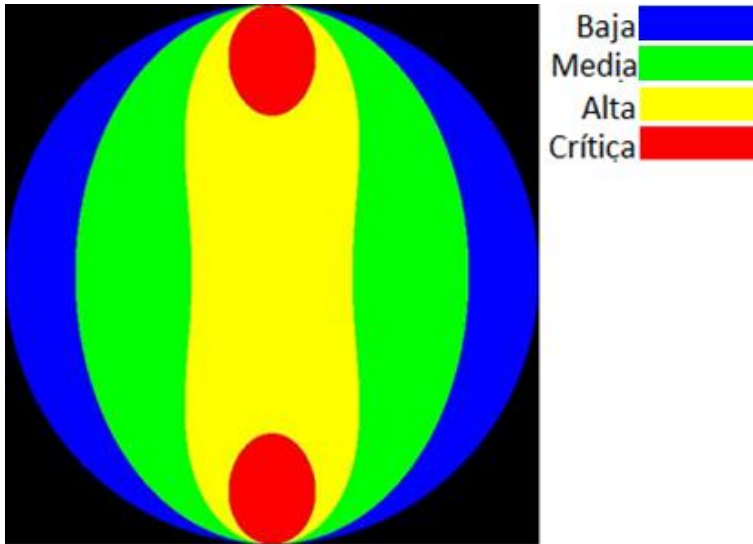


Figura 8. Segmentación según las diferencias de esfuerzos presentes en el disco.

Como se puede ver, hay cuatro zonas segmentadas:

- Crítica: Para cuando la diferencia de esfuerzos es superior al 80% del límite elástico del PMMA (70 MPa).
- Alta: Para cuando la diferencia de esfuerzos esta entre el 40% y el 80% del límite elástico del PMMA (entre 28 MPa y 70 MPa).
- Media: Para cuando la diferencia de esfuerzos esta entre el 10% y el 40% del límite elástico del PMMA (entre 10 MPa y 28 MPa).
- Baja: Para cuando la diferencia de esfuerzos es inferior al 10% del límite elástico del PMMA (10 MPa).

Para realizar el resultado de esta segmentación, se utilizó un enmascaramiento a cada una de las zonas. En la Figura 8 y la Figura 9 se muestran los resultados de este enmascaramiento.

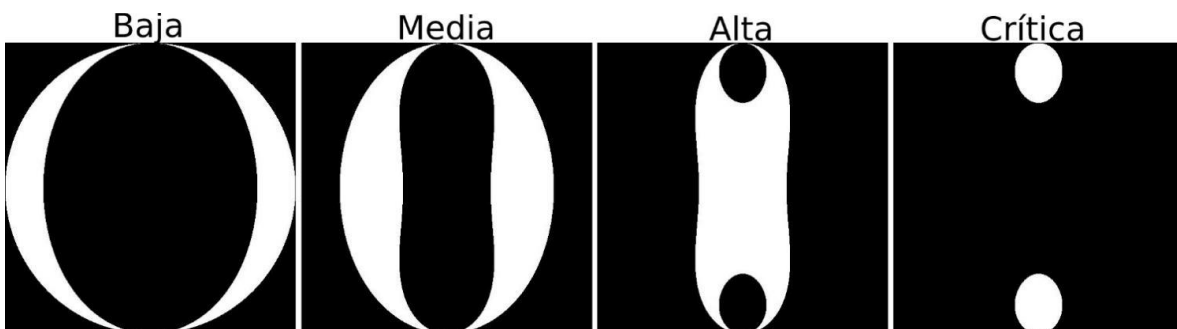



Figura 9. Máscaras utilizadas para realizar la segmentación según las diferencias de esfuerzos presentes en el disco.



	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

En la Figura 9 puede observarse la simetría que tienen la IFFS. Específicamente, lo que hay en la mitad superior es igual a lo que hay en la inferior. Por este motivo, a cada imagen se le quitó su mitad inferior para evitar procesamiento innecesario. Así, la manera en que finalmente fueron segmentadas las imágenes sería como se ve en la Figura 10.



Figura 10. Máscaras utilizadas para realizar la segmentación según las diferencias de esfuerzos presentes en el disco.

