



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO

CENTRO UNIVERSITARIO UAEM ATLACOMULCO



“RECONOCIMIENTO Y DETECCIÓN DE FUEGO EN IMÁGENES
DIGITALES POR MEDIO DE TÉCNICAS DE VISIÓN POR
COMPUTADORA”

T E S I S

Que para obtener el Título de:

Ingeniero en Computación

Presenta:

GUSTAVO ADOLFO CRUZ SÁNCHEZ

Director de Tesis:

Dr. en C. I. E. EVERARDO EFRÉN GRANDA GUTIÉRREZ

Noviembre de 2017



UAEM | Universidad Autónoma
del Estado de México

Área de Titulación

Atlacomulco, Méx., a 26 de Abril de 2017.



P.L.ING. COMP. GUSTAVO ADOLFO CRUZ SÁNCHEZ
P R E S E N T E :

Por este conducto me permito comunicar a usted (es) que el Comité Técnico de Titulación autorizó el proyecto de TESIS que presentó (aron) y que será asesorado por el (la) DR. EVERARDO EFRÉN GRANDA GUTIÉRREZ titulado:

“RECONOCIMIENTO Y DETECCIÓN DE FUEGO EN IMÁGENES DIGITALES POR MEDIO DE TÉCNICAS DE VISIÓN POR COMPUTADORA”

Al mismo tiempo solicito a usted (es) de la manera más atenta que al concluir el desarrollo del trabajo sea (n) tan amable (s) de comunicarlo por escrito a este Departamento.

A T E N T A M E N T E
PATRIA, CIENCIA Y TRABAJO

“2017, Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”

DRA. EN D. MARÍA DE JESÚS HERNÁNDEZ GARNICA
SUBDIRECTORA ACADÉMICA
CENTRO UNIVERSITARIO UAEM ATLA COMULCO



www.uaemex.mx

Centro Universitario UAEM Atlacomulco
Km. 60 Carretera Toluca-Atlacomulco C.P. 50450 Atlacomulco, Edo. de México
Tels (712) 122 04 36, 122 04 46, 122 05 35 E-mail: cuatla@uaemex.mx



UAEM | Universidad Autónoma
del Estado de México

Área de Titulación

Atacomulco, Méx., a 26 de Abril de 2017.



DR. EVERARDO EFRÉN GRANDA GUTIÉRREZ
P R E S E N T E .

Por este conducto me permito comunicar a usted que la Comisión Revisora de Proyectos de Tesis, acordó nombrarlo ASESOR del Trabajo de TESIS titulado:

“RECONOCIMIENTO Y DETECCIÓN DE FUEGO EN IMÁGENES DIGITALES POR MEDIO DE TÉCNICAS DE VISIÓN POR COMPUTADORA”

Que presenta (n) el (los) Pasante (s) de L.ING. COMP. GUSTAVO ADOLFO CRUZ SÁNCHEZ, al mismo tiempo solicito a usted(s) de la manera más atenta, que al concluir su asesoría sea tan amable de comunicarlo por escrito a este Departamento.

A T E N T A M E N T E
PATRIA, CIENCIA Y TRABAJO

“2017, Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”

DRA. EN D. MARÍA DE JESÚS HERNÁNDEZ GARNICA
SUBDIRECTORA ACADÉMICA
CENTRO UNIVERSITARIO UAEM ATLACOMULCO

*Recibido
Everardo Efrén Granda
26/Abril/2017*



www.uaemex.mx

Centro Universitario UAEM Atacomulco:
Km. 81 Carretera Toluca-Atacomulco C.P. 50450 Atacomulco, Edo. de México



Universidad Autónoma del Estado de México
Centro Universitario UAEM Atlacomulco

Atlacomulco, México, a 11 de octubre de 2017.

DRA. EN D. MARÍA DE JESÚS HERNÁNDEZ GARNICA
SUBDIRECTORA ACADÉMICA
CENTRO UNIVERSITARIO ATLACOMULCO

PRESENTE:

El que suscribe, Dr. Everardo Efrén Granda Gutiérrez, profesor de esta institución, en cumplimiento al oficio enviado con fecha de 26 de abril de 2017, donde se me nombró como asesor del trabajo de tesis titulado "**RECONOCIMIENTO Y DETECCIÓN DE FUEGO EN IMÁGENES DIGITALES POR MEDIO DE TÉCNICAS DE VISIÓN POR COMPUTADORA**", tengo a bien informarle que el proyecto, sus entregables y el documento de tesis, han sido concluidos satisfactoriamente, por lo que considero que el sustentante, pasante de la Licenciatura en Ingeniería en Computación, **GUSTAVO ADOLFO CRUZ SÁNCHEZ**, puede continuar con los trámites necesarios para su evaluación profesional.

Sin más por el momento, quedo de usted.

ATENTAMENTE
PATRIA, CIENCIA Y TRABAJO
"2017, Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos"

DR. EVERARDO EFRÉN GRANDA GUTIÉRREZ
PROFESOR DE TIEMPO COMPLETO
CENTRO UNIVERSITARIO UAEM ATLACOMULCO



*Recebi
K. Ruiz
11/10/2017*

Centro Universitario UAEM Atlacomulco
Km. 60 Carretera Toluca - Atlacomulco
Atlacomulco, Estado de México, C.P. 50450
Tels. (712) 122 04 36, 122 04 46, 122 0535
e-mail: cuatla@uaemex.mx





Universidad Autónoma del Estado de México
Centro Universitario UAEM Atlacomulco

Área de Titulación

Atlacomulco, Méx., a 12 de Octubre de 2017.

DR. JOSÉ ARTURO PÉREZ MARTÍNEZ
P R E S E N T E :

Por este conducto me permito comunicar a usted que la Comisión Revisora de Proyectos de Tesis acordó nombrarlo REVISOR (A) del Trabajo de TESIS titulado:

“RECONOCIMIENTO Y DETECCIÓN DE FUEGO EN IMÁGENES DIGITALES POR MEDIO DE TÉCNICAS DE VISIÓN POR COMPUTADORA ”

Que presenta (n) el (los) Pasante (s) de L.ING. COMP. GUSTAVO ADOLFO CRUZ SÁNCHEZ, al mismo tiempo solicito a usted de la manera más atenta, que al concluir su revisión sea tan amable en comunicar por escrito su VOTO APROBATORIO a este Departamento, en un lapso no mayor a 10 días a partir de la recepción del trabajo.

A T E N T A M E N T E
PATRIA, CIENCIA Y TRABAJO

“2017, Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”

DRA. EN D. MARÍA DE JESÚS HERNÁNDEZ GARNICA
SUBDIRECTORA ACADÉMICA
CENTRO UNIVERSITARIO UAEM ATLACOMULCO



Recibí
17/oct/2017
J. Arturo Pérez
Martínez

Carretera Toluca- Atlacomulco Km. 60
C.P. 50450, Atlacomulco, Estado de México
Tels.: (712) 122 04 36, 122 04 46, 122 05 35





Universidad Autónoma del Estado de México
Centro Universitario UAEM Atlacomulco

Atlacomulco, México a 18 de Octubre de 2017.

Dra. en D. MARÍA DE JESUS HERNÁNDEZ GARNICA.
SUBDIRECTORA ACADÉMICA DEL
CENTRO UNIVERSITARIO UAEM ATLACOMULCO.
P R E S E N T E :

El que suscribe, Dr. José Arturo Pérez Martínez, profesor de esta institución y en respuesta al nombramiento como REVISOR del trabajo: **"RECONOCIMIENTO Y DETECCIÓN DE FUEGO EN IMÁGENES DIGITALES POR MEDIO DE TÉCNICAS DE VISIÓN POR COMPUTADORA"**, tengo a bien informarle que ha sido concluida la revisión del mismo, emitiendo mi **VOTO APROBATORIO**; por lo que considero que el sustentante pasante de la Licenciatura en Ingeniería en Computación GUSTAVO ADOLFO CRUZ SÁNCHEZ, puede seguir con los trámites necesarios para su evaluación profesional.

Sin otro particular por el momento, agradezco su atención y me pongo a sus órdenes para cualquier aclaración a este respecto.

ATENTAMENTE
PATRIA, CIENCIA Y TRABAJO

"2017, Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos"

DR. JOSÉ ARTURO PÉREZ MARTÍNEZ
PROFESOR DE TIEMPO COMPLETO DEL
CENTRO UNIVERSITARIO UAEM ATLACOMULCO

Centro Universitario UAEM Atlacomulco
Km. 60 Carretera Toluca - Atlacomulco
C.P. 50450
Atlacomulco, Estado de México





Universidad Autónoma del Estado de México
Centro Universitario UAEM Atlacomulco

Área de Titulación

Atlacomulco, Méx., a 12 de Octubre de 2017.

DR. ALLAN ANTONIO FLORES FUENTES
P R E S E N T E :

Por este conducto me permito comunicar a usted que la Comisión Revisora de Proyectos de Tesis acordó nombrarlo REVISOR (A) del Trabajo de TESIS titulado:

“RECONOCIMIENTO Y DETECCIÓN DE FUEGO EN IMÁGENES DIGITALES POR MEDIO DE TÉCNICAS DE VISIÓN POR COMPUTADORA ”

Que presenta (n) el (los) Pasante (s) de LING. COMP. GUSTAVO ADOLFO CRUZ SÁNCHEZ, al mismo tiempo solicito a usted de la manera más atenta, que al concluir su revisión sea tan amable en comunicar por escrito su VOTO APROBATORIO a este Departamento, en un lapso no mayor a 10 días a partir de la recepción del trabajo.

Allan Flores
Reabi
17/10/2017

A T E N T A M E N T E
PATRIA, CIENCIA Y TRABAJO

"2017, Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos"

[Signature]
DRA. EN D. MARÍA DE JESÚS HERNÁNDEZ GARNICA
SUBDIRECTORA ACADÉMICA
CENTRO UNIVERSITARIO UAEM ATLACOMULCO



Carretera Toluca - Atlacomulco Km. 60
C.P. 50450, Atlacomulco, Estado de México
Tels.: (712) 122 04 36, 122 04 46, 122 05 35





Universidad Autónoma del Estado de México
Centro Universitario UAEM Atlacomulco

Atacomulco, México, a 20 de octubre de 2017.

DRA. EN D. MARÍA DE JESÚS HERNÁNDEZ GARNICA
SUBDIRECTORA ACADÉMICA
CENTRO UNIVERSITARIO ATLACOMULCO

PRESENTE:

El que suscribe, Dr. Allan Antonio Flores Fuentes, profesor de esta institución, en cumplimiento al oficio enviado con fecha de 12 de octubre de 2017, donde se me nombró como revisor del trabajo titulado **"RECONOCIMIENTO Y DETECCIÓN DE FUEGO EN IMÁGENES DIGITALES POR MEDIO DE TÉCNICAS DE VISIÓN POR COMPUTADORA"**, tengo a bien informarle que ha sido concluida la revisión del mismo, por lo que emito mi **VOTO APROBATORIO**, para que el sustentante, pasante de la Licenciatura en Ingeniería en Computación, **GUSTAVO ADOLFO CRUZ SÁNCHEZ**, pueda seguir con los trámites necesarios para su evaluación profesional.

Sin más por el momento, quedo de usted.

ATENTAMENTE
PATRIA, CIENCIA Y TRABAJO
"2017, Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos"

DR. ALLAN ANTONIO FLORES FUENTES
PROFESOR DE TIEMPO COMPLETO
CENTRO UNIVERSITARIO UAEM ATLACOMULCO

Centro Universitario UAEM Atlacomulco
Km. 60 Carretera Toluca – Atlacomulco
C.P. 50450
Atlacomulco, Estado de México
Tels. (712) 122 04 36, 122 04 46, 122 0535
e-mail: cuatla@uaemex.mx





Universidad Autónoma del Estado de México
Centro Universitario UAEM Atlacomulco

Área de Titulación

Atlacomulco, Méx., a 30 de Octubre de 2017.

P.L.ING. COMP. GUSTAVO ADOLFO CRUZ SÁNCHEZ
P R E S E N T E .

Por este conducto me permito informar a usted (es) que habiendo concluido el Trabajo de Tesis denominado:

“RECONOCIMIENTO Y DETECCIÓN DE FUEGO EN IMÁGENES DIGITALES POR MEDIO DE TÉCNICAS DE VISIÓN POR COMPUTADORA”

Se autoriza la impresión y/o digitalización de dicho trabajo a fin de que continúe (n) con los trámites para obtener el Título de LICENCIADO (A) EN INGENIERÍA EN COMPUTACIÓN.

A T E N T A M E N T E
PATRIA, CIENCIA Y TRABAJO

“2017, Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”

DRA. EN D. MARÍA DE JESÚS HERNÁNDEZ GARNICA
SUBDIRECTORA ACADÉMICA
CENTRO UNIVERSITARIO UAEM ATLACOMULCO



Carretera Toluca - Atlacomulco Km. 60
C.P. 50450, Atlacomulco, Estado de México
Tels.: (712) 122 04 36, 122 04 46, 122 05 35
cuatla@uamex.mx



DEDICATORIAS

A mis padres:

A mi padre Rafael, por demostrarme que a donde quiera que vayamos, siempre tenemos que ser nosotros mismos, pues es lo mejor que podemos ofrecer.

A mi madre Antonia, por ayudarme a lograr mis metas y demostrarme que no se puede darse por vencido, sin antes intentarlo.

A mis Hermanos:

Ustedes son mi mejor referencia en la vida, para cuando me preguntan, de quién me siento orgulloso.

A Karen Roció:

Es muy raro encontrarse en la vida, con una persona que te entregue una razón para ver todas las cosas con ilusión y con amor.

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Everardo Efrén Granda Gutiérrez:

Gracias por su disposición, comprensión, paciencia y ayuda, en la realización de este proyecto; por ser una persona que puede ver lo mejor en un alumno y orientarlo de forma adecuada para que este pueda enfocar su potencial. Gracias...

A mis revisores:

Dr. José Arturo Pérez Martínez

Dr. Allan Antonio Flores Fuentes

Por su ayuda, disposición y tiempo. Gracias...

A los encargados de salas de cómputo del Centro Universitario UAEM Atlacomulco.

Mario Colín.

Moisés Porfirio.

Por su disponibilidad para facilitarme el uso de los espacios (salas de cómputo), durante el desarrollo de este proyecto.

A los compañeros del Laboratorio de Investigación

Por hacer agradable el tiempo que duró este proceso.

RESUMEN

Esta investigación presenta el diseño y desarrollo de un algoritmo programado en MATLAB®, cuyo objetivo es realizar la detección de fuego en imágenes digitales (obtenidas con cámaras de video convencionales), estableciendo características únicas y propias del fuego, tales como: luminosidad, color y forma, que facilitan el proceso de su detección por medio de técnicas de visión artificial, además de informar al usuario de una detección positiva, con un mensaje de alerta. El algoritmo está constituido por cuatro etapas principales para realizar la detección del fuego:

Primera: corrección digital. Con el fin de mejorar la percepción y el análisis del algoritmo se oscurece o aclara la imagen, según lo requiera el escenario de prueba, por medio del ajuste del factor de corrección gamma.

Segunda: detección por color. De acuerdo con los valores de color propios del fuego, se establece un intervalo con valores para la ventana de color, que separa a los objetos que estén dentro del intervalo.

Tercera: sustracción de fondo. Los objetos que se encuentren dentro de los valores de la ventana de color se identifican como una región de interés, que se analiza en la siguiente etapa.

Cuarta: extracción de propiedades geométricas. En esta etapa se separa la región de interés del resto de la imagen por medio del método de binarización, posteriormente se obtienen las propiedades matemáticas de los objetos encontrados (como el área y el perímetro), para aplicar el método de circularidad, que sirve para realizar la comparación de la forma de objetos regulares como el círculo, el triángulo y el cuadrado, contra la forma indefinida del fuego.

Finalmente, para validar el funcionamiento del algoritmo y determinar el nivel de efectividad del mismo, se realizan pruebas experimentales en cuatro escenarios con treinta y cinco fotos de cada uno, tomando en cuenta dos parámetros para la evaluación: sensibilidad (detecciones reales de fuego, o verdaderos positivos) y especificidad (no detecciones de fuego, o verdaderos negativos), los cuales son indicadores del desempeño del algoritmo en entornos reales.

ABSTRACT

The process of design and development of a computational algorithm is presented in this document. The algorithm was programmed in the MATLAB environment with the aim of identifying the presence of fire in digital images acquired by a conventional video camera. Unique features, such as: luminosity, color and shape, allow the identification of fire by using artificial vision techniques, as well as emitting an alert in case of a positive detection of this element in an image. The proposed algorithm is constituted by four stages:

First: digital correction. The image is either, lightened or darkened, upon it is requested by the test scenario, by using the gamma correction factor.

Second: color detection. According to the typical color information from fire, a color intensity interval was established with the purpose of separating the different objects with a color in the value interval similar to the color of fire.

Third: background subtraction. Those objects between the interval of values of color typical of fire are identified as a Region of Interest, for a further analysis.

Fourth: geometric features extraction. In the last stage, the Region of Interest is separated from the other elements of the image by the binarization method. Then, the geometric features of the selected objects (area and perimeter) are calculated to compare the circularity of them with the circularity of regular objects, such as circle, triangle or square.

Finally, to validate the operation of the algorithm and to determine its effectivity, an experimental set was performed in four scenarios with 35 photos each. The algorithm was evaluated by two main parameters: sensibility (real fire detection or true positives) and specificity (no fire detection or true negatives); both are indicators of performance of the algorithm in real environments.

ÍNDICE

OFICIOS DE LIBERACIÓN.....	ii
DEDICATORIAS	x
AGRADECIMIENTOS	i
RESUMEN.....	ii
ABSTRACT	iii
ÍNDICE	iv
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vi
ÍNDICE DE TABLAS	1
1 INTRODUCCIÓN	2
1.1 El fuego y el proceso de combustión.....	2
1.1.1 Teoría del fuego	3
1.1.2 Tipos de Fuego	5
1.1.3 Etapas de incendio.....	7
2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	13
2.1 Definición del problema.....	13
2.2 Objetivos de la investigación	14
2.2.1 Objetivo General	14
2.2.2 Objetivos Específicos.....	14
2.3 Preguntas de investigación	14
2.4 Justificación.....	15
2.5 Impactos	16
3 HIPÓTESIS	18
4 ESTADO DEL ARTE	19
4.1 Técnicas y métodos actuales usados para la detección de fuego.....	20

4.2	Procesamiento digital de imágenes	26
5	METODOLOGÍA	36
5.1	Requerimientos o especificaciones.....	36
5.2	Diseño e implementación	37
5.3	Experimentación para la obtención de la ventana de color	59
5.4	Interface	65
6	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	71
6.1	Pruebas para calibración del algoritmo	71
6.2	Validación del funcionamiento	95
6.3	Resumen de los resultados	99
	CONCLUSIONES	101
	ANEXO 1: Secciones especiales del código.....	103
	ANEXO 2 Código de la interface Pruebas.....	107

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Ilustración de los elementos del proceso de combustión.	4
Figura 1-2 Tetraedro del proceso de combustión.....	4
Figura 1-3 Combustibles sólidos.....	6
Figura 1-4 Combustibles líquidos, y gases inflamables.....	6
Figura 1-5 Equipo eléctrico.....	7
Figura 1-6 Fuego en metales.	7
Figura 1-7 Curva que describe las etapas del fuego a través del tiempo [6].....	8
Figura 1-8 Crecimiento del Fuego	10
Figura 1-9 Zona donde inicia el funcionamiento del algoritmo.....	12
Figura 4-1 Incidencia porcentual de incendios y daños producidos. [13].....	19
Figura 4-2 Criterio para determinar la temperatura de un pixel [17].....	25
Figura 4-3 Modelo de color RBG	28
Figura 4-4 Planos que integran al formato RGB.....	29
Figura 4-5 Escala de grises de una imagen.	30
Figura 4-6 Imagen de prueba a la cual se le aplicará la corrección por factor gamma. ...	31
Figura 4-7 Transformación gamma aplicada para aclarar y oscurecer la imagen.....	31
Figura 4-8 Ejemplo de una matriz para un filtro espacial.	32
Figura 4-9 Aplicación de un filtro espacial.	32
Figura 4-10 Histogramas de los diferentes planos de color Rojo, Verde y Azul.....	33
Figura 4-11 Correspondencia de los pixeles a los objetos en la imagen.....	34
Figura 5-1 Metodología de la investigación en un diagrama de flujo.....	37
Figura 5-2 Diagrama de bloques de la estructura del algoritmo.	38
Figura 5-3 Diagrama de flujo del algoritmo del orden de los procesos del algoritmo.....	40
Figura 5-4 Variación de gamma y sus valores de salida.	41
Figura 5-5 Escenario 4 de monitorización: área con buena iluminación (170 Lúmenes)42	
Figura 5-6 Histograma del Escenario 4.....	43
Figura 5-7 Resultados del filtro corrección Gamma en el escenario 4.	44
Figura 5-8 Escenario 4 de monitorización.	45
Figura 5-9 Histograma del Escenario 4.....	46
Figura 5-10 Resultados del filtro corrección Gamma en el escenario 4.	47