Otro aspecto para tener en cuenta es que la segmentación realizada resulta en cuatro zonas que no son cuadradas. Este resultado es relevante, ya que originalmente el contraste propuesto por Haralick (Haralick, Shanmugam, & Dinstein, 1973) fue pensado para aplicarse sobre imágenes cuadradas. Así, se calculó para cada máscara de la Figura 10 el cuadrado más pequeño posible que contuviera la zona de interés; luego, se extrajeron estos cuatro cuadrados a cada una de las imágenes. La siguiente figura muestra el resultado de realizar dicha extracción sobre la imagen que le corresponde una fuente de iluminación láser de la Figura 7:

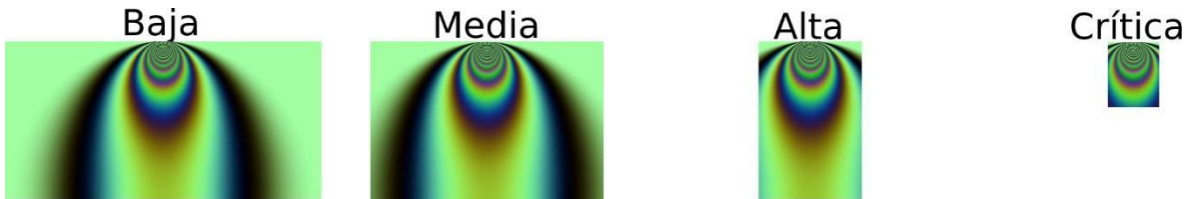



Figura 11. ROIs cuadradas de la imagen, configurada con una fuente de iluminación láser, de la Figura 7 extraídas según las diferencias de esfuerzos presentes en ella.

Esta extracción se hizo por cada una de las nueve imágenes, lo que resultó en treinta y seis ROIs cuadradas en total. Habiendo hecho eso, se calculó el contraste con la ecuación ( 11 ) para cada una de las ROIs, utilizando tanto matrices de coocurrencia como a  $\tau'_1$  (ver sección de RESULTADOS Y DISCUSIÓN y el APÉNDICE B).


	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Para el cálculo de las matrices de coocurrencia se utilizó la función **graycomatrix.m** de Matlab, mientras que  $\tau'_1$  se obtuvo a partir de un código realizado para este trabajo. El contraste fue obtenido de la función **graycoprops.m**, a la cual se le da como parámetro las matrices a partir de las cuales se va a calcular el contraste (las de coocurrencia y  $\tau'_1$ ).

Se calcularon cuatro matrices de coocurrencia por cada región de interés (ROI) evaluada, una por cada posible ángulo (0, 45, 90 y 135 grados) y, luego, se promediaron los contrastes obtenidos de cada una de ellas. Es importante aclarar que cada matriz fue calculada con el parámetro **symmetric = true**, de manera que se trabajó con las matrices propuestas en (Haralick, Shanmugam, & Dinstein, 1973) por Haralick. En cuanto al contraste calculado a partir de  $\tau'_1$ , este se obtuvo simplemente dándole  $\tau'_1$  como parámetro a **graycoprops.m**.

Calcular el contraste para estas ROIs cuadradas podría producir (y produjo) medidas del contraste que no son convenientes para este experimento, ya que lo que se desea es que este sea una medida representativa de los esfuerzos que se aplican sobre el disco y, por lo tanto, de cada tipo de zona (baja, media, alta y crítica). Esta inconveniencia podría darse debido a que estas ROI contienen información sobrante, como fondo. Además, por ejemplo, como se aprecia en la Figura 11, la ROI que contiene la zona baja contiene a su vez a la zona crítica, lo cual puede resultar en un valor del contraste más alto de lo que debería. Así, se realizó nuevamente el cálculo del contraste para ROIs más adecuadas.

Esto último es un problema, ya que la zona crítica, tal y como se ve en la Figura 10, no debe estar incluida en la máscara correspondiente a la zona baja. Así, la zona crítica, en este caso, puede interpretarse como parte del fondo de la ROI de la zona baja en la Figura 11. Similarmente, sucede lo mismo con el resto de las ROI, así que, para cada una de ellas, se omitió lo que se consideró fondo. Esto se hizo al asignar, por cada canal de color, cierta intensidad  $m$  a los píxeles de cada ROI que se consideraba que hicieran parte del fondo. Tal intensidad, para una ROI de una imagen  $I$  con intensidades  $M = \{1, 2, \dots, \langle M \rangle\}$ , el valor de  $m$  debe ser tal que  $m \notin M$ .