Figura 5-11 Histogramas del escenario 4 con aumento y disminución de contraste.	47
Figura 5-12 Escenario 1 con sus planos de color y su histograma.....	49
Figura 5-13 Gráficas de color en tres dimensiones.....	50
Figura 5-14 Información del fuego en los planos de color rojo y azul.	51
Figura 5-15 Información del fuego en los planos de color rojo y verde.	52
Figura 5-16 Región de interés del Escenario 1	52
Figura 5-17 Región de interés con propiedades de color.....	53
Figura 5-18 Imagen binaria de la región de interés.....	54
Figura 5-19 Objetos encontrados en la región de interés.....	55
Figura 5-20 Propiedades de los objetos encontrados.....	56
Figura 5-21 Ejemplo de la circularidad de tres figuras geométricas regulares.	57
Figura 5-22 Detección positiva o no-positiva del fuego.	58
Figura 5-23 Detección positiva de fuego.	59
Figura 5-24 Espacios cerrados para la determinación de la ventana de color.	60
Figura 5-25 Variación de luminosidad.....	60
Figura 5-26 Valores de intensidad.	61
Figura 5-27 Gráfica de la frecuencia del color Rojo.....	63
Figura 5-28 Gráfica de la frecuencia del color Verde.....	63
Figura 5-29 Gráfica de la frecuencia del color Azul.....	64
Figura 5-30 Diagrama de interacción del usuario y sistema.	66
Figura 5-31 Primer interface del proyecto.	66
Figura 5-32 Interface Pruebas.	68
Figura 5-33 interface Pruebas en ejecución.	68
Figura 5-34 Interface prueba nueva.	70
Figura 5-35 Interface de pruebas en ejecución.	70
Figura 6-1 Dimensiones físicas de los escenarios 1 y 2.....	72
Figura 6-2 Dimensiones físicas de los escenarios 3 y 4.....	73
Figura 6-3 Ubicación de la cámara en el escenario 4.....	74
Figura 6-4 Ubicación de la cámara en el escenario 3.....	74
Figura 6-5 Ubicación de la cámara en el escenario 2.....	75
Figura 6-6 Ubicación de la cámara en el escenario 1.....	75

Figura 6-7 Fotos de muestra para el escenario 4.....	76
Figura 6-8 Fotos de muestra para el escenario 3.....	77
Figura 6-9 Fotos de muestra para el escenario 2.....	78
Figura 6-10 Fotos de muestra para el escenario 1.....	79
Figura 6-11 Análisis de la primera imagen del escenario 1.....	80
Figura 6-12 Objetos encontrados en la imagen.....	81
Figura 6-13 Análisis de la segunda imagen del escenario 1.....	81
Figura 6-14 Análisis de la tercera imagen del escenario 1.....	82
Figura 6-15 Análisis de la cuarta imagen del escenario 1.....	82
Figura 6-16 Primer análisis del escenario 4.....	84
Figura 6-17 Segundo análisis del escenario 4.....	84
Figura 6-18 Análisis de la segunda imagen seleccionada del escenario 4.....	85
Figura 6-19 Análisis de la tercera imagen seleccionada del escenario 4.....	86
Figura 6-20 Análisis de la cuarta imagen seleccionada del escenario 4.....	86
Figura 6-21 Primer análisis del escenario 2.....	88
Figura 6-22 Segundo análisis de la primera imagen del escenario 2.....	88
Figura 6-23 Análisis de la segunda imagen del escenario 2.....	89
Figura 6-24 Análisis de la tercera imagen del escenario 2.....	90
Figura 6-25 Análisis de la cuarta imagen del escenario 2.....	90
Figura 6-26 Primer análisis del escenario 3.....	92
Figura 6-27 Segunda imagen analizada del escenario 3.....	93
Figura 6-28 Tercera imagen analizada del escenario 3.....	93
Figura 6-29 Cuarta imagen analizada del escenario 3.....	94
Figura 6-30 Resultados de la sensibilidad y especificidad de los cuatro escenarios.	100

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Escenarios para la base de datos del umbral de color.....	39
Tabla 2 Valores de intensidad de color.....	62
Tabla 3 Información estadística de los datos de la Tabla 2.....	64
Tabla 4 Valores para la ventana de color.....	65
Tabla 5 Lista de los escenarios de prueba.....	72
Tabla 6 Resumen de los resultados obtenidos del escenario 1.....	83
Tabla 7 Resumen de los resultados obtenidos del escenario 4.....	87
Tabla 8 Resumen de los resultados obtenidos del escenario 2.....	91
Tabla 9 Resumen de los resultados obtenidos del escenario 3.....	94
Tabla 10 Resultados de la efectividad del escenario 1.....	96
Tabla 11 Resultados de la efectividad del escenario 2.....	97
Tabla 12 Resultados de la efectividad del escenario 3.....	97
Tabla 13 Resultados de la efectividad del escenario 4.....	99

1 INTRODUCCIÓN

Investigadores, científicos e ingenieros han trabajado durante los últimos 40 años en el desarrollo y la comprensión de factores y procesos físicos que propician e intervienen en el desarrollo y propagación del fuego y sus productos [1]. La mayor parte de las investigaciones se han dividido en dos grupos: incendios en espacios abiertos e incendios en espacios cerrados, siendo este último el tema de interés para esta investigación.

Cuando no existe control sobre el comportamiento del fuego, se dice que existe un incendio, lo cual se traduce inmediatamente en pérdidas: monetarias, muebles, inmuebles, al ecosistema, e incluso en pérdidas de vidas humanas. No se puede tener el control de la ocurrencia de los incendios, sin embargo, se pueden tomar en cuenta la mayoría de las características del escenario donde se puede producir, además de realizar un monitoreo continuo de dicho escenario.

Entre más tiempo se extienda un incendio, habrá más pérdidas; esta es la importancia de poder detectar un incendio en una etapa temprana, así entonces, entre menos tiempo se tarde en detectar su presencia se reduce el monto o número de pérdidas, problemática central que se aborda en esta investigación: “reducir el tiempo para detectar un incendio y realizarlo de forma autónoma”.

Para comprender qué es un incendio y los daños que puede ocasionar, se debe conocer el proceso y los elementos que lo conforman, teniendo como principal elemento el fuego, además de sus productos y características, lo cual para la investigación es fundamental para agilizar el proceso de su detección, por medio de técnicas de visión por computadora.

1.1 El fuego y el proceso de combustión

Si dos o más sustancias se ponen en contacto bajo ciertas condiciones, se pueden combinar y dar origen a una o más sustancias diferentes; se dice entonces que se ha producido una reacción química [2]. Algunas reacciones desprenden calor y reciben el nombre de exotérmicas; por el contrario, existen reacciones que solo se producen si reciben una determinada cantidad de calor: a estas se les denomina endotérmicas [3].

La reacción química más importante al estudiar el fuego es la oxidación, que es un proceso que se da entre cualquier sustancia que se combine con el oxígeno. El fuego es el resultado del proceso de oxidación violenta, que se da entre un material combustible, un agente comburente y determinada cantidad de energía en forma de calor: esto se denomina “Combustión”. La función del fuego en esta reacción química es la de manifestar energía como resultado (Calor), entendiendo así que es una reacción química exotérmica [4].

El proceso de combustión es entonces una reacción exotérmica, auto-mantenida que involucra a un combustible sólido, líquido, y/o en estado de gas; este proceso está usualmente asociado (pero no necesariamente) con la oxidación de un combustible por oxígeno atmosférico combinado los componentes: combustible y agente oxidante (comburente) a una determinada temperatura, se obtendrá una reacción en cadena [3].

1.1.1 Teoría del fuego

La teoría del fuego se puede representar de forma gráfica, como se aprecia en el triángulo de la Figura 1-1, para tener una mejor comprensión de qué elementos son necesarios para el proceso de la creación del fuego. Cada elemento es necesario para que se produzca el fuego: la inexistencia o poca cantidad de alguno es igual a que no sea posible mantener la reacción química que produce el fuego, y por lo tanto este se extingue.

El proceso de combustión es una reacción auto-mantenida, que involucra a los tres elementos de triángulo de fuego, pero ahora en una reacción en cadena, donde el calor genera gases combustibles; estos generan llamas, que a su vez aportan más calor al proceso, generando así una reacción que encuentra el fin con la ausencia (o escasez) de alguno de los elementos [5].

Cada uno de los elementos mencionados tiene diferentes características, las cuales favorecerán al proceso o lo terminarán, dependiendo de su influencia en el proceso. Esto puede representarse de manera gráfica mediante la Figura 1-2.

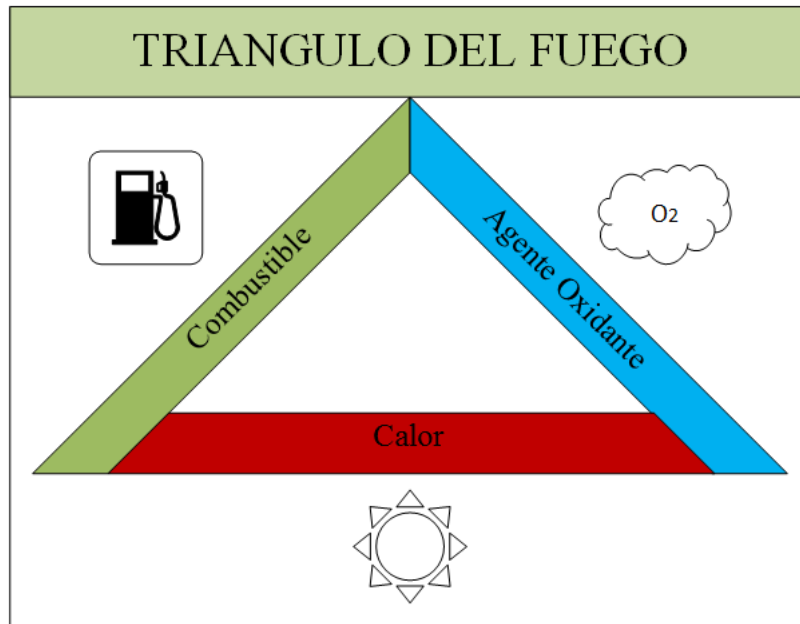


Figura 1-1 Ilustración de los elementos del proceso de combustión.



Figura 1-2 Tetraedro del proceso de combustión.

Comburente

Es el elemento que hace que se consuma un combustible. El agente oxidante más importante y abundante es el oxígeno que se encuentra en el aire, sin embargo, no es el único agente oxidante: existen otros como los nitratos, cloratos ácidos, entre otros. Que contienen oxígeno en su estructura molecular, o si no lo tienen, igual pueden iniciar el proceso de combustión o mantenerla, mediante una reacción de oxidación.

Calor

La temperatura de un material es la condición que determina si este va a transferir calor desde o hacia otros materiales. Se mide en grados (Celsius, Fahrenheit y Kelvin) [4]. La temperatura de ignición, por ejemplo, es temperatura mínima de la materia para iniciar la combustión. Por otra parte, el calor es un tipo de energía que siempre fluye de alta temperatura a baja temperatura: se mide en Joules (J). El calor, como resultado de la combustión, es el factor principal del proceso de propagación del fuego, al generar los gases combustibles que producirán las llamas del fuego, y este más calor, retroalimentando el proceso.

Combustible

El combustible es el principal factor que induce la existencia de un incendio además de que también determinará el color de las llamas, aspecto fundamental para esta investigación. El material o sustancia capaz de arder, que se utiliza como materia prima para el proceso de combustión, puede encontrarse en estado sólido, líquido, o gaseoso.

1.1.2 Tipos de Fuego

Dependiendo el tipo de combustible presente en el proceso de combustión, y de acuerdo con la norma 23-020 de la NFPA (National Fire Protection Association, en español

Asociación Nacional de protección contra Incendios), se clasifica el tipo de fuego en cuatro clases principales [2].

1. Tipo A: materiales solidos (madera, papel, textiles, cartón). Este tipo de fuego es el que la investigación tiene como fin reconocer; generalmente este tipo de combustible, al arder, genera llamas de color amarillo, naranja y rojo. Un aspecto por considerar es que este tipo de fuego es el más frecuente en los incendios de espacios cerrados (oficinas, escuelas, bodegas, laboratorios, casas). Un ejemplo de estos materiales se puede observar en la Figura 1-3.

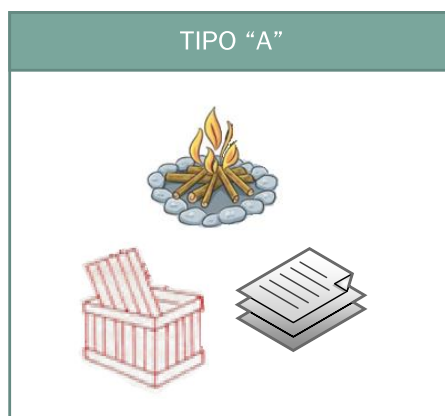


Figura 1-3 Combustibles sólidos.

2. Tipo B: líquidos y gases inflamables (Alcohol, gasolina, acetona, pintura, kerosene). Se observa el ejemplo en la Figura 1-4.



Figura 1-4 Combustibles líquidos, y gases inflamables.

3. Tipo C: instalaciones eléctricas (interruptores, electrodomésticos, dispositivos electrónicos, plantas de luz eléctrica, transformadores). Se muestra el ejemplo en la Figura 1-5

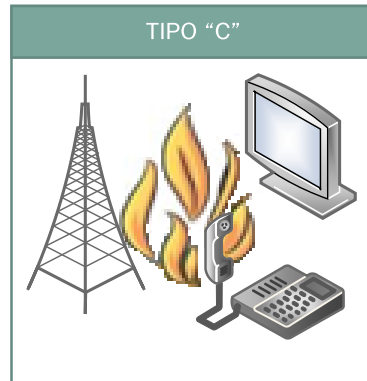


Figura 1-5 Equipo eléctrico.

4. Tipo D: metales combustibles (sodio, titanio, magnesio). Se visualiza el ejemplo en la Figura 1-6

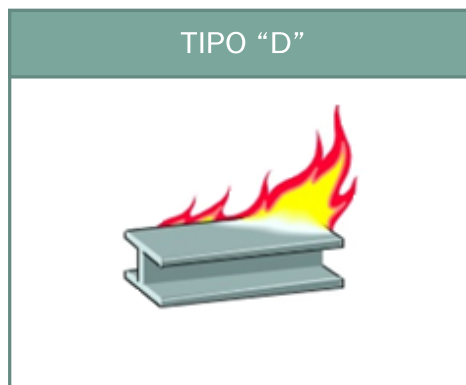


Figura 1-6 Fuego en metales.

1.1.3 Etapas de incendio

Para ejemplificar el comportamiento de un incendio, y para el interés de esta investigación, se utiliza un combustible sólido: la madera (combustible tipo A), con condiciones típicas ambientales (una fogata, como ejemplo). Como en todo evento con un

desarrollo en un tiempo determinado, y sin involucrarse a fondo en los procesos físicos que lo describen, este fenómeno se puede describir de manera general por etapas de desarrollo: inicio, crecimiento, desarrollo y decadencia. Lo anterior se visualiza en la Figura 1-7, que representa la clasificación de las etapas de un incendio en función del tiempo y con las condiciones ideales para su ocurrencia [6]. Cabe aclarar que la gráfica solo generaliza el comportamiento de la mayoría de los incendios, debido a que este fenómeno tiene un comportamiento dinámico y no en todos los casos la gráfica representa un comportamiento definido.

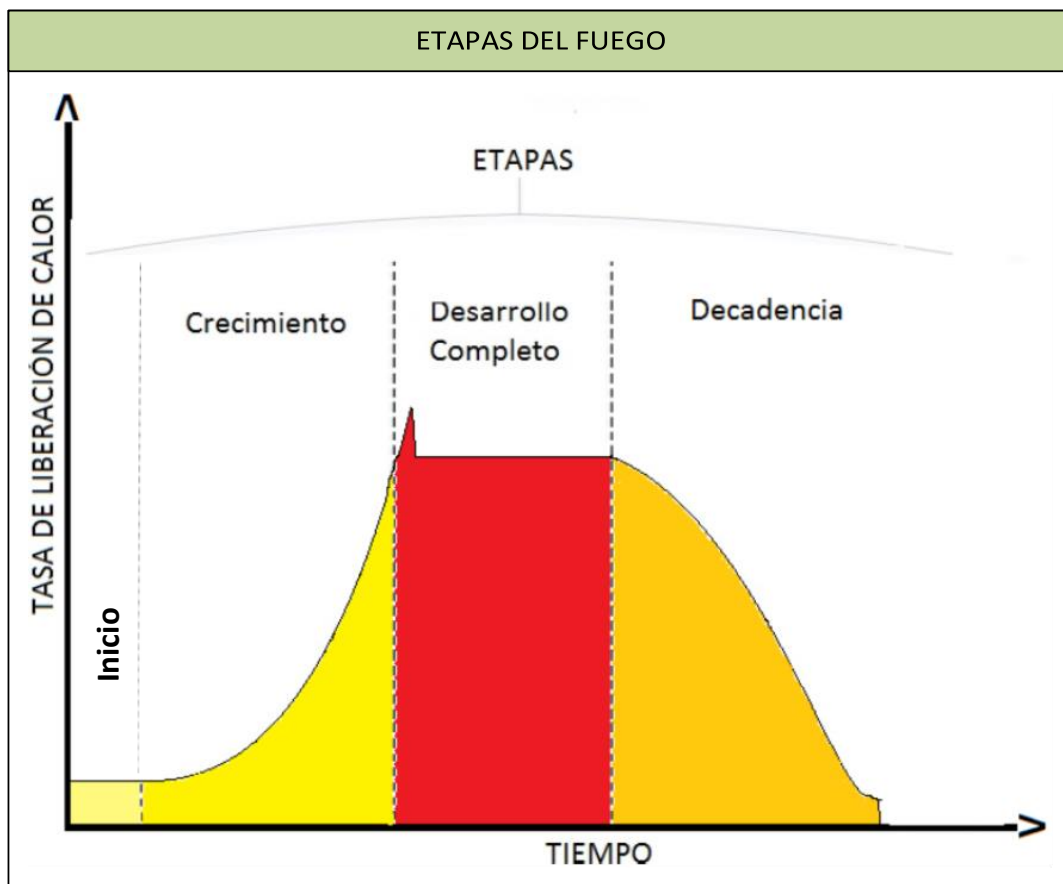


Figura 1-7 Curva que describe las etapas del fuego a través del tiempo [6]

Crecimiento:

Un incendio que aumenta su producción instantánea de energía o tasa de liberación de calor en el tiempo, se dice que es un incendio en crecimiento. Típicamente los incendios

en crecimiento tienen más oxígeno disponible que el necesario para la combustión de los gases del combustible que se están produciendo y continuarán creciendo hasta que sean limitados por la cantidad de combustible disponible o la cantidad de comburente [6]. Esta etapa pasa también por cuatro distintos estados de desarrollo: estado incipiente, humo visible, fuego en llamas, calor intenso. Los cuales se describen más a fondo posteriormente en este mismo capítulo.

Desarrollo:

Una segunda categoría, basada en la velocidad de crecimiento, es el incendio en régimen permanente, o en proceso de desarrollo. Bajo condiciones de régimen permanente, la producción de calor del incendio o tasa de liberación de calor permanece relativamente constante en el tiempo. Esto no significa que no habrá variaciones, pero no hay aumento continuo rápido o disminución continua en la velocidad de liberación de energía [6].

Decadencia:

Una tercera categoría es la situación de combustión completa o decadencia, donde hay suficiente aire para la combustión, pero la tasa de liberación de calor está disminuyendo, debido al agotamiento de combustible [6].

Entre las tres diferentes etapas de desarrollo la primera y principal, es la de crecimiento, etapa en la que se centra la investigación, debido a que en ella se aplica el proceso de detección que indica la existencia de juego en el escenario de monitorización. A continuación, en la Figura 1-8, se ve la descripción gráfica de los estados por los que pasa la etapa de crecimiento de un incendio y el aumento que tiene la temperatura conforme transcurre el tiempo.

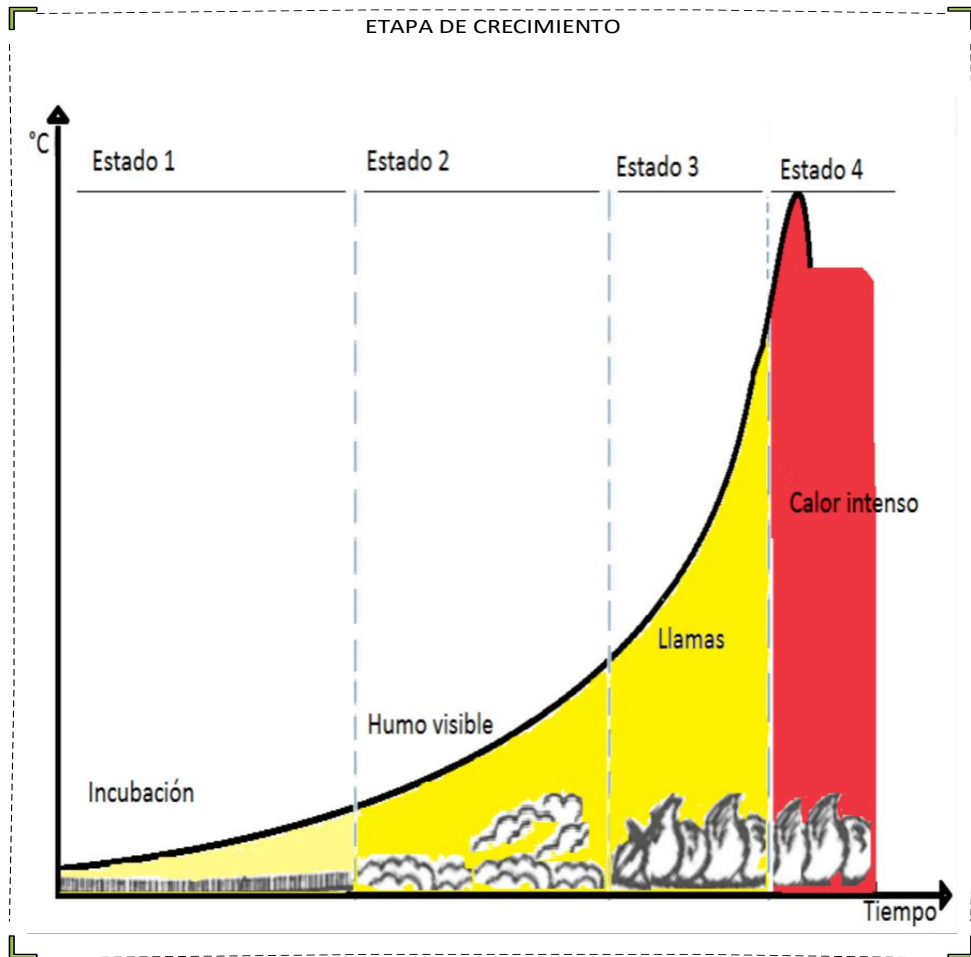


Figura 1-8 Crecimiento del Fuego

La etapa llamada crecimiento, pasa por tres estados para su desarrollo:

Estado uno

Denominado incubación o estado incipiente: es el punto de inicio de todo incendio, el cual puede ser originado por alguna chispa o llama, o simplemente porque algún material llegue a su punto de ignición, debido a un aumento de temperatura. Se caracteriza por la inexistencia de llamas y la escasa presencia de humo, además de que un aumento ligero de temperatura. Comienza la liberación de los primeros gases que favorecerán al proceso

de combustión, e interactuarán con los demás componentes que propician a un incendio (comburente y calor) [7].

Estado dos

En este estado, el humo y las primeras llamas (casi en forma de grandes chispas, pero pequeñas como flamas) comienzan a hacerse notar; la claridad del humo que se produce en este estado es casi total, haciéndolo casi imperceptible por alguna cámara digital convencional y resulta también casi imperceptible para el ojo humano, razón por la cual la investigación se centra en la presencia de fuego.

Estado tres

En este estado las llamas comienzan a dar emisiones constantes y crecientes de luz, que aumentarán conforme se desarrolle el incendio. Es en este estado donde se dan los aumentos considerables de temperatura en tiempos reducidos (cuestión de minutos o incluso segundos), debido a que los gases que propician el desarrollo y crecimiento del incendio se liberan en mayor cantidad.

Es entre los estados dos y tres donde da inicio el funcionamiento del algoritmo que se propone en este trabajo, pues la presencia del fuego comienza al final del “Estado dos” y el inicio del “Estado tres” con pequeñas llamas que aumentan su tamaño conforme el paso del tiempo, emitiendo mayor cantidad de calor y luz (esta última característica, es la materia prima para las imágenes con las que el algoritmo realiza el proceso de detección), agilizando la detección por alguna cámara convencional debido a los colores que caracterizan a las llamas. Además, es una etapa temprana para la emisión de una alarma, que permita realizar acciones tempranas para su extinción (Figura 1-9).

Una vez que se conoce al fuego, su proceso y sus elementos, se pueden extraer características principales para su detección, un ejemplo de ello es su color, con las cuales se realiza el proceso para su detección.

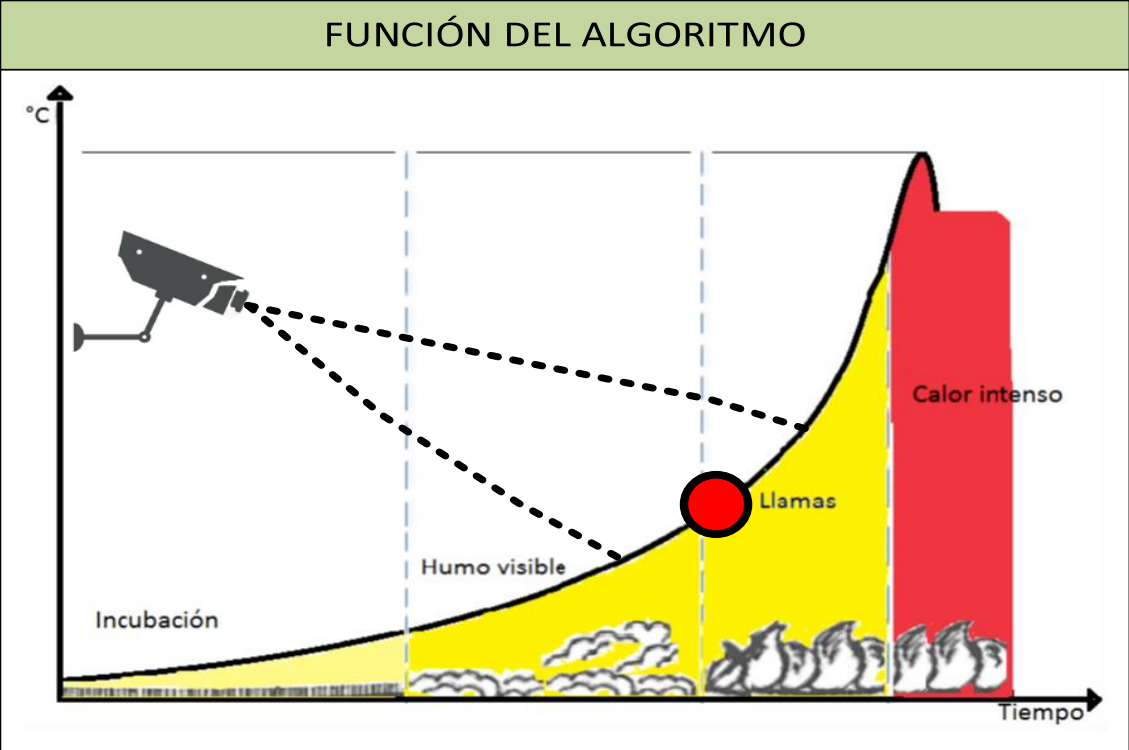


Figura 1-9 Zona donde inicia el funcionamiento del algoritmo

2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La detección automática de incendios es un tema de interés para la ciencia, al generar preocupación y encontrar la interacción de varios elementos, con influencia en aspectos: culturales, socioeconómicos y hasta políticos, debido a que en las últimas décadas en muchas de las regiones del mundo han tenido un aumento significativo en la ocurrencia y severidad de los siniestros.

La aplicación de la tecnología como herramienta de ayuda para hacerle frente y atender este tema, es el objetivo de esta investigación: plantear métodos con conocimientos obtenidos en el trayecto de la licenciatura de ingeniería en computación, específicamente en el área de Visión Artificial, que puedan detectar características particulares de un incendio tales como: el color, forma y expansión, para posteriormente generar un resultado autónomo en la detección del mismo. Los métodos tendrán bases en el desarrollo de técnicas de tratamiento de imágenes como: separación de los planos de color de una imagen, análisis estadístico de histogramas para la obtención de umbrales (valores en nivel de color), extracción de formas y objetos por medio de la binarización de imágenes, entre otros.

2.1 Definición del problema

La presente investigación plantea el desarrollo de un algoritmo que permita detectar fuego en imágenes digitales estableciendo las propiedades presentes en las llamas que conforman al fuego como: el color y forma, por medio de la optimización de métodos y técnicas existentes de visión por computadora, emitiendo como resultado de la identificación positiva una alarma, que pueda servir como medio potencial de ocurrencia de un posible incendio. Se establecerán las condiciones y características de las imágenes con las cuales el algoritmo tendrá mayor eficiencia y asertividad al realizar el proceso de identificación, limitando las características a las de un contexto en espacios cerrados tales como: baja iluminación, fondo estable, poco movimiento de otros objetos que se encuentren en el fondo. Con la clasificación de fuego de clase “A” y “B” según la “UNE-EN-2-1994/A1 de 2005, NFPA 10 y NCH 934” de la NFPA [8], que hace referencia a

fuego con combustible de materiales sólidos y líquidos como: madera, tela, papel cartón, plásticos, gasolina petróleo, alcohol, ceras, entre otros materiales comunes a los mencionados.

2.2 Objetivos de la investigación

2.2.1 Objetivo General

Desarrollar un algoritmo que permita identificar la presencia de fuego en imágenes digitales, por medio de técnicas de tratamiento de imágenes. Como un resultado positivo en la detección de la presencia de fuego, se emitirá una alarma que pueda servir como una de alerta para ejercer acciones y poder contrarrestarlo.

2.2.2 Objetivos Específicos

- Analizar el estado del arte sobre los trabajos que hay en la actualidad en la detección de incendios, observando las técnicas que utilizan para dar solución al problema.
- Identificar las principales variables del algoritmo y proponer la estructura general del mismo.
- Realizar un ajuste a las técnicas y métodos de acuerdo con las variables principales del algoritmo (adaptándose a las necesidades del contexto en espacios cerrados)
- Efectuar la codificación del algoritmo en un lenguaje de programación.
- Realizar pruebas experimentales para establecer el grado de eficiencia (aciertos), tanto el grado de error (falsos positivos).
- Como resultado de una identificación positiva el algoritmo propuesto emitirá una alerta de presencia de fuego en la imagen.

2.3 Preguntas de investigación

Para poder cumplir los objetivos de la investigación, es necesario la interrogante del como comenzar a realizarlos y como se deben culminar, para esto se hace uso de las preguntas de investigación.

- ¿Existe una tendencia en la estructura de los algoritmos para la detección de objetos, útiles para la detección de fuego?
- ¿Cuáles son las técnicas con mayor frecuencia presentes en algoritmos de detección de incendios?
- ¿Qué variables se deben contemplar para un algoritmo de detección de fuego?
- ¿Cuáles son las técnicas apropiadas para el desarrollo de un algoritmo que detecte fuego?
- Al realizar un análisis de imágenes y el cálculo de eficiencia y grado de error, con diferentes métodos. ¿Qué técnicas se tienen que mejorar u optimizar para incrementar su eficiencia?

2.4 Justificación

La detección automática de incendios encuentra varias soluciones, con diferentes métodos, por ejemplo: sensores de detección de humo, fuego y calor [8], sistemas por detectores laser que se activan al detectar humo [9], técnicas que con el paso del tiempo ganaron credibilidad al cumplir su objetivo, detectar patrones característicos del fuego (humo, llamas, calor), para poder anunciar un posible incendio, en los mejores casos el tiempo de respuesta para un sistema de monitoreo que emplea sensores, emite un resultado que varía entre segundos (10 a 15), hasta dos o tres minutos, dependiendo de la cantidad de recursos con los que el sistema cuente (detectores de humo, fuego) y de la velocidad de propagación del incendio, pues este factor es el que denomina la rapidez con la que los sensores actuaran, ya que es necesario el contacto directo con los patrones característicos (humo, fuego), para activarse, lo que hace tener un tiempo de respuesta variante y en la mayoría de los casos retardado.

El tiempo de respuesta que ofrecen los sistemas de visión artificial comparado con sistemas de percepción que emplean sensores físicos (temperatura, humo) [10], es considerablemente reducido, ya que un ordenador puede realizar el procesamiento de una imagen en menos tiempo del que el humo alcance una densidad y altura suficiente para llegar a un sensor que lo pueda detectar, evento que ocurre la mayoría de veces cuando un

incendio se encuentra en su mayor etapa de desarrollo, o que las llamas tengan el tamaño suficiente para producir el calor necesario en el ambiente y ser detectado por un sensor de temperatura. Una característica de un incendio en su etapa inicial es la de ser aislado, y que sus productos como las flamas y el humo carezcan de fuerza y tamaño, como para ser notados por sensores. Por el contrario, un sistema de detección por imágenes puede reconocer un incendio en su etapa inicial, al reconocer el fuego por su color, sin importar que pueda producir el humo necesario para poder ser detectado.

Cabe mencionar que no existe un estándar que describa el comportamiento del fuego, ya que es un factor variable, no se puede establecer una forma única para su incidencia, ya que es un factor que depende del contexto donde se puede desarrollar u ocurrir, de manera que, no se puede predecir o definir el momento y la forma para su ocurrencia. En pocas palabras, no se puede decir dónde y cuándo ocurrirá un incendio. Pero si se puede tomar en cuenta las características del contexto donde puede ocurrir, como el tamaño, altura y tipo de estructura de un espacio cerrado, de esta forma limitar el mayor grado que se pueda el comportamiento variable.

2.5 Impactos

Científico:

Diseño de un algoritmo para detección de fuego mediante la optimización de los métodos ya establecidos para el tratamiento de imágenes, tales como la obtención de un umbral óptimo, extracción de fondo, ubicación de objetos, binarización de una imagen digital.

Tecnológico:

Desarrollo de una herramienta, que pueda validar la identificación positiva del fuego en imágenes digitales, usando técnicas para el tratamiento de imágenes, que cumpla la función de alertar sobre su existencia a un usuario y se puedan realizar acciones para combatirlo y evitar un posible incendio.

Ambiental:

El desarrollo de este proyecto contribuirá en el posible desarrollo y diseño de estrategias para manejar y poder combatir el fuego al detectarlo de forma temprana, permitiendo proponer algunas áreas de aplicación del algoritmo desarrollado, o en un sistema o prototipo experimental.

Una detección temprana equivale a menores pérdidas materiales, además de poder implementar un monitoreo constante y accesiblemente económico, que se puede realizar con herramientas convencionales como lo son: una cámara de video y con la ayuda de un ordenador, elementos que en actualmente se encuentran al alcance de la mayoría de personas interesadas en proteger sus bienes materiales ante algún evento inesperado e impredecible como lo es un incendio, lo cual es la intención del objetivo principal de esta investigación.

3 HIPÓTESIS

Mediante el desarrollo de un algoritmo se podrá detectar la presencia de fuego en imágenes digitales, de espacios cerrados o interiores, con un grado de certidumbre de al menos 75%. Asimismo, al realizar una detección positiva, emitir una alarma que sirva como alerta al usuario.

4 ESTADO DEL ARTE

Actualmente, atender los problemas y factores relacionados con incendios, ha resultado un reto para la ciencia y un buen tema de interés para la comunidad científica internacional; la cual como respuesta ha desarrollado varias tecnologías (métodos, técnicas), con las cuales se puede reconocer un incendio por medio de su color, forma y temperatura factores específicos que facilitan la tarea de reconocerlo. Aún con la existencia de trabajos internacionales sobre el tema, la existencia en México de estos trabajos es casi nula y en la mayoría de ellos estos son aislados por empresas particulares [11], un motivo que impulsa también el desarrollo de esta investigación.

La temática del problema al detectar un incendio tiene dos vertientes principales, las cuales se enfocan en espacios cerrados (también denominados interiores) y espacios abiertos. En esta investigación se estudia particularmente la primera vertiente, los espacios cerrados, debido a que se presentan una mayor amenaza para el ser humano según datos de la Asociación Nacional de Protección contra el Fuego NFPA [13]. En la Figura 4-1 se muestra una gráfica porcentual de un número de incidencias de incendios internacionales reportados, así como el porcentaje de daños producidos por los mismos, haciendo evidente que, aunque los incendios en estructuras (espacios cerrados) no son los de mayor incidencia, si son los que mayores daños y pérdidas producen.

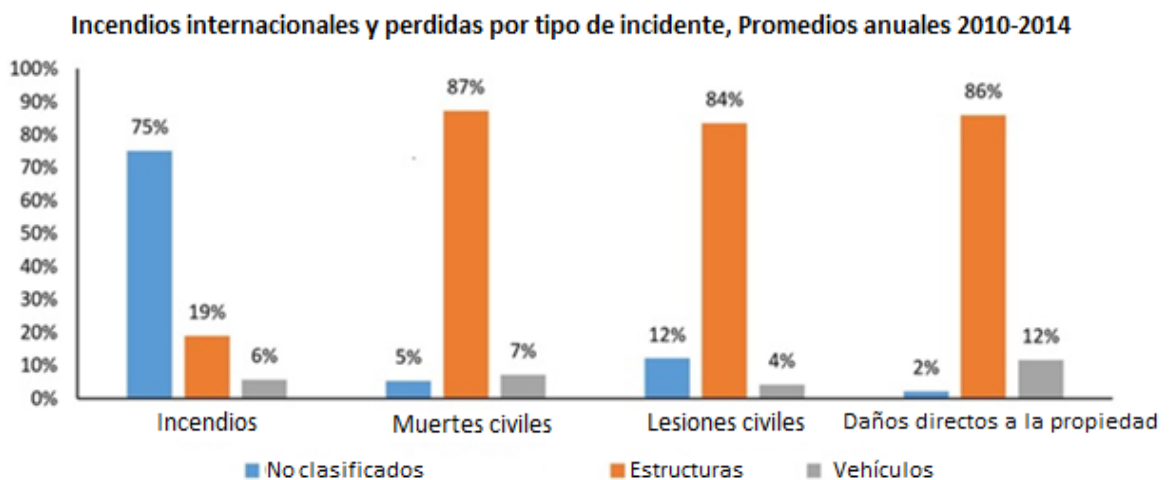


Figura 4-1 Incidencia porcentual de incendios y daños producidos. [13]

La grafica que se muestra tiene como índices de referencia los años entre 2010 a 2014, sin embargo, es un estudio publicado en el mes de julio de 2017. Logrando que a más de uno le llame la atención atender este problema y darle solución.

4.1 Técnicas y métodos actuales usados para la detección de fuego

Como se mencionó anteriormente, varios autores han atendido este problema; en este apartado se exponen algunos artículos científicos en donde se mencionan diversos autores y la forma en como resuelven el problema.

En el Artículo “Study Of Pool Fire Heat Release Rate Using Video Fire Detection” [11], el autor “Arthur Kwok Keung Wong junto a Nai-Kong Fong”, hacen mención a la característica principal de un incendio: las llamas que produce, las cuales nos pueden proporcionar varios datos al realizar un análisis de ellas que ayudan a la comprensión del comportamiento dinámico de un incendio agilizando el desarrollo de una solución para su detección. En dicho trabajo se presenta un enfoque en el análisis de las llamas por video. Primero, adapta el método de Otsu (método para segmentar imágenes), con un sistema Multi-Umbral (con valores calculados del componente de color rojo, denominado plano Rojo de la imagen); después el formato “RGB”, se traslada a escala de grises y se obtiene el histograma de ese plano, para conocer la intensidad de color en los pixeles. Después, por medio de la distribución de Rayleigh, se realiza la segmentación de la imagen, separando el objeto de interés (llamas), del resto del fondo de la imagen, proceso que también realiza con valores de una distribución Normal de todos los valores del histograma utilizando métodos estadísticos (media, peso de clases, varianza y varianza de clases) para obtener los valores que conformaran los valores iniciales, medios y finales del umbral adecuado para separar el objeto de interés del fondo de la imagen. Después de realizar los dos procesos, se hace un análisis de los valores obtenidos en cada uno, además de comparar los resultados de la segmentación para los dos casos, y de esta forma logra obtener los valores adecuados de utiliza en su análisis de las imágenes con fuego, por lo tanto, una segmentación adecuada en ellas. Posteriormente se binariza la imagen para obtener datos más precisos del objeto como lo son: su altura, densidad y volumen (forma).

La metodología utilizada en este artículo es práctica y clara, al hacer mención de sus principales variables en los métodos de segmentación y selección de umbrales óptimos, valores que obtiene de análisis estadísticos y criterio de dispersión de Rayleigh, en el histograma de la imagen en escala de grises, resultados que son combinados para tomar una decisión final de ambos métodos. Otros datos importantes de este artículo son: el escenario de prueba (un laboratorio de experimentación de la universidad de Hong Kong), el tipo de combustible que ocupa para realizar sus pruebas (Propanol Industrial, combustible tipo "A") y forma en que las realiza (con pequeños recipientes de dimensiones: 100mm, 200mm, 300mm y 400mm). Datos que ayudan mucho a la investigación pues dan un ejemplo del cómo se pueden realizar las pruebas de experimentación de una forma adecuada y midiendo riesgos. Como conclusión exponen los autores, que conocer datos como la altura y dispersión de las llamas, proporcionan indicios de la gravedad del incendio y cuanto puede crecer.