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Así, por cada ROI, se escogió y asignó una intensidad  $m = -1$  a los píxeles del fondo. El resultado de realizar este procesamiento se muestra en la Figura 12. Las zonas de color sólido son aquellas donde la intensidad de píxel es  $-1$ .



Figura 12. ROIs sin fondo de la imagen de la de la Figura 7 configurada con una fuente de iluminación láser.


Habiendo hecho eso, se calcularon las matrices de co-ocurrencia y se omitió, de cada una de ellas, todas las coocurrencias que involucran píxeles de intensidad  $-1$ . Luego, se calculó  $\tau'_1$  con el código de matlab antes mencionado, al cual se le puede especificar la intensidad que debe ser ignorada. Finalmente, se calculó el contraste utilizando **graycoprops.m**, tal y como se hizo en el caso anterior. Los contrastes obtenidos se pueden ver en la sección de RESULTADOS Y DISCUSIÓN y el APÉNDICE B.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

---

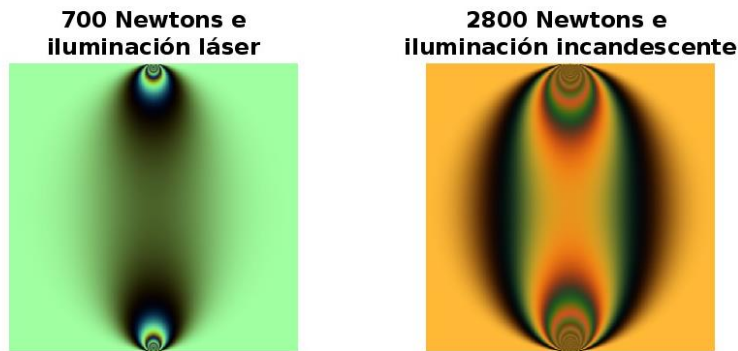
En esta sección se presentan tablas que muestran el contraste calculado, por cada canal de color y cada ROI obtenida, para dos imágenes resultantes de dos configuraciones carga – fuente de iluminación. La combinación que incluye la fuente láser produjo una imagen con alto contraste, mientras que la combinación que incluye la fuente incandescente produjo una imagen con bajo contraste. Por otro lado, en el apéndice B se listan todos los contrastes calculados.

Se entiende que la métrica de contraste muestra un buen desempeño en la medida en que se obtienen valores diferentes en diferentes regiones evaluadas (de densidad de franjas baja, media, alta, o crítica). Además, en consecuencia, se dice que tiene un peor desempeño

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

en la medida que muestra más incapacidad de diferenciar las cuatro zonas para las que fue calculado.

En la configuración en la que se consideró se obtuvo un buen desempeño se tuvo una carga de 700 Newtons y una iluminación láser. En cuanto a la configuración en la que se obtuvo un mal desempeño, se tuvo una carga de 2800 Newtons e iluminación incandescente. Las imágenes a las que les corresponden estas dos configuraciones se muestran a continuación:




*Figura 13. Imágenes correspondientes a las configuraciones de carga e iluminación para las cuales el contraste mostró un buen y un mal desempeño.*

Algo que vale la pena mencionar es que, generalmente, se observaron los peores desempeños de contraste para la iluminación incandescente, y los mejores para la láser.

Los contrastes calculados para las dos configuraciones se muestran en la Tabla 3, la Tabla 4 y la Tabla 5. Cada una de ellas se divide verticalmente en partes: una por cada tipo de fuente de iluminación y carga. A su vez, en cada parte, una celda indica el valor del contraste que se calculó para el canal de color que indica la fila, y para la zona que indica la columna. Las tablas del apéndice B se interpretan de la misma manera.

Así, en la Tabla 3, se muestran los contrastes calculados a partir de  $\tau'_1$ , y sobre ROIS cuadradas. Es decir, ROIS donde el fondo fue tenido en cuenta. Por otro lado, en la Tabla 4, los contrastes fueron calculados para ROIS arbitrarias a partir de  $\tau'_1$ . Al comparar de las dos tablas, puede observarse que los valores de contraste son mejores en la Tabla 4. Esto es porque, aunque estos sean más bajos, la capacidad discriminativa entre zonas con diferente concentración de esfuerzos mejora.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Finalmente, en la Tabla 5, se registra lo mismo que en la Tabla 4, sin embargo, en vez de calcular el contraste a partir de  $\tau'_1$ , se calcula a partir de matrices de co-ocurrencia. Específicamente, se calcularon cuatro matrices de co-ocurrencia para una misma distancia  $d = 1$ , una por cada posible ángulo que puede tomar  $\alpha$ .