Otro proceso con imágenes obtenidas por video se presenta en el documento titulado "A novel algorithm for fire/smoke detection based on Computer Vision" [13], donde se presenta una mejora al análisis de una imagen por colores, con el método de segmentación con disparidad (característica que ayuda a percibir la profundidad del fondo en una imagen). El primer paso es obtener las imágenes usando dos cámaras, de esta manera se pueden combinar las imágenes obtenidas de cada cámara y poder generar una sola. Esta técnica ayuda a la visualización de una superficie al generar una mejor percepción de la profundidad de la imagen obtenida, proceso que resulta eficiente, pero que demanda más tiempo para realizar el procesamiento de las imágenes. Una vez que se tienen las imágenes se utilizan técnicas de visión artificial como: la eliminación de ruido, segmentación y binarización. Lo sobresaliente en este trabajo es que: muestra un mayor porcentaje de acierto al detectar un incendio, con un 20% más de efectividad, que le da la disparidad al obtener las imágenes, comparado con la obtención de imágenes por medio de una sola cámara, ya que con la disparidad se pueden llegar a obtener imágenes 3D, lo que mejora la ubicación del fuego en la imagen, agregando la característica de poder visualizar parcialmente un fondo con tres dimensiones (se dice parcialmente porque aún no existe una herramienta que haga posible completamente esta característica). Según lo describen los autores, de esta forma el análisis es un poco complejo, pero muestra resultados más

confiables. Uno de los inconvenientes que se pueden notar en este trabajo, es que hace mención de un sistema robusto el cual implica más tiempo de ejecución, y aunque aumenta el grado de efectividad simulando disparidad en las imágenes con dos cámaras, esto implica utilizar más recursos. Las pruebas se realizaron en un espacio cerrado, aspecto que ayuda a delimitar la orientación de esta investigación, dejando claro que se dirigirá al análisis de la presencia del fuego en este tipo de escenarios. El mismo artículo expone los principales factores que aún no se atienden de la forma adecuada en la detección de fuego en imágenes, puesto que la presencia de las llamas no tiene un lugar fijo, siempre es inesperada su ubicación; el que tan rápido se logre la detección depende también del ángulo de visión que tenga la cámara que obtiene las imágenes, atendiendo este inconveniente en el artículo plantea un sistema que haga uso de un par de cámaras, que puedan proveer de imágenes al sistema (aunque estas deben encontrarse casi una al lado de la otra), aumentando el ángulo de visión y uniendo las imágenes obtenidas para simular una vista con disparidad. En lo que respecta al procesamiento de las imágenes, primero se separan los objetos de interés (fuego) del fondo, por medio de un mapa de umbral con valores ya establecidos en los planos RGB de la imagen, luego, para eliminar el ruido en las imágenes, se utilizan métodos de binarización donde el cálculo de disparidad de baja resolución rechaza el ruido, lo que ofrece una imagen con un fondo más claro y se puede notar una clara diferencia entre el fondo y el objeto de interés, permitiendo separar ambos con mayor facilidad al notar claramente la diferencia entre ambos en el histograma de la imagen final a segmentar. Las imágenes segmentadas se usan para extraer características que describan al fuego, que posteriormente se clasifican por una red neuro-difusa, que es la encargada de ayudar al sistema al generar una alarma de alerta al detectar fuego. La metodología que emplea este trabajo resalta por aplicar un mapa con valores de color de las imágenes con disparidad, para separar los objetos antes de emplear la binarización de la imagen y extraer objetos de interés con valores de profundidad en el escenario de experimentación. En este artículo se hace mención de un punto importante: la disparidad en imágenes, aunque es un excelente atributo para la detección de incendios, implica más de tiempo de ejecución y también implica más recursos monetarios al incluir dos cámaras.

Siguiendo con la temática de visión por computadora se presenta el artículo “Computer vision based method for real-time fire and flame detection” [14], donde se realiza una

detección de fuego y llamas, además de realizar el análisis del parpadeo en el movimiento de las llamas en el dominio de la transformada de Wavelet. Se describe a la transformada de Wavelet como una herramienta de “Tiempo-Frecuencia”, que se utiliza para realizar un análisis de la frecuencia de la variación de movimiento de los píxeles en una serie de imágenes con presencia de llamas. Esto ayuda a reducir la probabilidad de errores con otro tipo de objetos en una imagen que tengan un color rojo semejante al fuego, pero que no presenta una variación de luminosidad en el color. En una serie de imágenes, se hace mención que la frecuencia de parpadeo de las llamas tiene un valor promedio de 10Hz, independientemente del tipo de combustible. La aparición de objetos con contornos luminosos que tengan una variación de luz (color en los píxeles) superior a 0.5Hz que la mencionada anteriormente, representan un factor posible de presencia de fuego en el análisis del video. En síntesis, en el trabajo mencionado se realiza un análisis de variación de color de píxeles en movimiento de una región de interés (llamas), una vez ya ubicadas las llamas en las imágenes, las cual se obtiene al separar por análisis color (con valores ya establecidos obtenidos de imágenes de prueba con regiones de fuego). El análisis del parpadeo de las llamas se hace cuando este oscila entre $10\text{Hz} \pm 0.5\text{Hz}$ aspecto que requiere de una cámara que ofrezca más de 20Fps (Fotogramas por segundo) si en el 10 fotograma no se encuentra variación es el primer indicio de que no sea fuego. Sin embargo, también es un método que requiere de más tiempo de ejecución al analizar 20 fotogramas por separado y después formar un solo conjunto de ellos. El análisis del parpadeo de las llamas es una característica interesante que resalta en este trabajo, pues de esta forma se tiene mayor certeza del resultado obtenido, aunque no menciona su proceso a detalle para segmentar las imágenes, describe que lo hace mediante un umbral de color, con valores obtenidos de sus pruebas experimentales en imágenes con fuego, una vez más el análisis por medio de planos se encuentra presente en este artículo, por lo tanto se ha considerado este método para esta investigación, como herramienta para realizar la segmentación de imágenes para obtener la región de interés.

Un ejemplo más de la detección de fuego y análisis del parpadeo del fuego lo presentan los mismos autores del artículo anterior con una variante ante el proceso del análisis del parpadeo con el método de “Hidden Markov models” con el título “Flame detection in video using hidden Markov models” [16], El parpadeo de la llama no es constante y varia

en el tiempo, a esta variación se le considera evento aleatorio; primero para establecer los píxeles con valores de fuego, se observa objetos de color rojo y con un contorno luminoso (llamas), después se observa la variación de color que presentan en una secuencia de imágenes, de esta forma se aprecia el parpadeo de las llamas y la frecuencia que posee, gracias a la variación de color en las llamas, explicado en palabras de los autores: un píxel que se encuentre en el borde de una llama que puede aparecer y desaparecer varias veces en un segundo de un video de manera aleatoria tienen el comportamiento característico adecuado para ser procesado con el modelo de Markov. Se opta por este método justificando que si se pretendiese hacer un análisis del parpadeo de las llamas con el Dominio de la transformada de Fourier (como se ha realizado comúnmente en otros trabajos), no sería posible debido a que la transformada de Fourier no cuenta con dominio de tiempo aspecto fundamental para conocer la frecuencia del parpadeo de la llama, pues la variación de color puede ocurrir tan rápido que los picos de su variación son muy pequeños y no serían apreciables en el dominio de Fourier. Para la emisión de la alarma de posible fuego se realiza cumpliendo ciertas condiciones de color y al definir que en las imágenes existe un objeto con una frecuencia de cambio de color en sus píxeles mayor a 10Hz. Un aspecto muy útil para esta investigación es la emisión de la alarma al cumplir condiciones establecidas en valores de color que, aunque no hacen mención de estos valores, en esta investigación se establecerán de acuerdo con pruebas de imágenes con presencia de fuego en ellas, método que se encuentra en los artículos ya mencionados.

En el libro “Incendios forestales en México, Métodos de evaluación” [17], se presenta otra forma para lograr una detección de incendios en el artículo: “Implementación de un algoritmo para la detección de fuegos con imágenes GOES (Satélite Ambiental Operacional Geoestacionario)” [18], este trabajo hace mención de tres criterios para poder decir que existe fuego en una imagen, como primer criterio: dependiendo del valor de color de un píxel se puede estimar su temperatura. La forma para realizar esta estimación de temperatura para un píxel se muestra en la Figura 4-2, la conversión trabaja con imágenes que tienen una variación de color en valores de 0 como valor mínimo a 255 como el valor más alto en una escala de grises (capa que se extrae del formato ‘RGB’, para obtener la escala de color en un solo plano), teniendo un máximo de 256 valores de color y sus correspondientes a temperatura.

RELACIÓN PARA DETERMINAR LA TEMPERATURA DE UN PIXEL

De 0 a 176 (valor del pixel = vp), $T(K) = (660 - vp)/2$, $vp = 660 - 2T(K)$

De 177 a 255, $T(K) = 418 - vp$, $vp = 418 - T(K)$

Figura 4-2 Criterio para determinar la temperatura de un pixel [17].

Además de estimar la temperatura como segundo criterio para que un pixel sea candidato a fuego su temperatura, debe cumplir la condición de ser igual a mayor a un estándar que proponen los autores el cual dependerá de la característica de resolución de la imagen, como tercer criterio. Cuando un pixel cumple el segundo criterio y es candidato a fuego, para reducir el número de errores y no confundir el fuego con pixeles de alta luminosidad, se analiza a sus pixeles vecinos (con una malla de 3x3 pixeles o hasta de 7x7 pixeles), los cuales deben cumplir las características: de no ser candidatos a pixeles de fuego y si poder ser pixeles de fondo. Si al menos el 25% de sus vecinos cumplen con esas características se puede decir que es un pixel de fuego de lo contrario se nulifica su posibilidad. Aunque el trabajo utiliza imágenes satelitales donde un pixel representa una gran cantidad de territorio, estos tres criterios son una buena referencia para poder adaptarse al algoritmo que se desarrolla en esta investigación.

Una forma novedosa para realizar la detección de focos de incendios se presenta en el artículo “Robot para la detección de focos de incendio Flamebot” [18], En este trabajo de hace uso de un robot para poder localizar los puntos de ignición de un incendio, tarea que realiza por medio de sensores infrarrojos para observar la radiación de las llamas regresando como respuesta positiva una variación de voltaje de 0 a 5volts dependiendo la intensidad que perciba, a una tarjeta con cuatro puertos PCI (Interconexión de Componentes Periféricos). Resulta una herramienta útil al poseer dimensiones pequeñas (10.3 centímetros de altura y 38centrimetros ancho por 36 centímetros de cada largo) y con un peso adecuado para poder moverse con agilidad (4.2 Kilogramos), lo que lo convierte en una herramienta apropiada para espacios cerrados. La característica de poder

observar la radiación es un factor que la daría mayor certeza al detectar un incendio al algoritmo planteado, este aspecto sería una buena perspectiva a futuro para la investigación.

4.2 Procesamiento digital de imágenes

Visión Artificial, una disciplina científica presente en la carrera de ingeniería en computación, define métodos, técnicas y algoritmos para adquirir, procesar y comprender imágenes. El propósito de esta disciplina es producir información numérica o simbólica, para poder ser utilizada por un ordenador en operaciones de procesamiento. Esta disciplina pretende que, por medio de las imágenes digitales, cualquier computadora pueda percibir su alrededor. Existen herramientas que nos facilitan el desarrollo estas técnicas, métodos y algoritmos, como los son: MATLAB, SCILAB, PYTHON, OPENCV, entre otras.

Una imagen en visión artificial es representada por vectores bidimensionales “Matrices”, donde cada elemento de la matriz corresponde a un valor de un pixel [20], algunos formatos en los que se pueden guardar las imágenes son:

- TIFF: Tagged Image File Format, formato de archivo informático para almacenar imágenes de mapa de bits.
- JPEG: Joint Photographic Experts Group (JPEG), Grupo Conjunto de Expertos en Fotografía.
- GIF: Formato de intercambio de gráficos.
- BMP: Bitmap windows, imagen en mapa de bits
- PNG: Gráficos de red portátiles, es un formato sin pérdida de información en los bitmaps.
- XWD: X window dump.

Para poder representar una imagen a color (o RGB) se necesita de tres matrices bidimensionales, las cuales son las encargadas de representar los planos de color Rojo, Verde y Azul, donde a un pixel solo se le puede asignar un valor que va desde 0 a 255.

Cuanto más alto sea el valor, la tonalidad de este será más clara, casi igualando el color blanco; por el contrario, si el valor es muy bajo, la tonalidad será más oscura hasta llegar a un color negro [21]. Existen diferentes tipos de matrices para poder representar a una imagen, por ejemplo, la matriz binaria donde los valores solo pueden variar entre 0 y 1, una imagen a escala de grises representada por una matriz de intensidad de color donde los valores varían en un rango de 0 a 255, etc. Cada una de estas representaciones tienen un factor en común, representar el valor de cada uno de los píxeles que conforman a una imagen, dependiendo del tipo de información que se requiera, se decide que formato a utilizar.

El procesamiento digital de imágenes se define como la operación matemática de imágenes por computadora, de acuerdo con el tipo de operaciones (lógicas o aritméticas), se puede considerar el nivel de procesamiento. El objetivo del procesamiento es obtener características notables y sobresalientes que requiera un usuario de una imagen.

Los píxeles en las matrices tienen diferentes tipos de datos, que sirven para realizar diferentes tipos de operaciones con las imágenes, los tipos de datos más usuales son:

- **double:** números en punto flotante (8 bytes por elemento). Las operaciones con este tipo de datos son más precisas por el punto decimal, a diferencia de los de tipo entero. Además, no importa que los números sean positivos o negativos.
- **uint8:** Enteros de 8 bits en el rango de [0,255] (1 byte por elemento). Las operaciones solo pueden arrojar valores enteros como respuesta.
- **logical:** Valores de 0 o 1 (1 bit por elemento). Solo pueden asumir el valor de 0 y de 1 en todas las operaciones con este tipo de dato [22].

Los formatos de compresión de imágenes no representan la información completa de una imagen, dado que al momento de realizar cualquier algoritmo de compresión se pierde información. Para resolver el problema existen métodos y algoritmos que mejoran la calidad en una fotografía, denominados Filtros.

Los filtros son parámetros de comparación aplicados a una imagen, los cuales solo arrojan resultados que cumplan características o parámetros establecidos, disminuyendo información innecesaria en la imagen.

Modelo RGB (Red, Green, Blue)

Un modelo “RGB” se basa en cualquier combinación de los colores primarios, (Red) rojo, (Green) verde, (Blue) azul donde la combinación de los tres colores forman el color blanco y la ausencia de ellos forma el color negro [22] en la Figura 4-3, se ejemplifica lo antes mencionado.

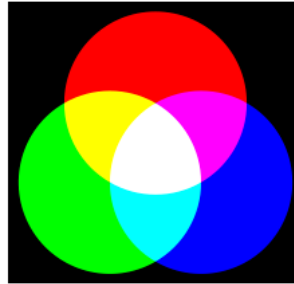


Figura 4-3 Modelo de color RGB

Una imagen con formato RGB es la superposición y combinación de tres matrices con valores distintos en intensidad de color, pero con la misma dimensión en tamaño. En la Figura 4-4, se observa los tres planos representativos de color RGB por 3 planos de intensidad de color en escala de grises, donde cada uno representan la intensidad de color de los tres colores primarios rojo, verde y azul.

La obtención de cada uno de los planos de color es una herramienta adecuada para conocer en que plano tiene mayor saturación de color el objeto de interés que se quiere separar del fondo de la imagen. Al tener definido que objeto de interés se quiere extraer del resto de la imagen, solo se tiene que observar que valor de color tiene en cada plano del formato RGB, sin embargo, se necesita de otra herramienta para conocer e identificar que pixeles pertenecen tanto al objeto de interés como al fondo, esta herramienta es el histograma de una imagen, pero antes de hablar sobre función de un histograma, se menciona la función de la escala de grises en una imagen.

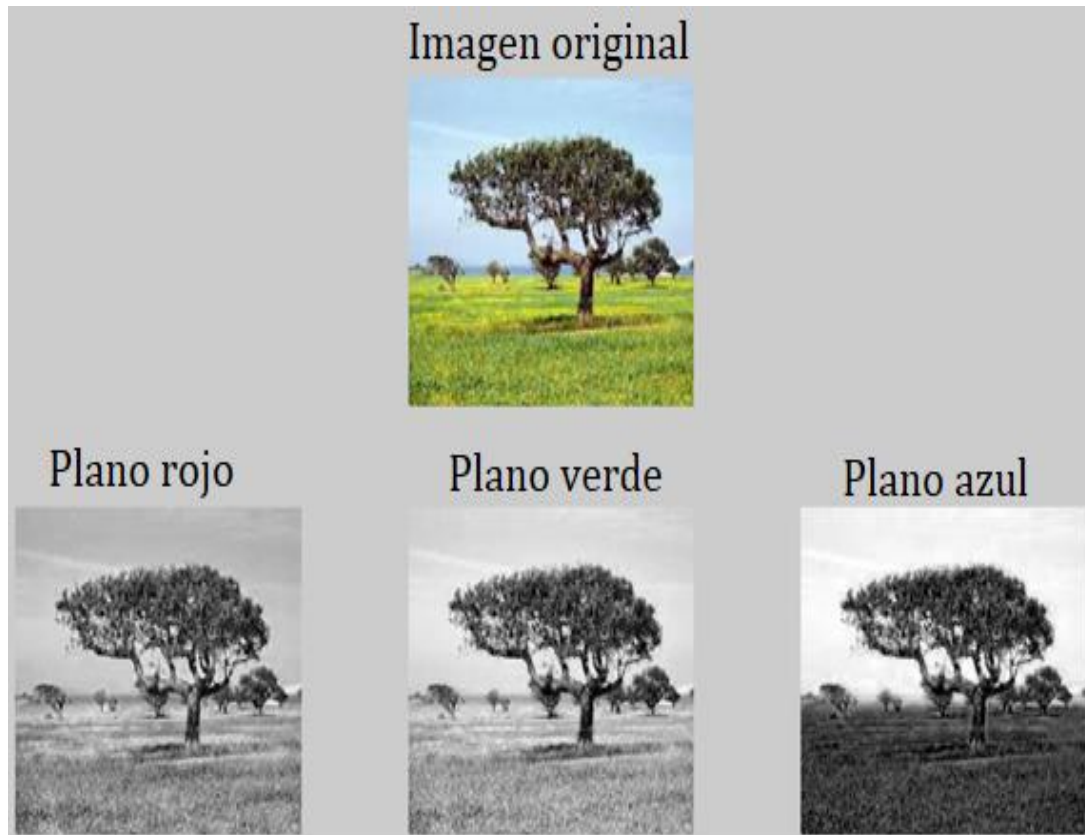


Figura 4-4 Planos que integran al formato RGB.

Escala de Grises

Una imagen a escala de grises se representa por una matriz bimodal, con valores de intensidad variables en un rango de color de tonalidades grises que va 0 (valor asignado al color negro) y 255 (valor asignado al color blanco), que se muestran en un plano. Una imagen a escala de grises es la forma óptima de representar a un modelo RGB, además facilita el trabajo con futuras técnicas aplicadas posteriormente a la imagen, como lo son la binarización y segmentación de imágenes [22], en la Figura 4-5 se aprecia un ejemplo de la escala de grises.

Al obtener la escala de grises de una imagen del formato RGB, se obtiene un solo indicador de la intensidad de color, un punto importante que facilita la aplicación de un análisis de su frecuencia de color.

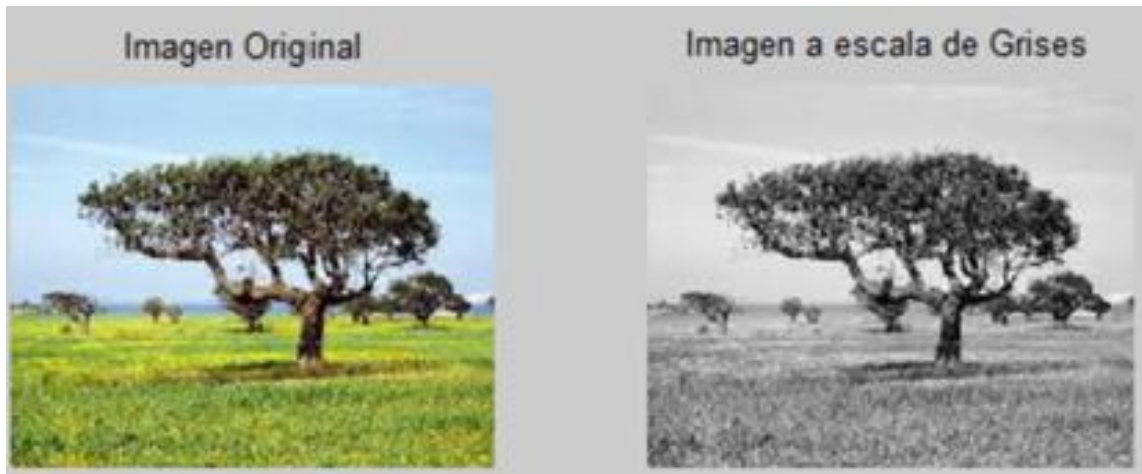


Figura 4-5 Escala de grises de una imagen.

Corrección o Transformación gamma

Generalmente, las cámaras fotográficas agregan una distorsión a la tonalidad y cantidad de luz en una fotografía; esto se debe a problemas técnicos, como el número de colores que pueden percibir sus lentes, etc. Esto genera una alta variación en la tonalidad de sombras y luminosidad en los valores de los píxeles, por lo que para combatir estas variaciones se hace uso de filtros, como la corrección gamma. La función de la transformación de intensidad radica en corregir la intensidad de luz en una imagen, modificando la variación en los valores de los píxeles en una escala de intensidad de luz que va de (0,0) a (1,1), para poder aplicar la transformación gamma a una imagen digital cuyos valores de intensidad de sus píxeles va de [0 a 255], solo se tiene que escalar al intervalo con valores de 0 a 1.

Para ejemplificar lo anterior, en la Figura 4-6, se presenta una imagen de referencia, a la que se aplicará una corrección gamma. Con el factor gamma se puede oscurecer o aclarar una imagen al disminuir o aumentar el valor de intensidad de color en los píxeles. El objetivo del factor gamma es resaltar detalles en una imagen. En la Figura 4-5, se aprecia la aplicación del método transformada de intensidad en niveles de color con factor gamma. Lo anterior permite resaltar distintos tipos de detalles, como sombras, contornos y fondos, características importantes para poder apreciar un objeto de interés del resto de la imagen.



Figura 4-6 Imagen de prueba a la cual se le aplicará la corrección por factor gamma.



Figura 4-7 Transformación gamma aplicada para aclarar y oscurecer la imagen.

Filtros espaciales

En las operaciones pixel a pixel dentro de una imagen, ya sea operaciones lógicas o aritméticas, el resultado que se obtendrá solo dependerá del valor que ya tenía el mismo pixel. En los filtros, las operaciones con los pixeles son diferentes, pues en estos métodos para generar el nuevo valor de un pixel, este no solo dependerá del mismo, sino que ahora dependerá de los pixeles vecinos. Es decir, si se requiere cambiar el valor de un pixel con coordenadas (2,2) dentro de una matriz de 3x3 (por ejemplo), el nuevo valor dependerá de sus pixeles vecinos como lo muestra la Figura 4-8.

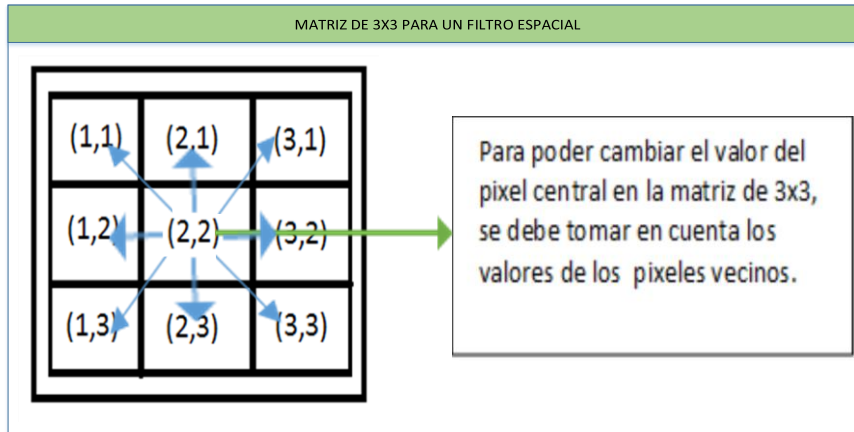


Figura 4-8 Ejemplo de una matriz para un filtro espacial.

En la Figura 4-9 se presenta un ejemplo de un filtro aplicado para suavizar una imagen, donde el valor que toman los pixeles depende del promedio de los pixeles vecinos. Se observa que, al aplicar el filtro, el nuevo valor de sus pixeles cambia conforme al promedio del valor de sus vecinos, ya que no es una operación que se realice pixel a pixel. Se nota, además, que se reduce la variación de color en los valores de los pixeles. Este método resulta útil para limitar el contorno de todos los objetos que se encuentran en una imagen.



Figura 4-9 Aplicación de un filtro espacial.

Histograma

El histograma de una imagen es una herramienta fundamental para la representación y organización de la información en una imagen; muestra el número total de pixeles y su frecuencia en niveles de intensidad en un rango de 0 (valor mínimo) a 255 (valor máximo).

El histograma de una imagen resulta de mucha ayuda para la compresión e interpretación de la información de una imagen, la mejor forma para obtener un histograma es por medio de una imagen a escala de grises. En la Figura 4-10, se muestra una imagen en formato RGB y sus planos de color, que se obtuvieron para poder obtener su histograma.

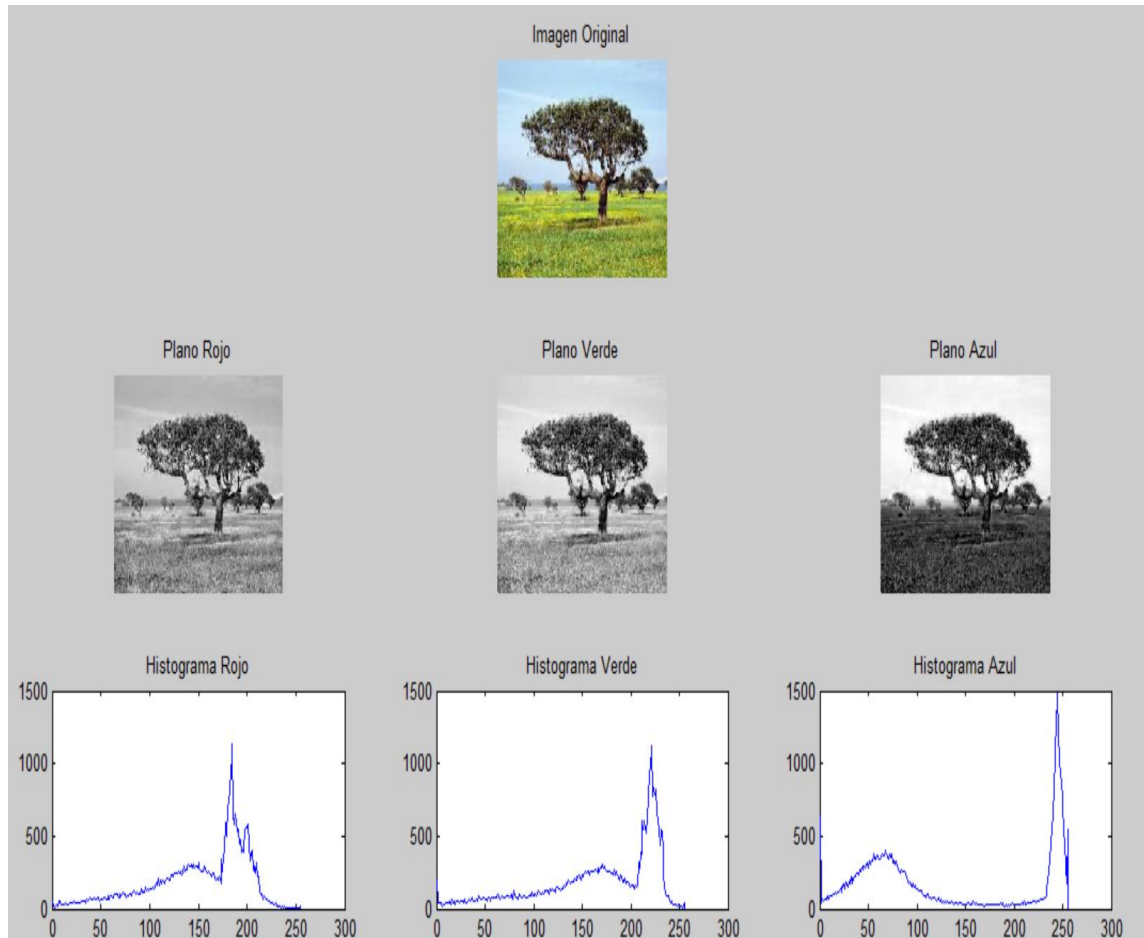


Figura 4-10 Histogramas de los diferentes planos de color Rojo, Verde y Azul.

Con los histogramas de una imagen se puede observar gráficamente los datos de los posibles objetos que hay en una imagen, pues los pixeles donde existe mayor saturación de color se muestran con picos altos y bajos con escaso color en cada uno de los planos. Por ejemplo en la Figura 4-11, se muestra el plano verde de la “Figura 4-6”, su histograma muestra dos variaciones importantes a simple vista, lo cual uno de ellos, el más grande, representa el árbol de la imagen, y la otra variación sobresaliente representa el color verde del pasto.



Figura 4-11 Correspondencia de los pixeles a los objetos en la imagen.

Umbrales

Un umbral en el tratamiento de imágenes digitales es el valor óptimo que permite identificar y separar la información de interés en una imagen. Tal como lo son bordes, fondo y objetos. La técnica para escoger un umbral óptimo se llama Umbralización [24]. Uno de los métodos más eficientes para identificar un umbral, es por medio del análisis estadístico de los valores de los pixeles del histograma

Umbralización.

La Umbralización es una técnica en el tratamiento digital de imágenes que permite, entre otras cosas, la separación de los objetos de interés con el fondo [25]. Es una técnica muy eficiente y rápida para la segmentación en imágenes al separar los datos de interés por medio de un valor definido (Umbral).

Cada uno de los métodos y técnicas descritas (corrección o transformación gamma, filtros espaciales, formato RGB, escala de grises, histogramas y Umbralización), forman parte del desarrollo del algoritmo que se realiza en esta investigación, se toma la decisión de elegirlos, debido a la referencia de su presencia recurrente que existe en la literatura

analizada y la confiabilidad que presentan en sus resultados, dejando en claro que las técnicas se adaptaran según lo demanda el desarrollo del algoritmo.

Tomando como referencia la estructura de los trabajos literarios analizados en el estado del arte, se observó que las técnicas que cuentan presentes con mayor frecuencia en ellos, técnicas que con el desarrollo de esta investigación se fueron adaptando, para establecer la estructura del algoritmo propuesto.

.

5 METODOLOGÍA

En este apartado se describe la metodología utilizada para el desarrollo de la investigación, la secuencia de procesos que conforman al algoritmo y su validez, sometidas a pruebas experimentales para verificar su funcionamiento en la práctica, así como los requerimientos que se ocuparon para su desarrollo.

5.1 Requerimientos o especificaciones

El Software que se utiliza como herramienta para la elaboración del algoritmo, de la investigación es MATLAB/SIMULIK®, utilizando una licencia de estudiante.

Los requisitos de sistema que MATLAB/ SIMULIK® solicita para el sistema operativo Windows 8.X o posteriores son [26]:

- Procesador Intel o AMD x86-64
- De 2 a 6 GB de almacenamiento para instalación de MATLAB
- 2 GB de memoria RAM
- No requiere de tarjeta de gráficos específica.

Para el desarrollo del proyecto se empleó un ordenador con las siguientes características:

- Procesador Intel Core i7.
- Memoria RAM de 8 GB.
- Disco duro de 256 GB, con un espacio de almacenamiento disponible de 4 a 8 GB para MATLAB.

El algoritmo plantea usar cámaras digitales convencionales que puedan ofrecer una resolución de imagen mayor o igual a 720p para tener una resolución de 1280 x 720 pixeles (p) o superior. En la investigación se usó una cámara con resolución de imagen 720 p.

La plataforma del software MATLAB/SIMULIK®, ofrece una opción viable para el desarrollo y la programación del algoritmo propuesto, ya que cuenta con una amplia gama

de herramientas para el trabajo con matrices y varias funciones para los algoritmos que ya se encuentran incorporadas en los recursos de las bibliotecas (o cajas de herramientas, como se denomina comúnmente; en inglés *toolboxes*).

Se utilizaron imágenes con y sin la presencia de fuego, específicamente capturadas mediante la cámara mencionada para la realización de la experimentación, es decir, imágenes propias realizadas especialmente para esta investigación.

5.2 Diseño e implementación

El desarrollo de la investigación se muestra en el diagrama de flujo de la Figura 5-1, también se muestran los pasos generales para el desarrollo del algoritmo.

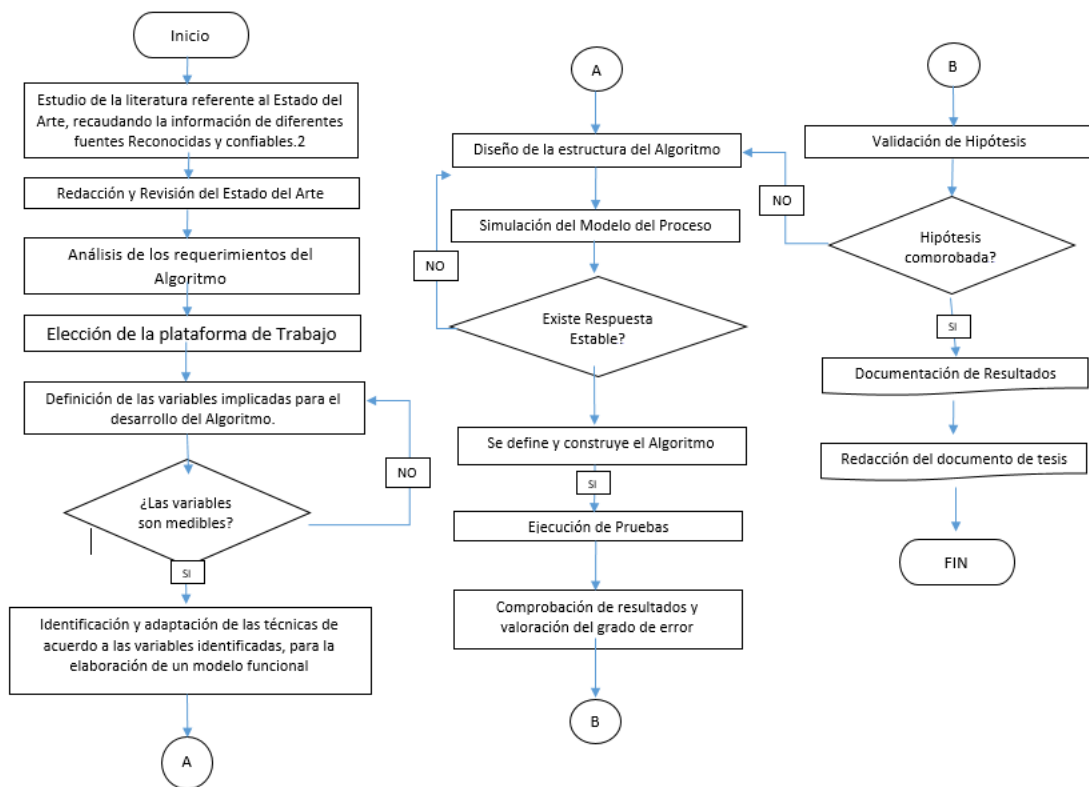


Figura 5-1 Metodología de la investigación en un diagrama de flujo.

El desarrollo general del algoritmo se muestra en el diagrama de bloques de la Figura 5-2, el cual se implementó con base en las técnicas de procesamiento de imágenes presentes en los trabajos citados en el estado del arte y adaptadas a las características de esta investigación. El desarrollo consta de cuatro etapas o procesos principales que realiza el algoritmo, las cuales se describen a continuación:

- Corrección digital: se aplican dos filtros en la imagen (corrección gamma y filtro de mediana), para mejorar la información en la imagen.
- Detección por color: se realiza un análisis de color para los eliminar objetos que no cumplan las características del umbral de color RGB.
- Sustracción de fondo: localización de regiones de interés, que cumplan con las condiciones de la detección por color.
- Segmentación: separación de acuerdo con características establecidas de las llamas del fuego de los objetos que se obtienen en la sustracción de fondo.

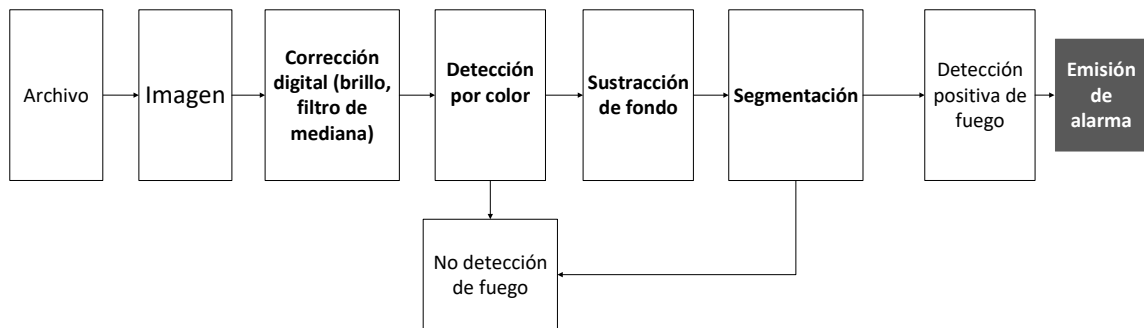


Figura 5-2 Diagrama de bloques de la estructura del algoritmo.

Se establecieron cuatro características que se deben presentar las llamas del fuego para que pueda ser emitida la alarma del algoritmo, las cuales son:

- Luminosidad: existe una variación notable de luminosidad en la imagen.
- Presencia: presencia de un elemento que no estaba en la imagen.
- Color: la principal característica del fuego es tener un color muy vivo, dominante en el plano rojo de una imagen RGB, presencia media en el plano verde y muy poca presencia en el plano azul.

- Forma: debido a su comportamiento dinámico las llamas que constituyen al fuego carecen de una forma regular como la de los triángulos, cuadrados o círculos.

Se utilizó además un banco de imágenes con y sin presencia de fuego para establecer los valores del umbral en espacios cerrados. La información se resume en la Tabla 1, donde en tres escenarios con variación de luz se tomaron fotos de cada uno con y sin la presencia de fuego.

Tabla 1 Escenarios para la base de datos del umbral de color.

Escenario	No. De fotos	Presencia de fuego	
		Fotos con presencia	Fotos sin presencia
1	120	105	15
2	120	105	15
3	120	105	15

Las fotos con presencia de fuego se utilizan para el análisis de color de las llamas del fuego, mientras que las que no cuentan con presencia de fuego se utilizan para observar la variación de luminosidad del escenario.

El diseño del funcionamiento del algoritmo se muestra en la Figura 5-3 donde se incluyen las cuatro etapas de procesos para la detección positiva de llamas que produce el fuego en un incendio. Los procesos que sigue el algoritmo se describen a continuación:

Corrección digital de la imagen (aplicación de filtros)

Por lo regular, una cámara digital tiene una percepción distinta a como lo hace el ojo humano. Por lo general al capturar una fotografía, una cámara digital agrega una distorsión de color y luminosidad a la imagen obtenida, debido a sus características técnicas. La aplicación de filtros a una imagen digital tiene la función de lograr una mejor percepción de la imagen, que por ejemplo permita resaltar detalles como: sombras, contornos y

luminosidad. Como resultado de esto, se tiene una imagen con mayor nitidez y enfoque, adecuando la percepción de la imagen, mejorarle su calidad digital.

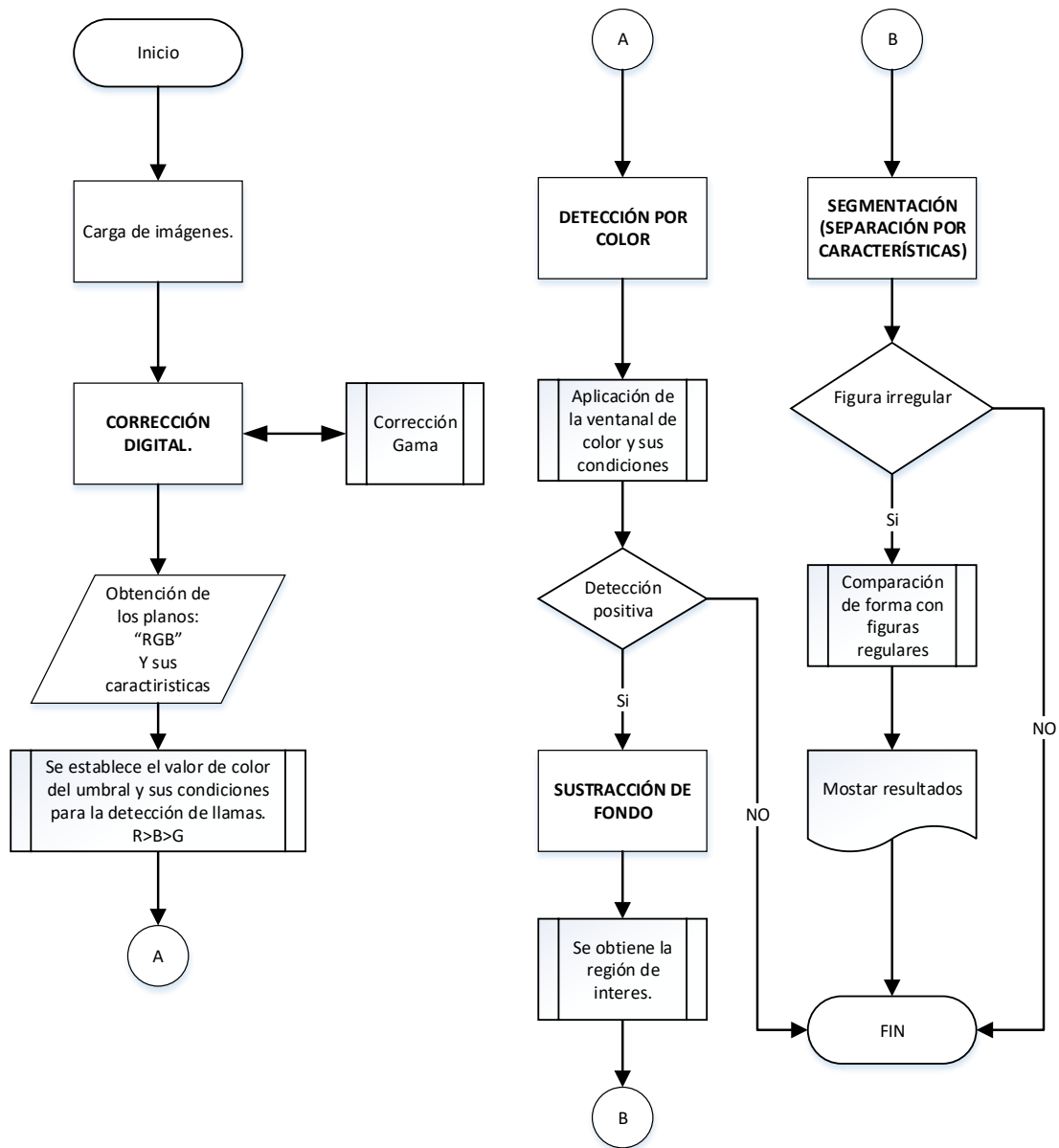


Figura 5-3 Diagrama de flujo del algoritmo del orden de los procesos del algoritmo.

Corrección Gamma

El filtro Corrección Gamma, tiene como objetivo de aumentar o disminuir la luminosidad de una imagen adecuándola para poder ser percibida con facilidad por el ojo humano y tener información más precisa en su histograma, por medio de la corrección del contraste, en el valor de los píxeles de la imagen, sin importar su ubicación, solo su valor. El resultado de esto es una mejor percepción de los objetos y del fondo al aclarar el color de los píxeles de la imagen, no solo en la imagen sino también en el histograma de esta. Se expresa en una forma general con la ecuación Ec 1:

$$V_{out} = V_{in}^{\gamma} \quad \text{Ec 1}$$

Donde:

V_{out} → Nuevos valores de salida de los píxeles.

V_{in}^{γ} → Valores de entrada o valores originales de los píxeles,
elevados al exponente Gamma.