Al comparar la Tabla 4 y la Tabla 5, es evidente que calcular el contraste utilizando ya sea matrices de coocurrencia o a  $\tau'_1$  no hace mucha diferencia. Como ya se dijo, esto puede comprenderse al analizar la ecuación ( 11 ).

En cuanto a las tablas del APÉNDICE B, se aprecia que:

- Los valores de contraste medido para ROIs arbitrarias son, en general, mucho menores respecto a los calculados para ROIs cuadradas. Esto último tiene sentido ya que, como mínimo, una segmentación cuadrada implica la inclusión de la zona crítica en cada ROI, lo que causa un incremento en el valor de contraste.
- Para una misma configuración de carga e iluminación, el contraste aumenta a medida que cambia la zona (de baja a crítica) para la cual se calculó.
- El contraste muestra un mal desempeño para las zonas medias y altas. De hecho, se dan varios casos en los cuales el contraste para la zona media es más alto que el de la zona alta.
- El contraste suele aumentar a medida que lo hace la carga aplicada.



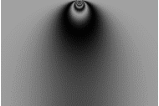


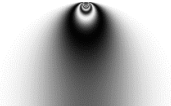
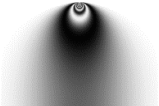


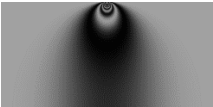
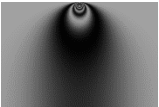


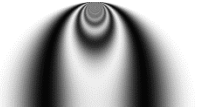
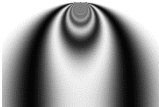


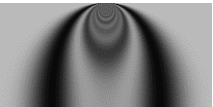
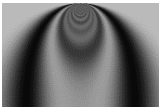
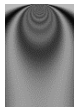





 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Tabla 3. Contrastes calculados por cada ROI cuadrada, por cada canal de color, utilizando a  $\tau_1'$ .

Carga de 700 newtons e iluminación láser				
	Baja	Media	Alta	Crítica
Rojo	 10.7848	 16.0845	 32.6469	 153.4363
Verde	 29.3734	 44.5904	 88.9811	 417.7788
Azul	 16.3688	 24.331	 49.4603	 234.1934
Carga de 2800 newtons e iluminación incandescente				
	Baja	Media	Alta	Crítica
Rojo	 45.3485	 66.8536	 127.2483	 473.1359
Verde	 17.3867	 26.4065	 45.5314	 157.2441
Azul	 1.7544	 2.6007	 4.3689	 14.9497


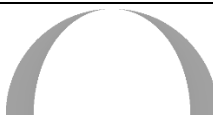
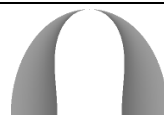






















 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Tabla 4. Contrastes calculados por cada ROI, obtenida de una segmentación arbitraria, por cada canal de color, utilizando a  $\tau_1$ .

Carga de 700 newtons e iluminación láser				
	Baja	Media	Alta	Crítica
Rojo	 0.0802	 1.4380	 3.9463	 161.1271
Verde	 0.1395	 4.6395	 10.1373	 437.3559
Azul	 0.1278	 2.9008	 3.6906	 254.1124
Carga de 2800 newtons e iluminación incandescente				
	Baja	Media	Alta	Crítica
Rojo	 7.2613	 32.7694	 48.9554	 208.041
Verde	 5.6929	 20.0908	 12.5867	 39.8743
Azul	 0.9096	 2.1363	 1.1297	 5.5754



























 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Tabla 5. Contrastes calculados por cada ROI, obtenida de una segmentación arbitraria, por cada canal de color, utilizando matrices de coocurrencia.

Carga de 700 newtons e iluminación láser				
	Baja	Media	Alta	Crítica
Rojo	 0.0802	 1.4392	 3.9496	 161.2314
Verde	 0.1396	 4.6434	 10.1461	 437.6341
Azul	 0.1279	 2.9032	 3.6938	 254.2460
Carga de 2800 newtons e iluminación incandescente				
	Baja	Media	Alta	Crítica
Rojo	 7.2697	 32.7983	 48.9972	 208.1997
Verde	 5.6994	 20.1090	 12.5973	 39.9041
Azul	 0.9105	 2.1382	 1.1307	 5.5796



	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## 5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO


---

En este trabajo, se calculó, utilizando diferentes enfoques, el contraste sobre regiones de imágenes de fotoelasticidad generadas computacionalmente. En general, los resultados sugieren que esta métrica tiene la capacidad de discriminar en entre las cuatro zonas consideradas: baja, media, alta y crítica. Aunque los valores obtenidos parecen ser buenos, el calcularlos mediante la estructura basada en el correlograma de colores no da resultados muy diferentes a los obtenidos con el enfoque de promediar contrastes ya sugerido en (Haralick, Shanmugam, & Dinstein, 1973), donde se utilizan matrices de co-ocurrencia (Sapiro & Haralick). A pesar de esto, tal y como se explica en más detalle en la siguiente sección, cierto resultado sugiere que utilizar el enfoque en el que se usa el correlograma de colores es más eficiente computacionalmente. Esto es cierto siempre y cuando la estructura se calcule para  $d = 1$  y sumando varias matrices de co-ocurrencia.

Como resultado del trabajo, quedan a disposición del grupo de máquinas inteligentes y reconocimiento de patrones, códigos, experimentos o líneas de trabajo nuevas, con las cuales se puede avanzar hacia el desarrollo de nuevas formas de evaluar el campo de esfuerzos.

### a. TRABAJO FUTURO

Al final del Apéndice A, se habla del auto-correlograma y el posible potencial que tiene para dar información sobre la homogeneidad de la imagen. Así, podría ser interesante como se comportaría tal métrica en las diferentes ROI calculadas en este trabajo. Aunque, viendo cómo se comportó el contraste, sería lógico esperar que el valor de esta métrica disminuyera a medida que se cambie de zona, desde la baja a la crítica.


	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Como se mencionó en la sección de metodología,  $\tau_k$  puede expresarse como la suma de múltiples matrices de co-ocurrencia (Saphiro & Haralick). Así, considerando la gran similitud en los contrastes de la Tabla 7 y la Tabla 8, es de interés saber si es más rápido:

- Calcular el promedio de los contrastes obtenidos de varias matrices de co-ocurrencia (tal y como se propone en (Haralick, Shanmugam, & Distein, 1973)).
- O, calcular el contraste obtenido de una estructura  $\tau_1$  obtenida al sumar varias matrices de co-ocurrencia.

De hecho, se utilizaron los dos métodos antes mencionados para calcular los contrastes de 108 imágenes monocromáticas, una por cada posible combinación de las 4 zonas, 3 iluminaciones, 3 cargas y 3 canales de color con los que se trabajó. El resultado fue que casi el 95% de las veces fue más rápido utilizar el procedimiento en el que se calcula  $\tau_1$  a partir de matrices de co-ocurrencia. Por lo tanto, para los respectivos algoritmos correspondientes a los dos procedimientos, sería pertinente comparar los contadores de frecuencia y ordenes de magnitud. De esa manera, sería posible sacar conclusiones formalmente.


En conclusión, teniendo en cuenta lo anterior, se podría cuestionar que tan buena alternativa es realmente el promediar los contrastes.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## REFERENCIAS

---

- A, P., & F, W. (1991). Towards full field automated photoelastic analysis of complex components . *Strain*, 27(2), 49-53.
- Anguiano-Morales, M., Noé Arias, E., Garnica, G., & Martínez, A. (2014). Image fusion by color texture extraction. *Optik*, 125, 810-812.
- Batista da Cruz, L., Carvalho Souzaa, J., Alves de Sousaa, J., Martins Santos, A., Cardoso de Paivaa, A., Dallyson Sousa de Almeidaa, J., . . . Gattass, M. (2020). Interferometer eye image classification for dry eye categorization. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 188(105269).
- Fandiño Toro, H., Briñez De León, J., Restrepo Martinez, A., & W. Branch Bedoya, J. (2018). Fringe patterns recognition in digital photoelasticity images using texture features and multispectral wavelength analysis. *Optical Engineering*, 57(093105).
- Ghiglia, D. C., & Romero, L. A. (1994). Robust two-dimensional weighted and unweighted phase unwrapping that uses fast transforms and iterative methods. *Journal of the Optical Society of America A*, 11(1), 107-117.
- Guo, H., & Huang, P. (2010). Face recognition based on fringe pattern analysis. *Optical Engineering*, 49(037201).
- Haralick, R., Shanmugam, & Distein, I. (1973). Textural features for image classification. *IEEE Transactions on systems, man and cybernetics*, SMC-3(6).
- Hariprasad, M., Ramesh, K., & Prabhune, B. (2018). Evaluation of Conformal and Non-Conformal Contact Parameters Using. *Experimental Mechanics* , 58, 1249-1263.
- Huang, J., Kumar, R., Mitra, M., Zhu, W.-J., & Zabih, R. (1999). Spatial Color Indexing and Applications. *International Journal of Computer Vision*, 35, 245–268.
- Jaiber Acevedo, P., Briñez de León, J., & Fandiño Toro, H. (2022). Computational analysis for evaluating the dynamic behavior of birefringent samples in digital photoelasticity. *ÓPTICA PURA Y APLICADA*, 55 (1).
- Kemao, Q. (2015). Applications of windowed Fourier fringe analysis in optical measurement: A review. *Optics and Lasers in Engineering*, 66, 67-73.
- Kumar, R., & Sreekumar. (2014). A Survey on Image Feature Descriptors. *International Journal of Computer Science and Information Technologies*., 5(6).

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

- Prasath, R. G., Skenes, K., & Danyluk, S. (2013). Comparison of Phase Shifting Techniques for Measuring In-Plane Residual Stress in Thin, Flat Silicon Wafers. *Journal of ELECTRONIC MATERIALS*, 42(8).
- Ramesh, K., Kasimayan, T., & Neethi Simon, B. (2011). Digital photoelasticity – A comprehensive review. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 46(4), 245-266.
- Saphiro, L., & Haralick, R. (s.f.). *Computer and robot vision: volume 1*.
- Servin, M., Quiroga, A., & Padilla, M. (2014). *Fringe pattern analysis for optical metrology: Theory, algorithms and applications*. Willey vch.
- Tian, D. p. (2013). A Review on Image Feature Extraction and Representation Techniques. *International Journal of Multimedia and Ubiquitous Engineering*, 8(4).
- Wang, Z., Ma, J., & Vo, M. (2012). Recent progress in two-dimensional continuous wavelet transform technique for fringe pattern analysis. *Optics and Lasers in Engineering*, 50, 1052-1058.
- Zuo, h., Feng, S., Huang, L., Tao, T., Yin, W., & Chen, Q. (2018). Phase shifting algorithms for fringe projection profilometry: A review. *Optics and Lasers in Engineering*, 109, 23-59.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## APÉNDICE A

---

Inicialmente, en la fórmula de contraste, se pensó en utilizar directamente el correlograma (calculado para una sola distancia) como sustituto de las matrices de coocurrencia. Esto último no se hizo, ya que tal cosa no tiene sentido. Para entender porque, es conveniente observar la imagen en escala de grises de la Figura 14. En ella hay únicamente dos píxeles negros, y solo hay píxeles blancos ubicados a una de distancia 1 de cada uno de ellos. Así, si la intensidad mínima es igual a 1, y la máxima igual a 8, entonces,  $\Gamma[1,8,1] = 1$ , lo cual es el máximo valor que puede tener un elemento de  $\Gamma$ . De hecho, calculando el contraste utilizando a  $\Gamma$ , el término aportado por  $\Gamma[1,8,1]$  sería exactamente igual a  $(8 - 1)^2 * 1$ . Es importante aclarar que, para este ejemplo, tal valor sería el mayor que se le podría dar a un término de la suma y, por lo tanto, habría un sesgo muy claro e inconveniente.

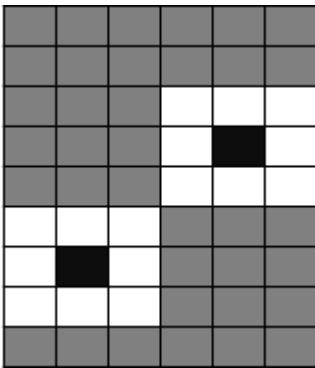



Figura 14. Imagen en escala de grises.

Este último problema mencionado, muy posiblemente, no aplica si se trabaja con la diagonal principal del correlograma del ejemplo. De hecho, se podrían tomar las diagonales principales de varios correlogramas calculados, cada uno, para una sola y única distancia y, luego, armar una matriz con ellas. Tal matriz, ya definida en (Huang, Kumar, Mitra, Zhu, & Zabih, 1999), es llamada auto-correlograma. Esta estructura de por sí podría dar


 Institución Universitaria	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

información sobre la homogeneidad de la imagen, sin embargo, eso no se estudia en este trabajo.