Dependiendo del valor de Gamma en la ecuación, se establecen tres condiciones de variación que tendrán los valores de intensidad de color de salida respecto a los de entrada en la imagen; en la Figura 5-4 se muestran tales condiciones:

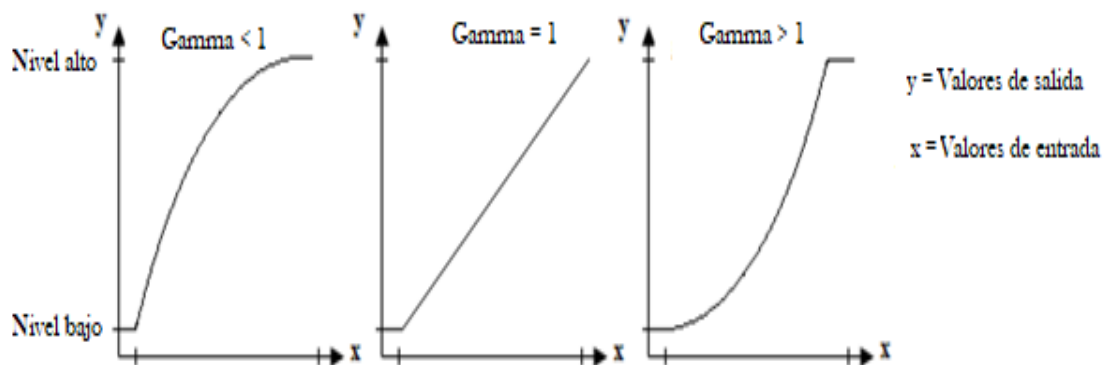


Figura 5-4 Variación de gamma y sus valores de salida.

Las tres condiciones dicen lo siguiente:

1. Cuando Gamma es menor que uno, el valor de salida de los pixeles será altos (se acerca al color blanco); en pocas palabras la imagen se aclara.
2. Si Gamma es igual a uno los valores de salida serán igual a los de entrada. No hay cambio en la imagen.
3. Cuando Gamma es mayor que uno, el valor de salida de los pixeles tendrá un valor bajo (se acerca al color negro); en pocas palabras la imagen se oscurece.

Además, con la ayuda del histograma de la imagen se sabe que, si la información del histograma se desplaza a la derecha, la imagen se aclara, mientras que, si se desplaza a la izquierda, la imagen se oscurece. Dependiendo la condición que se requiera en la imagen, para lograr una mejor percepción visual, se debe utilizar el filtro de corrección gamma.

De los cuatro escenarios se utilizaron para el desarrollo de la investigación, se toman dos de ellos como ejemplo, donde se nota mayor diferencia de luminosidad en la imagen, se aplica el filtro de corrección Gamma en ellos para mejorar la información de la imagen. La Figura 5-5 muestra un escenario con alta luminosidad en su interior (170 lúmenes).



Figura 5-5 Escenario 4 de monitorización: área con buena iluminación (170 Lúmenes)

En la Figura 5-6, se muestra el histograma con la información de la imagen del Escenario4; se puede observar en la gráfica del histograma que la mayoría de pixeles se encuentran

comprendidos con valores de intensidad de color entre 40 y 210, lo que se traduce a una buena percepción del escenario, pero no se pueden apreciar los límites de todos los objetos que se encuentran en la imagen en el histograma, pues la información que muestra tiene variaciones con valores altos que no permiten conocer cuál es el fondo entre los diferentes objetos que hay en la escena.

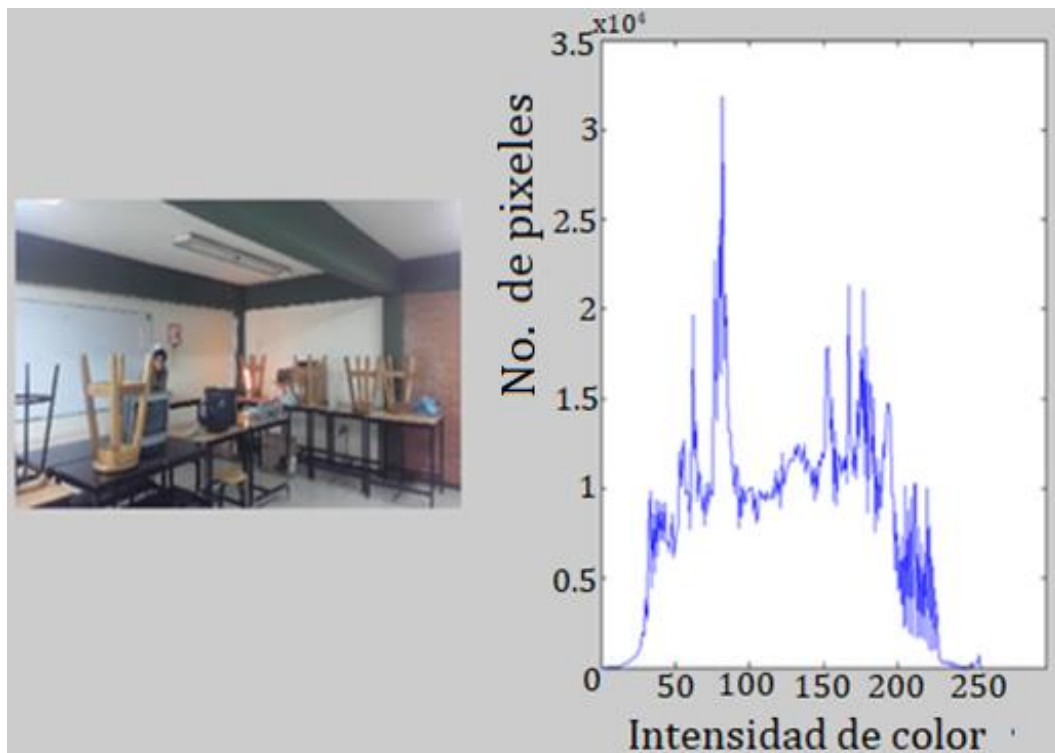


Figura 5-6 Histograma del Escenario 4

Después de la aplicación del filtro de corrección Gamma, se obtienen los resultados que se muestran en la Figura 5-7. Como se puede apreciar en la primera imagen, se muestra el resultado de aumentar el valor de intensidad de color de los pixeles en una escena con buena luminosidad. Como resultado de este proceso se obtiene una imagen con mejor percepción visual; sin embargo, la información que muestra su histograma se distorsiona, presentando pixeles con valores más altos de intensidad a los que ya tenían: esto no permite identificar objetos del fondo, ya que, con variaciones de niveles de intensidad de color altos, la información de los pixeles tendrá valores muy cercanos al color del fondo, lo que no permite percibir bordes o límites de objetos en la imagen.

En la segunda imagen que muestra la Figura 5-7, se percibe un cambio en su histograma, a comparación de la primera imagen, pues los límites de los objetos se pueden apreciar con una variación de valores de píxeles casi nula, lo que es un indicativo de dónde comienza y dónde terminan los objetos con tal valor de intensidad de color (contornos). Además, se obtiene una imagen visualmente con mayor contraste y colores más sólidos, lo que facilita la separación de objetos del resto del fondo: información que, para el proceso de segmentación, es la materia prima.

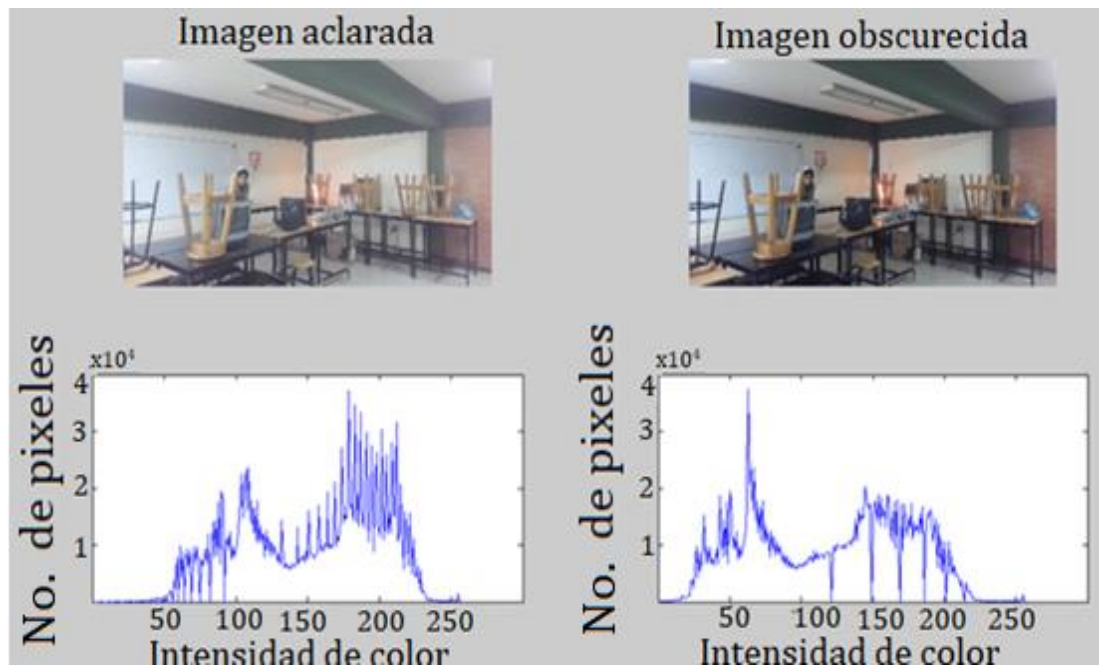


Figura 5-7 Resultados del filtro corrección Gamma en el escenario 4.

A partir de lo expuesto en los párrafos anteriores, se llega a la conclusión de que, en espacios cerrados con buena luminosidad, aplicar el filtro de corrección Gamma mayor a uno y oscurecer la imagen es una buena técnica para resaltar detalles como: colores sólidos, límites y bordes de los objetos al resto del fondo, no solo para lograr una mejor percepción visual del escenario, sino que también se obtiene información clara en el histograma de la imagen.

Por otro lado, existen espacios cerrados con poca o nula luminosidad, como lo muestra la Figura 5-8, donde el uso del filtro corrección Gamma, se utiliza para aclarar la imagen y

tener como resultado una percepción visual, así como también para obtener información precisa y clara en el histograma de la imagen.



Figura 5-8 Escenario 4 de monitorización.

El histograma con la información del Escenario 4 se muestra en la Figura 5-9; se observa que la información se encuentra concentrada y saturada en valores bajos debido a la baja luminosidad que tiene la escena, dificultando la percepción tanto del fondo como la de los objetos en la imagen. Sin embargo, con esta característica resulta más fácil percibir los objetos luminosos, lo que puede ocasionar un error de detección al confundir la característica de gran luminosidad del fuego con entradas de luz al espacio cerrado, debido a que la diferencia de color entre ellos es casi nula y no se puede apreciar con facilidad, atendiendo a este evento se mejora la luminosidad del escenario y los colores de cada elemento en la imagen puedan apreciarse tanto visualmente, como en el histograma de la imagen.

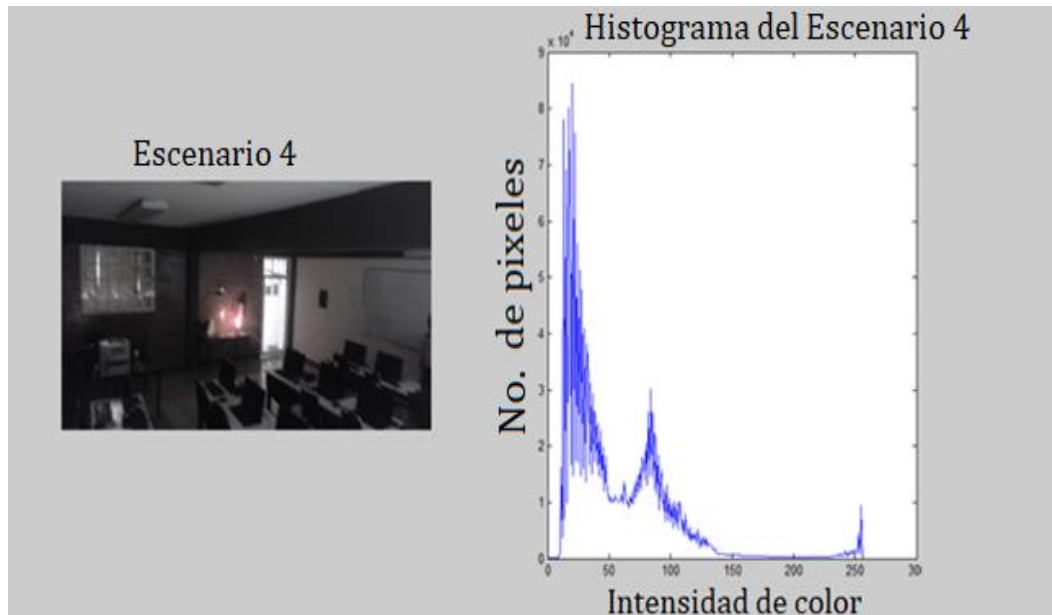


Figura 5-9 Histograma del Escenario 4

Los resultados después de aplicar el filtro corrección Gamma en la imagen del escenario 4 se muestran en la Figura 5-7, donde en la primera imagen se aplicó el filtro para aclarar la imagen, aumentando los valores de intensidad de color en los pixeles. Como resultado de ello, se tiene una imagen con una diferencia de color marcada de cada elemento en la imagen y una mejor percepción visual, además de que el histograma muestra información no saturada con valores bajos, con mayor diferencia entre cada nivel de intensidad, y color con límites de grupos de pixeles que se denotan por la ausencia de pixeles con cierto valor de intensidad.

En la segunda imagen de la Figura 5-7, que muestra como resultado los valores de intensidad de color de los pixeles, estos tienen un nivel más bajo del que tenían originalmente, dificultando la visibilidad de la imagen y saturando la información en los niveles bajos de color. De aquí se deduce que este proceso no es recomendable para los espacios cerrados con poca luminosidad.

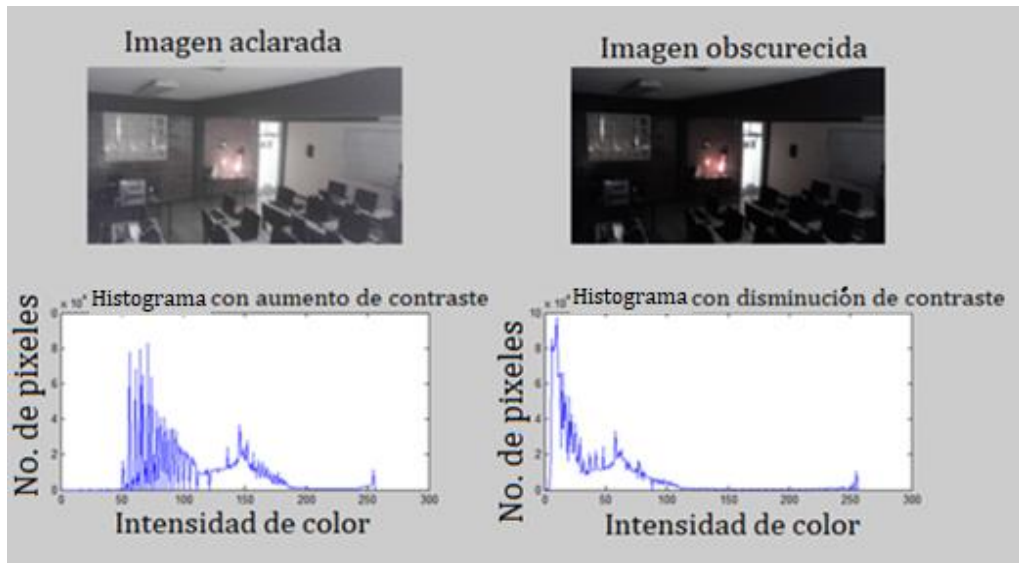


Figura 5-10 Resultados del filtro corrección Gamma en el escenario 4.

La diferencia entre histogramas se puede observar en la Figura 5-11.

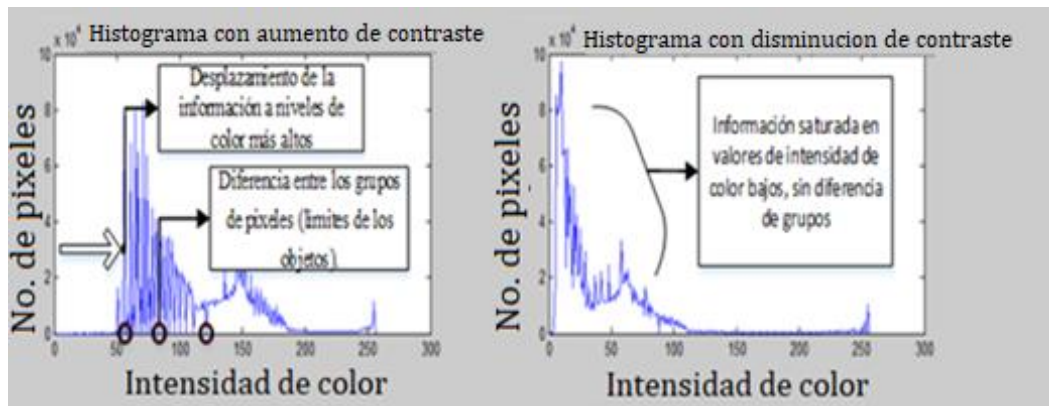


Figura 5-11 Histogramas del escenario 4 con aumento y disminución de contraste.

Adecuando esta técnica según lo requiera el escenario de monitorización, las imágenes obtenidas pueden ser mejoradas notablemente, incrementando la percepción visual y la información que proporciona el histograma, compensando o disminuyendo el valor de luminosidad en los píxeles de la imagen. Teniendo en cuenta que en los espacios cerrados la variación de luminosidad es un factor siempre presente, se eligió esta técnica para mejorar la calidad digital de las imágenes de esta investigación.

Detección por color

En esta investigación, al utilizar una cámara digital de espectro visible, se realiza la detección de fuego por color, aprovechando las principales características del fuego: poseer colores vivos en el modelo RGB (valores altos en el color rojo, altos a medios en el color verde y bajos en el color azul), una ubicación constante una vez que alcance su desarrollo (aunque esta ubicación siempre es un factor variante), parpadeo continuo que se traduce a un tamaño siempre dinámico. Estas características permiten detectar y separar el fuego de otros elementos de la imagen.

Con base en los documentos analizados en el estado del arte, que realizan una detección por color, y por la experimentación propia de esta investigación, se estableció una ventana de color para el proceso de detección de fuego por color en imágenes digitales con el modelo RGB. Para ello, se eligieron cinco escenarios de monitorización para probar la clasificación de fuego por color y se seleccionaron 35 imágenes de cada uno donde se observó fuego y 5 donde no se observó, para obtener el valor del umbral de color. El desarrollo de este proceso se describe a continuación.

El fuego tiene una variación de color característica que va desde el rojo, naranja y amarillo, siendo estos la combinación de intensidad de color de los tres colores primarios en diferentes intensidades de color [27]. En la Figura 5-12, se muestran los tres planos de color que representan a los colores primarios, que conforman una la imagen con formato RGB, además de la información de valores de intensidad color de los pixeles de cada plano, por medio de su histograma.

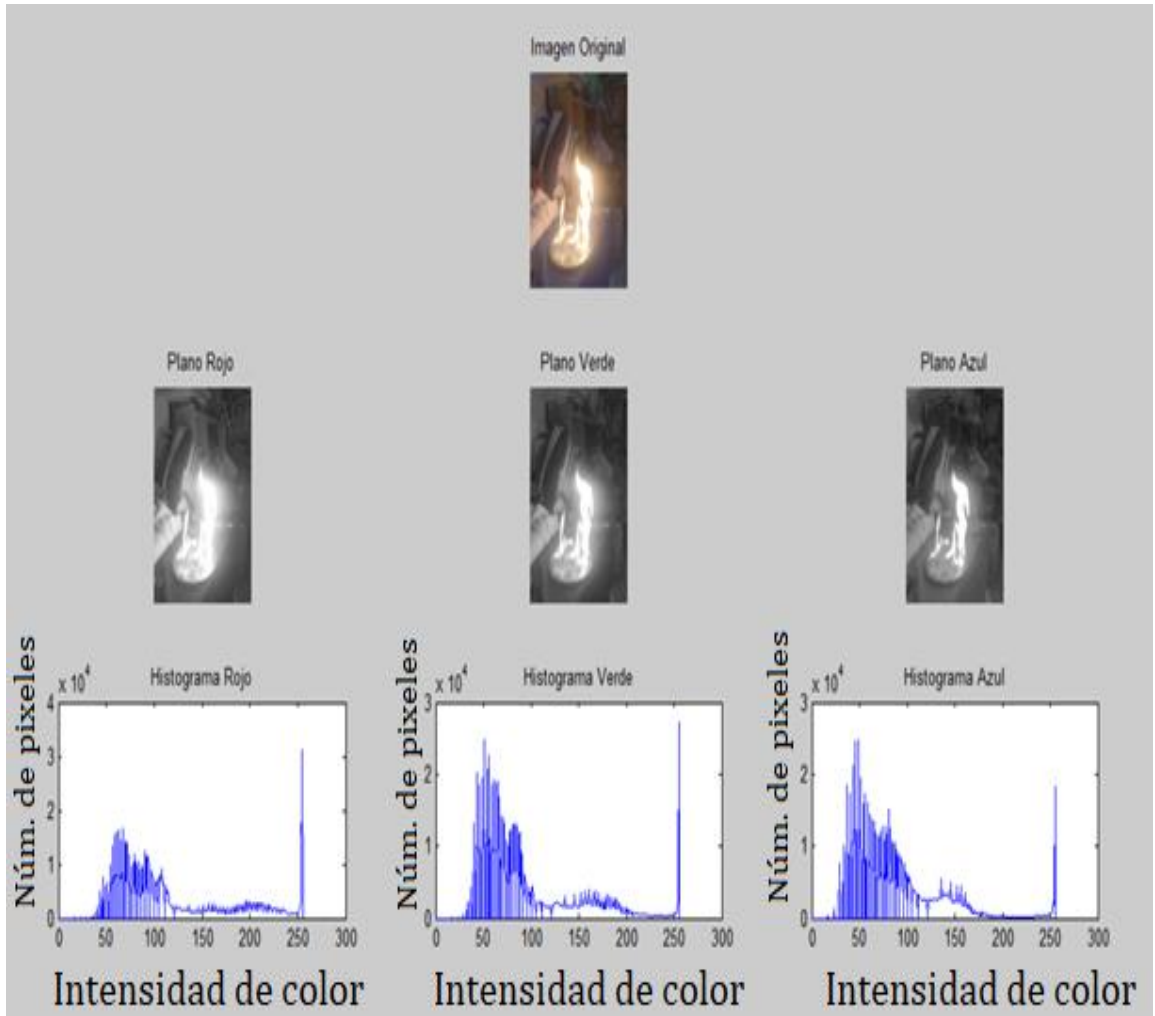


Figura 5-12 Escenario 1 con sus planos de color y su histograma.