## APÉNDICE B

Tabla 6. Todos los contrastes calculados por cada ROI cuadrada, por cada canal de color, utilizando a  $\tau_1'$ .

Carga de 700 newtons e iluminación incandescente				
	Baja	Media	Alta	Crítica
Rojo	19.1726	29.9416	58.1738	271.4484
Verde	7.0219	11.7315	20.9786	93.3403
Azul	0.77237	1.2549	2.1845	9.2658
Carga de 700 newtons e iluminación fluorescente				
	Baja	Media	Alta	Crítica
Rojo	20.3776	30.4008	61.9203	293.2428
Verde	23.4244	36.2635	70.7999	328.5666
Azul	2.7366	4.309	8.0415	36.1455
Carga de 700 newtons e iluminación láser				
	Baja	Media	Alta	Crítica
Rojo	10.7848	16.0845	32.6469	153.4363
Verde	29.3734	44.5904	88.9811	417.7788
Azul	16.3688	24.331	49.4603	234.1934
Carga de 1400 newtons e iluminación incandescente				
	Baja	Media	Alta	Crítica
Rojo	29.2988	44.983	85.8282	385.757
Verde	11.1827	17.7647	31.6487	131.3286
Azul	1.1655	1.8034	3.1198	12.2235

 Institución Universitaria	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Carga de 1400 newtons e iluminación fluorescente				
	Baja	Media	Alta	Crítica
Rojo	37.9514	55.363	113.1598	526.5821
Verde	37.6835	56.3133	110.1255	483.6344
Azul	4.4368	6.6563	12.6359	52.2205
Carga de 1400 newtons e iluminación láser				
	Baja	Media	Alta	Crítica
Rojo	19.3323	28.6341	57.2655	263.0871
Verde	54.6755	79.6571	162.0653	736.0936
Azul	33.0317	47.0475	98.5669	453.1098
Carga de 2800 newtons e iluminación incandescente				
	Baja	Media	Alta	Crítica
Rojo	45.3485	66.8536	127.2483	473.1359
Verde	17.3867	26.4065	45.5314	157.2441
Azul	1.7544	2.6007	4.3689	14.9497
Carga de 2800 newtons e iluminación fluorescente				
	Baja	Media	Alta	Crítica
Rojo	65.9571	93.4117	192.1997	821.7246
Verde	65.3239	94.7722	182.0739	706.475
Azul	7.6636	11.0922	20.5346	74.0641
Carga de 2800 newtons e iluminación láser				
	Baja	Media	Alta	Crítica
Rojo	33.2336	47.3805	95.758	400.5281
Verde	102.6764	145.0941	295.509	1248.3841
Azul	68.0379	94.4634	198.9967	868.0559



 Institución Universitaria	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Tabla 7. Todos los contrastes calculados por cada ROI, obtenida de una segmentación arbitraria, por cada canal de color, utilizando matrices de coocurrencia y a  $\tau'_1$ .

Carga de 700 newtons e iluminación incandescente				
	Baja	Media	Alta	Crítica
Rojo	0.08214	2.4676	8.7199	267.5715
Verde	0.1013	1.9508	4.9653	76.6016
Azul	0.038459	0.38384	0.53713	7.765
Carga de 700 newtons e iluminación fluorescente				
	Baja	Media	Alta	Crítica
Rojo	0.083253	2.2093	6.6115	314.3949
Verde	0.1317	4.3157	10.0352	327.394
Azul	0.060942	1.0076	1.2358	33.2181
Carga de 700 newtons e iluminación láser				
	Baja	Media	Alta	Crítica
Rojo	0.080181	1.438	3.9463	161.1271
Verde	0.13947	4.6395	10.1373	437.3559
Azul	0.12784	2.9008	3.6906	254.1124
Carga de 1400 newtons e iluminación incandescente				
	Baja	Media	Alta	Crítica
Rojo	0.64512	17.4584	9.1329	292.3688
Verde	0.57527	10.8161	8.1137	62.5212
Azul	0.1536	1.2361	1.1601	6.48
Carga de 1400 newtons e iluminación fluorescente				
	Baja	Media	Alta	Crítica
Rojo	0.61495	13.8638	10.4118	507.6059
Verde	1.1518	23.0577	24.2505	368.4814
Azul	0.35398	3.3039	4.2682	34.9537