Cada histograma guarda distinta información de los elementos que hay en la imagen, cada elemento se representa por un determinado nivel de intensidad de color en cada plano, lo que significa que cada elemento en la imagen tiene tres valores de intensidad color: uno por cada plano. Por esta razón, aunque los tres planos conforman la imagen, los tres los histogramas de cada uno son diferentes, como lo muestra la

Figura 5-13 Gráficas de color en tres dimensiones., así que para poder ubicar un objeto de interés en la imagen se necesita conocer los tres valores que lo conforman. Como para esta investigación el objeto de interés es el fuego, entonces se necesita conocer los valores que tiene en cada plano. Estos valores establecen una frontera de color, la cual sirve para

clasificar a un elemento (objeto), como: fuego o no-fuego, con la condición de que para que un elemento sea considerado como fuego, este debe tener valores de intensidad de color que estén dentro del intervalo de los valores de la frontera de color, denominada umbral.

El histograma de una imagen muestra toda la información de los píxeles de dicha por medio una gráfica en dos dimensiones, donde en el eje horizontal muestra la de color y el eje vertical muestra el número de píxeles que tienen ese valor de intensidad de color. Esto constituye una buena herramienta para el análisis de la información de la imagen, proceso que se detalla en el apartado 5.3. En este trabajo, para la detección por color se utilizan gráficas 3D para conocer la diferencia de valores de intensidad de color entre cada plano del modelo RGB, de una forma visualmente más clara que en el histograma en dos dimensiones. Las gráficas 3D que se muestran en la

Figura 5-13 Gráficas de color en tres dimensiones., sirven para conocer la variación entre la intensidad de color que tiene cada elemento en la imagen, mostrando la cantidad de información de nivel de color en cada uno. En el caso de interés de la investigación mejora la percepción de los colores del fuego y sus elementos.

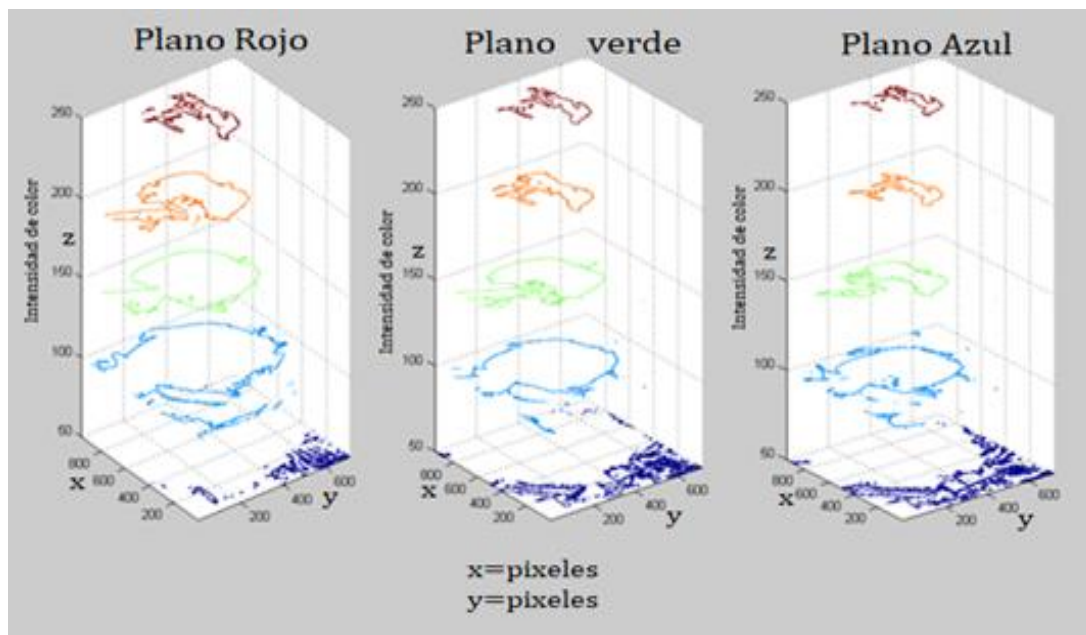


Figura 5-13 Gráficas de color en tres dimensiones.

Haciendo un análisis de las gráficas anteriores se obtiene la siguiente información en los planos de color, que se explican con mayor detalle en la Figura 5-14: Plano rojo: presencia del fuego con alto nivel de color, gran parte de cuerpo y del contorno del fuego. Plano azul: poca presencia del color de la parte central del cuerpo, con un alto nivel de color, y mayor presencia en el color del fondo de la imagen. Plano verde: presencia media de pixeles de color, en el cuerpo y en el contorno del fuego, con valores altos de intensidad (Figura 5-15).

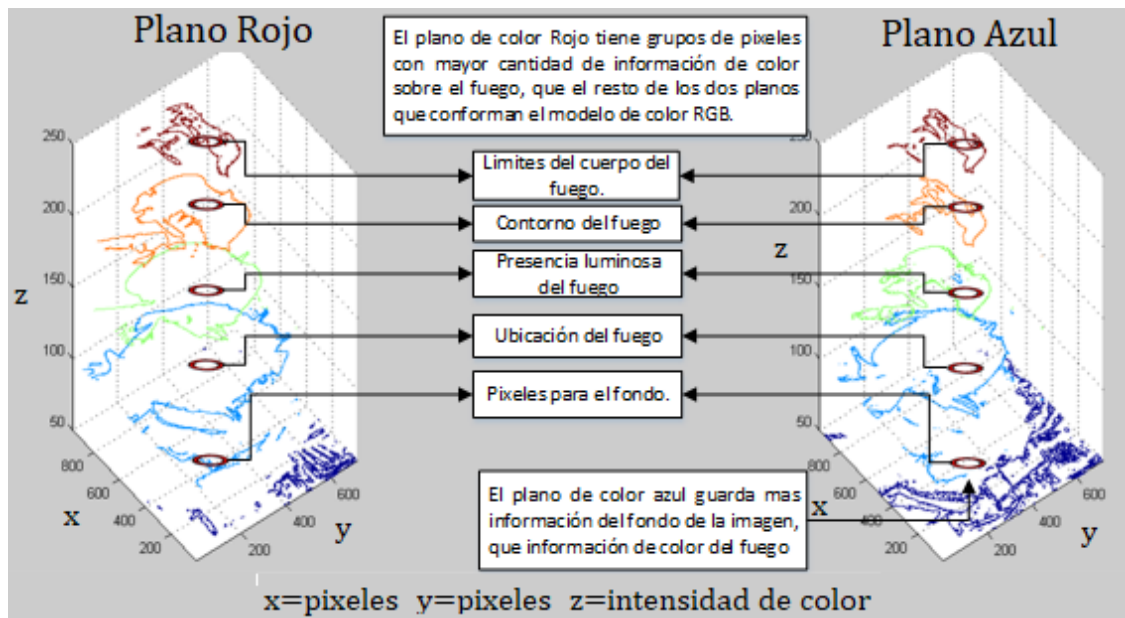


Figura 5-14 Información del fuego en los planos de color rojo y azul.

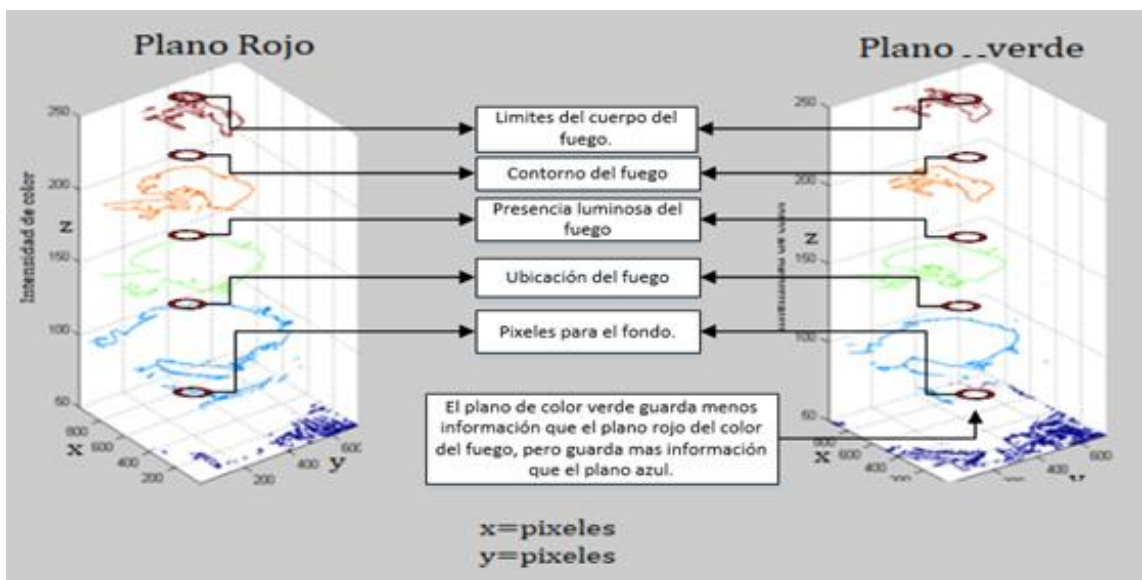


Figura 5-15 Información del fuego en los planos de color rojo y verde.

Después de conocer la cantidad de píxeles y la intensidad de color presente en cada plano, se obtienen los valores de la ventana de color para detectar el fuego en las imágenes.

Como resultado de la aplicación del umbral de color se obtiene una región de interés Figura 5-16, con la cual se puede ver en color negro el objeto de interés en la imagen.

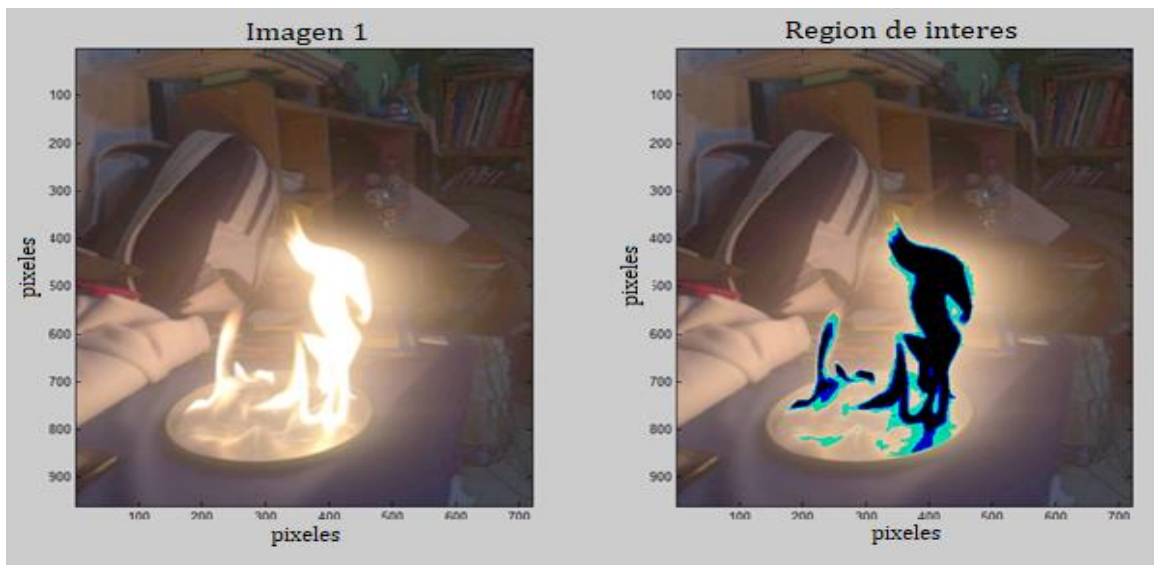


Figura 5-16 Región de interés del Escenario 1

Sustracción de fondo

Una vez que se identificó la región de interés en la imagen por medio de la detección por color, esta se debe separar del resto del fondo de la imagen para poder analizar sus características y comprobar que esta región corresponde a la presencia de fuego. Tomando como referencia a la imagen de la Figura 5-16, donde la región de interés se muestra en color negro para poder identificarla del fondo, en la Figura 5-17 solo se conserva el color de la región de interés, igualando a cero los valores de los demás píxeles del fondo.

Una vez que se tiene la región de interés con las propiedades de color que establece la frontera de color RGB, su puede utilizar el resultado para realizar el análisis de sus características en el proceso de segmentación.

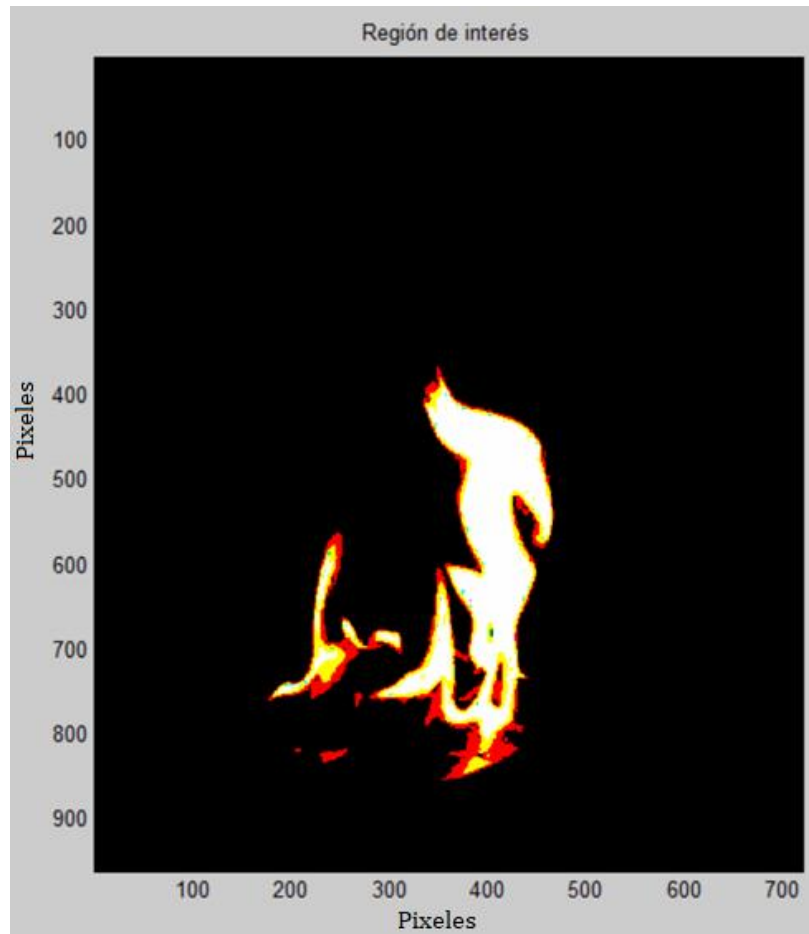


Figura 5-17 Región de interés con propiedades de color.

Segmentación

Para este proceso se utiliza la técnica de binarización de imágenes por medio de un umbral, que separa la región de interés del resto de elementos de la imagen (fondo), igualando a uno los valores de los píxeles de la región de interés y a cero los valores de los demás píxeles que pertenezcan al fondo de la imagen. Para este proceso se utiliza el método de Otsu, adaptándolo a los requerimientos de la investigación, pues según un estudio de la asociación argentina de mecánica computacional, el método Otsu tiene un mejor comportamiento en imágenes con histogramas no-bimodales [28], característica que tienen los histogramas de las imágenes de esta investigación.

Método Otsu

El método Otsu se basa en varianzas obtenidas del histograma de una imagen; primero divide a la información del histograma en dos grupos o conjuntos: uno para la región de interés y otro para el resto de la imagen denominado fondo, los cuales se separan por medio de un valor denominado como umbral.

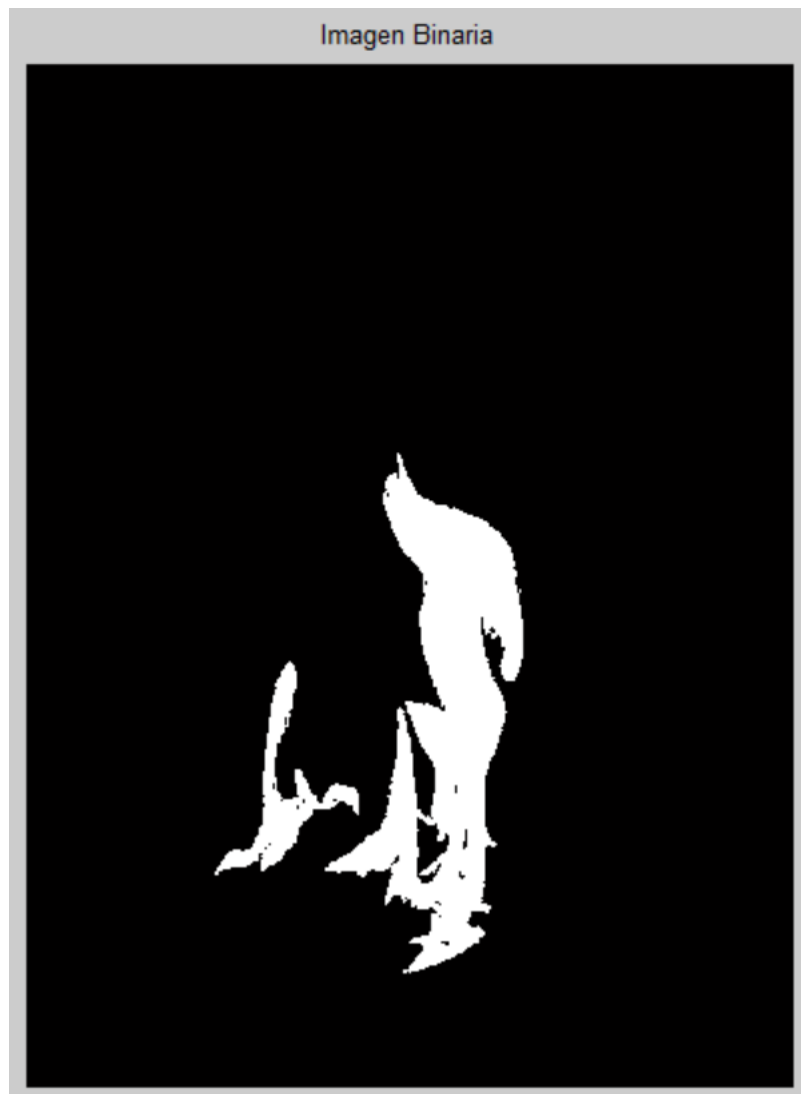


Figura 5-18 Imagen binaria de la región de interés

Una vez que se tiene la imagen binaria de la región de interés, se realizan las últimas comparaciones entre las características del fuego y la región de interés como lo son: el tamaño y la forma.

Para efectuar lo mencionado en el párrafo anterior, primero es necesario ubicar y contar los objetos en la región de interés, como lo muestra la Figura 5-19, donde cada objeto encontrado tiene marcado de color rojo su contorno, además de que cada objeto se muestra en un recuadro verde que lo encierra para mostrar su ubicación en la imagen.