 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22


Carga de 1400 newtons e iluminación láser				
	Baja	Media	Alta	Crítica
Rojo	0.43441	8.2898	6.6454	240.8067
Verde	1.2454	23.8038	27.4152	677.6472
Azul	0.891	10.5536	15.4267	460.0828
Carga de 2800 newtons e iluminación incandescente				
	Baja	Media	Alta	Crítica
Rojo	7.2613	32.7694	48.9554	208.041
Verde	5.6929	20.0908	12.5867	39.8743
Azul	0.90958	2.1363	1.1297	5.5754
Carga de 2800 newtons e iluminación fluorescente				
	Baja	Media	Alta	Crítica
Rojo	6.5159	27.4675	40.634	716.2223
Verde	13.0467	49.5476	51.1791	413.4747
Azul	2.7795	7.2676	6.878	40.2153
Carga de 2800 newtons e iluminación láser				
	Baja	Media	Alta	Crítica
Rojo	4.0721	16.5144	21.694	324.1589
Verde	14.0808	53.1785	59.5837	1050.3731
Azul	8.7798	25.8801	37.0216	861.5208

Tabla 8. Contrastes calculados por cada ROI, obtenida de una segmentación arbitraria, por cada canal de color, utilizando matrices de coocurrencia.


Carga de 700 newtons e iluminación incandescente				
	Baja	Media	Alta	Crítica
Rojo	0.082204	2.4697	8.7274	267.7591
Verde	0.10138	1.9524	4.9695	76.6572

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO		Código	FDE 089
			Versión	03
			Fecha	2015-01-22

Azul	0.038487	0.38419	0.53759	7.7708
Carga de 700 newtons e iluminación fluorescente				
	Baja	Media	Alta	Crítica
Rojo	0.083317	2.2112	6.6172	314.5868
Verde	0.1318	4.3194	10.0438	327.6429
Azul	0.060988	1.0085	1.2368	33.2422
Carga de 700 newtons e iluminación láser				
	Baja	Media	Alta	Crítica
Rojo	0.080241	1.4392	3.9496	161.2314
Verde	0.13959	4.6434	10.1461	437.6341
Azul	0.12794	2.9032	3.6938	254.246
Carga de 1400 newtons e iluminación incandescente				
	Baja	Media	Alta	Crítica
Rojo	0.64577	17.4728	9.1408	292.5824
Verde	0.57583	10.825	8.1206	62.5691
Azul	0.15373	1.2371	1.161	6.485
Carga de 1400 newtons e iluminación fluorescente				
	Baja	Media	Alta	Crítica
Rojo	0.61557	13.8752	10.4206	507.9378
Verde	1.153	23.0764	24.271	368.7358
Azul	0.35431	3.3065	4.2718	34.9732
Carga de 1400 newtons e iluminación láser				
	Baja	Media	Alta	Crítica
Rojo	0.43482	8.2966	6.6511	240.9668
Verde	1.2468	23.8231	27.4383	677.9848
Azul	0.89193	10.562	15.4396	460.2991
Carga de 2800 newtons e iluminación incandescente				

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

	Baja	Media	Alta	Crítica
Rojo	7.2697	32.7983	48.9972	208.1997
Verde	5.6994	20.109	12.5973	39.9041
Azul	0.91053	2.1382	1.1307	5.5796
Carga de 2800 newtons e iluminación fluorescente				
	Baja	Media	Alta	Crítica
Rojo	6.5234	27.4925	40.6678	716.7228
Verde	13.0618	49.5932	51.2228	413.6226
Azul	2.7826	7.2741	6.8838	40.2285
Carga de 2800 newtons e iluminación láser				
	Baja	Media	Alta	Crítica
Rojo	4.0767	16.5295	21.7119	324.3237
Verde	14.0971	53.2275	59.6351	1050.8176
Azul	8.7899	25.9032	37.0532	862.0035

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

FIRMA ESTUDIANTE: Pablo Daniel

FIRMA ASESOR: Hermes A. Fandiño T

FECHA ENTREGA: 6/Junio/2023

FIRMA COMITÉ TRABAJO DE GRADO DE LA FACULTAD \_\_\_\_\_

RECHAZADO\_\_      ACEPTADO\_\_\_\_      ACEPTADO CON  
 MODIFICACIONES \_\_\_\_\_

ACTA NO. \_\_\_\_\_

FECHA ENTREGA: \_\_\_\_\_

FIRMA CONSEJO DE FACULTAD \_\_\_\_\_

ACTA NO. \_\_\_\_\_

FECHA ENTREGA: \_\_\_\_\_