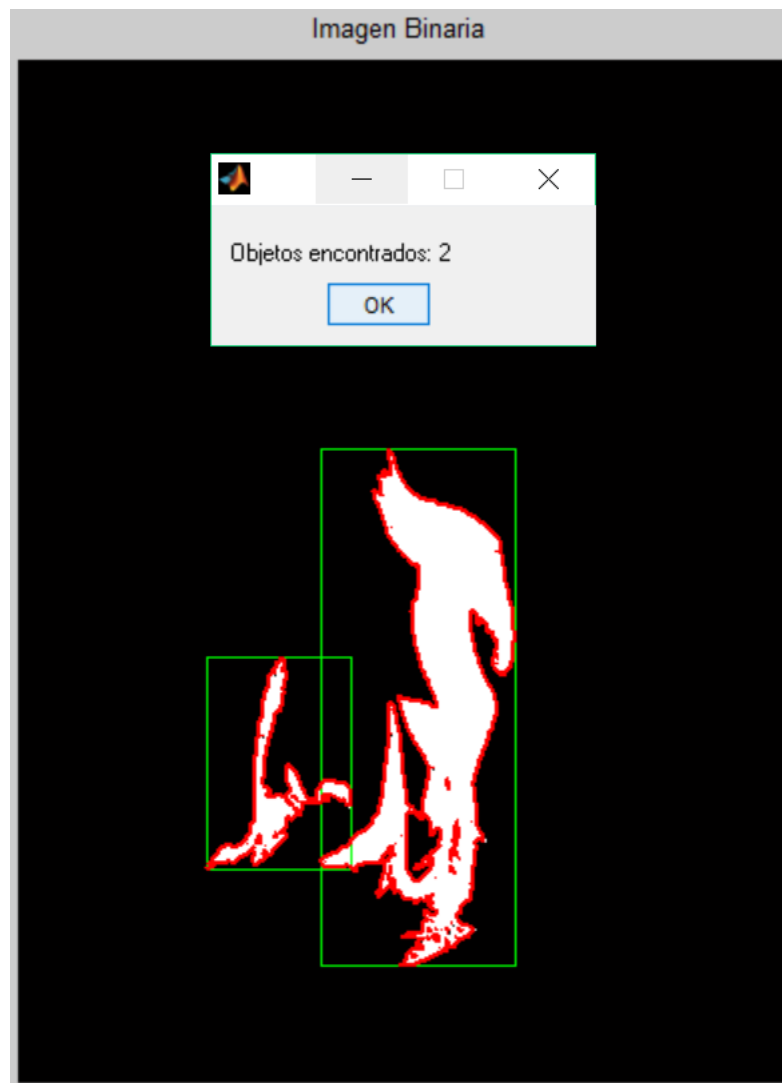


Figura 5-19 Objetos encontrados en la región de interés.

Posteriormente, se obtienen las características geométricas de los objetos encontrados: área, perímetro y centroide; estos datos se muestran en la Figura 5-20.

Field ▲	Value	Min	Max
Area	4967	4967	4967
Centroid	[242.2190,683.4653]	242.21...	683.46...
BoundingBox	[177.5000,561.5000,13...	136	561.50...
Perimeter	857.6955	857.69...	857.69...

Figura 5-20 Propiedades de los objetos encontrados.

Los datos geométricos se utilizan para la última comparación de las características del fuego: la forma. Como se ha dicho en secciones precedentes, la forma del fuego no es una figura geométrica regular, como sí lo son los círculos, triángulos o cuadrados. La forma del fuego es muy diversa y dinámica, no tiene un número de lados definidos y estos tampoco son iguales. Para esta última operación, se compara la forma de los objetos encontrados, contra la forma de tres figuras geométricas regulares, el círculo, el triángulo y el cuadrado, por el método del cálculo de la circularidad, de estas figuras por medio de la ecuación Ec 2:

$$c = \frac{A}{p^2} \quad \text{Ec 2}$$

Donde:

- A= área de la figura
- p=perímetro de la figura

En la Figura 5-21 se muestra un ejemplo de los criterios, con base en la circularidad, para que una figura pueda ser considerada un círculo ($c \approx 0.07957$), un triángulo ($c \approx 0.048$) o una forma rectangular ($c = 0.0625$). Las figuras que tengan valores menores a los anteriores son consideradas figuras irregulares. Si alguna de las figuras encontradas en el proceso de

segmentación, tiene alguno de los valores anteriores, se dice que no es fuego y no se muestra como resultado positivo.

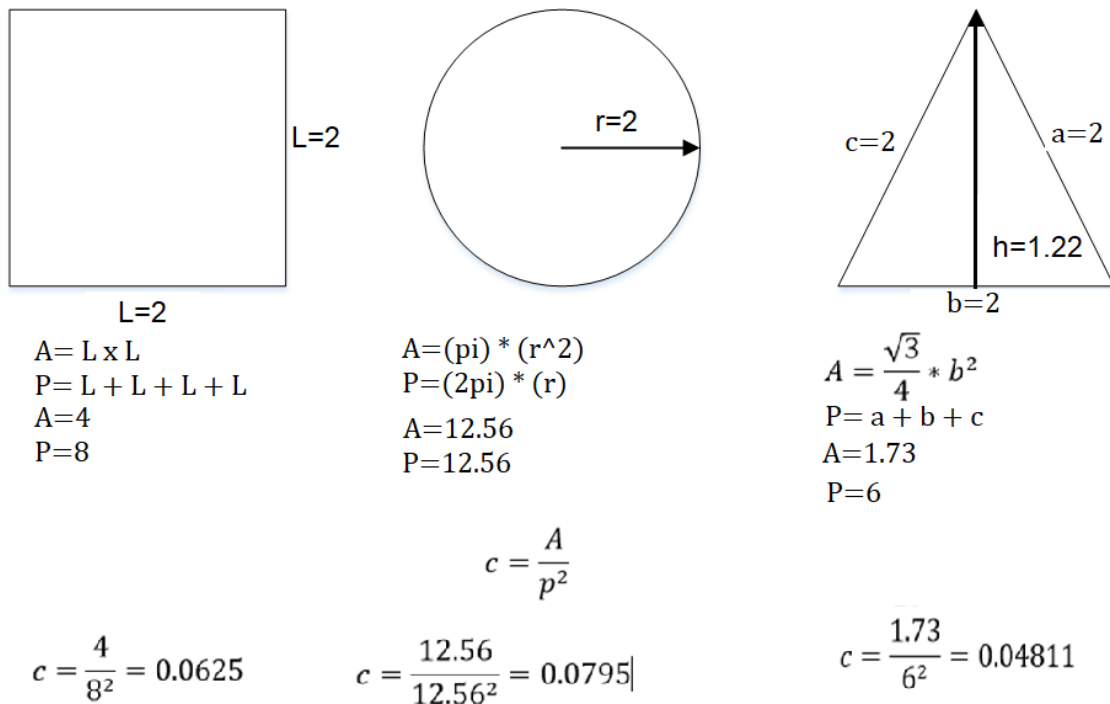


Figura 5-21 Ejemplo de la circularidad de tres figuras geométricas regulares.

Al aplicar el método de circularidad en la imagen donde se muestran los objetos encontrados en la región de interés (Figura 5-19), este método realiza la última comparación para determinar si existen objetos que sean clasificados como fuego, con los resultados que se presentan en la Figura 5-22.

Si la detección fue positiva, se emite una ventana emergente para anunciar que se ha detectado fuego, la cual tiene la función de una alerta de presencia de este elemento.

Como resultado final de los cuatro procesos para una detección positiva del fuego en imágenes digitales, se obtienen objetos con las características que se establecieron del fuego, en escenarios controlados, con una total efectividad. Sin embargo, en la etapa de pruebas se establece el desempeño real que tiene el algoritmo ante variaciones de escenario y condiciones de iluminación.

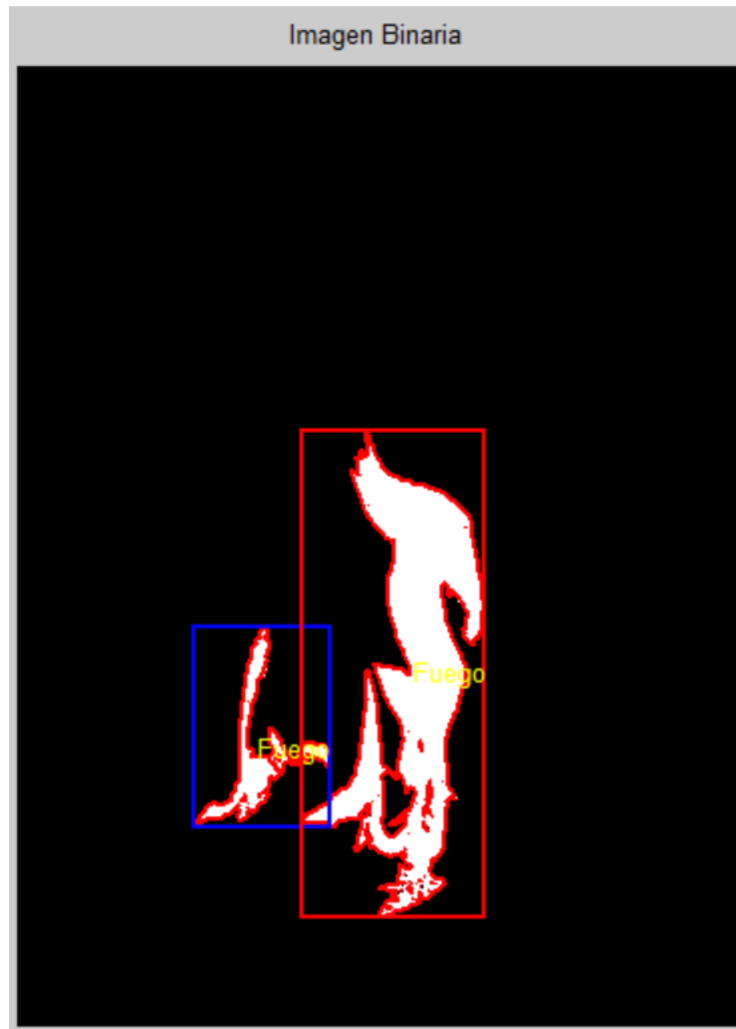


Figura 5-22 Detección positiva o no-positiva del fuego.

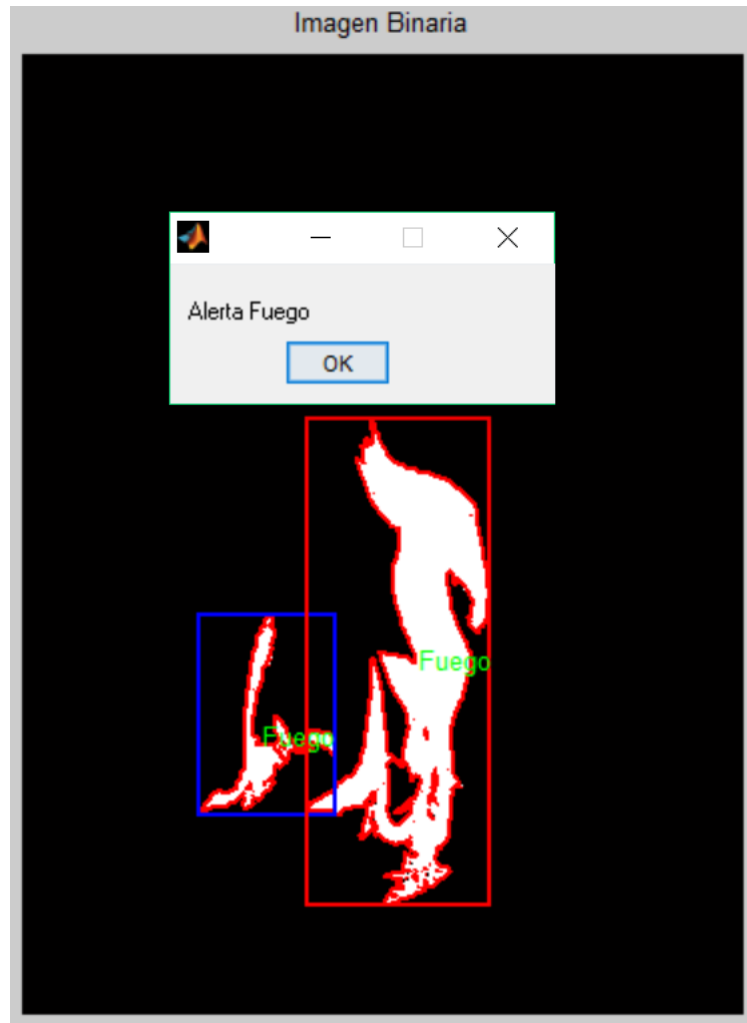


Figura 5-23 Detección positiva de fuego.

5.3 Experimentación para la obtención de la ventana de color

Para establecer los valores de la ventana de color se utilizó un banco de imágenes de tres espacios cerrados, con tres variaciones de luminosidad cada uno, en donde se realizaron pruebas de fuego provocado y controlado, para obtener imágenes con la presencia positiva de fuego. De esta forma, es posible identificar los valores de los niveles de intensidad de color que distinguen al fuego de todos los elementos que hay en una imagen, mediante técnicas de muestreo.

En la imagen de la Figura 5-24, se presentan los tres espacios cerrados de prueba donde realizaron las pruebas de fuego. Para cada escenario hubo tres variaciones de luminosidad, se tomaron un total de treinta y cinco fotos en cada variación, lo que da como resultado un total de ciento cinco fotos por cada espacio cerrado.



Figura 5-24 Espacios cerrados para la determinación de la ventana de color.

Cada uno de los espacios se registró con tres variaciones de luminosidad; se toma como ejemplo el escenario de prueba 3, donde la

Figura 5-25, muestra las tres variaciones de luminosidad del escenario.



Figura 5-25 Variación de luminosidad

Para poder conocer los valores de los pixeles que conforman al fuego, se debe analizar solo la sección donde estos están presentes. Para este análisis se hizo uso de la herramienta “Sección de color”, en el programa Adobe Photoshop CS6, extrayendo de la imagen el conjunto de pixeles que conforman al fuego. La Figura 5-26 muestra la información que se obtuvo después de realizar en análisis de la sección donde se encuentra el fuego.



Figura 5-26 Valores de intensidad.

Cabe aclarar que el número de pixeles en la sección que tiene la información del fuego en la imagen es un valor variable, puesto que este depende del tamaño del fuego en la imagen, y este nunca es un valor o rango que se encuentre definido, es decir, no tienen un valor máximo. Por otro lado, los valores de intensidad de color se encuentran en un intervalo con un valor máximo y mínimo, el cual es definido por el análisis de todos los valores que se obtengan de las imágenes de prueba.

Todos los valores de intensidad de color, que se obtienen de cada sección donde se encuentra el fuego en cada imagen de las tres pruebas, se registran en una tabla, para

conocer los valores mínimos y máximos del rango donde se encuentran. La Tabla 2, muestra un ejemplo de los valores de las secciones en el escenario de prueba 3, para conocer el rango se realiza una gráfica entre el valor de intensidad y la frecuencia con la que ese valor se presenta.

Tabla 2 Valores de intensidad de color.

Foto	Lumenes	Plano Rojo	Plano Verde	Plano Azul
1	1443	251.79	186.93	79.86
2	475	253.64	213.22	66.51
3	281	252.6	160.18	60.74
4	3001	229.34	142.77	60.62
5	14	250.16	219.64	182.76
6	64	253	200.4	109.47
7	218	231.66	164.28	77.71
8	899	249.25	206.4	121.33
9	899	250.2	173.87	89.52
10	445	239.04	151.59	63.65
11	20	253.57	248.04	225.16
12	27	253.68	249.48	226.94
13	107	233.38	190.07	123.19
14	14	238.58	217.99	170.5
15	27	252.96	193.25	31.88
16	107	251.48	201.08	101.53
17	281	253.43	253.66	165.53
18	354	253.51	204.07	90.67
19	445	248.34	130.86	61.56
20	354	253.33	251.57	144.18
21	445	253.2	244.29	110.42
22	354	252.66	173.94	73.01
23	281	251.3	215.42	94.34
24	281	253.25	215.61	94.89
25	281	251.19	189.2	78.68
26	218	252.27	196.86	102.58
27	173	253.12	256.76	187.79
28	218	252.46	232.99	124.74
29	218	253.31	253.58	195.33
30	218	252.92	215.63	111.52
31	281	253.29	216.04	112.75
32	218	252.47	214.88	112.63
33	218	252.71	215.66	112.02
34	218	252.23	214.48	109.17
35	218	252.54	214.8	108.29

Para conocer la frecuencia de los valores que tienen los pixeles se presenta la graficas de los tres colores en las imágenes de la Figura 5-27, Figura 5-28, Figura 5-29, donde se muestra la distribución de los treinta y cinco registros, y el número de veces que se repiten en el intervalo de color.



Figura 5-27 Gráfica de la frecuencia del color Rojo.



Figura 5-28 Gráfica de la frecuencia del color Verde.



Figura 5-29 Gráfica de la frecuencia del color Azul.

Además de conocer la distribución de los datos, también se obtuvo de ellos los valores máximos y mínimos, la media aritmética y la desviación estándar, de cada uno de los grupos de datos de la intensidad de color.

Tabla 3 Información estadística de los datos de la Tabla 2.

Plano de color	Rojo	Verde	Azul
Valor máximo	253.68	255	226.94
Valor mínimo	229.34	130.86	31.88
Suma de todos los valores	8741.86	7227.73	3981.47
Promedio	249.77	206.51	113.76
Desviación Estándar	6.55	31.91	46.77
Varianza	44.21	1048.37	2252.17
Media	252.54	214.48	109.17

Para establecer los valores de las ventanas de color que se utilizan para la detección por color se recopiló la información de los tres escenarios con sus variaciones de luz, se realizó un promedio de los valores máximos y mínimos, así como el promedio total de cada plano de color. Adicionalmente, se obtuvo la desviación estándar y como último paso se decidió utilizar el valor de la suma y la resta de la desviación estándar al promedio de los pixeles

en cada plano, como parámetros de la ventana de color. Los valores que se eligieron se visualizan en la Tabla 4.

Tabla 4 Valores para la ventana de color.

Valores para la ventana de color	Máximo	Mínimo
Plano Rojo	253.68	243.22
Plano Verde	238.42	174.59
Plano Azul	160.53	66.98

Como resultado de todo el análisis anterior, se establecieron los valores de la ventana de color que ocupara el algoritmo para el proceso de detección por color.

5.4 Interface

Para que el usuario pueda comprobar el funcionamiento y la efectividad del algoritmo, se desarrolló una interface gráfica de usuario, usando el entorno de desarrollo GUI (Interface Gráfica de Usuario) de Matlab. Se pretende lograr una interacción sencilla y cómoda con el usuario, facilitando la consulta y visualización de los resultados del algoritmo. Además, se permite realizar una prueba nueva de algún escenario a elegir por el mismo usuario.

La interface se divide en tres clases principales: “Interface Inicio”, “Interface Pruebas” y por último “Interface Prueba Nueva”, como se indica en la Figura 5-30,

La primera interface con la que el usuario podrá interactuar es la presentación del trabajo (llamada: inicio), la cual se puede visualizar en la Figura 5-31. La interface de la imagen anterior muestra la presentación del proyecto de investigación, acompañada solo de un botón que sirve como enlace a la interface de pruebas.

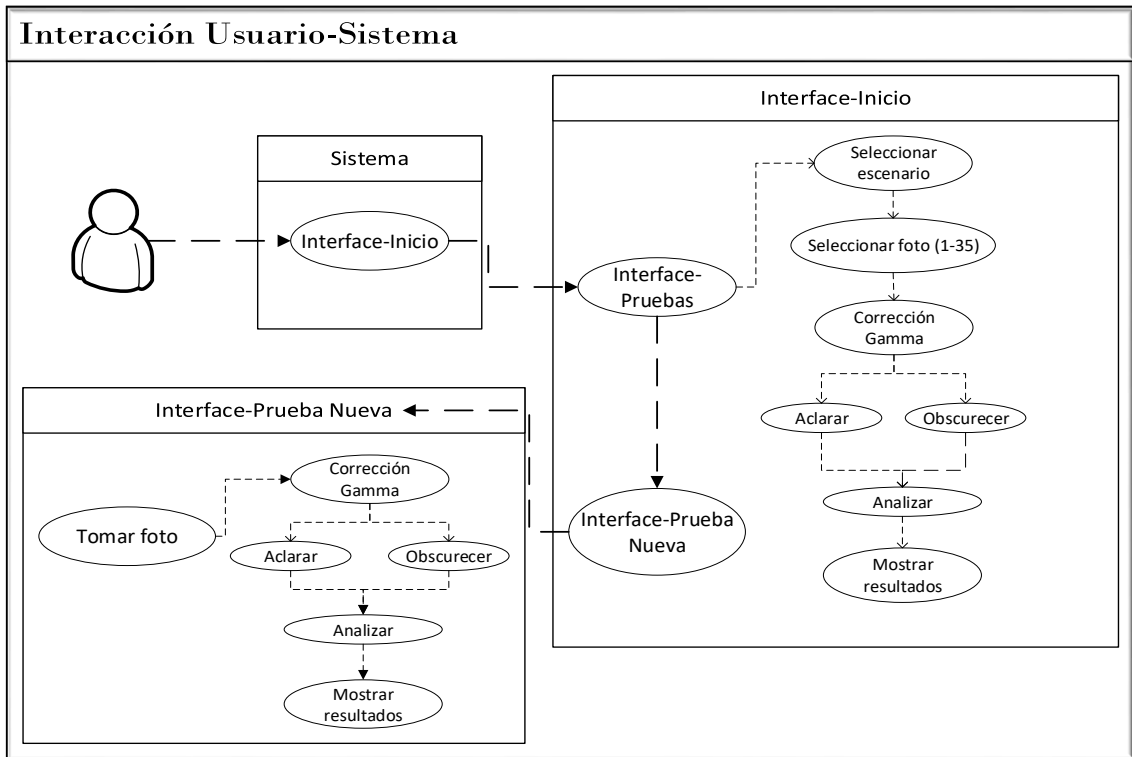


Figura 5-30 Diagrama de interacción del usuario y sistema.



Figura 5-31 Primer interface del proyecto.

Para la segunda interface, denominada Pruebas, se desarrolló la interface gráfica de la Figura 5-32, donde se muestra un entorno con ocho elementos principales. Con los cuales el usuario puede interactuar, y que se mencionan enseguida:

1. Menú de selección del escenario de prueba.: esta opción permite elegir entre los cuatro escenarios de prueba.
2. Lista de opciones para elegir entre las treinta y cinco fotos disponibles de cada escenario.
3. Primer Ventana de visualización: aquí se muestra la imagen que se eligió de la lista anterior.
4. Opciones de corrección gamma: en esta opción se decide si se quiere oscurece o aclarar la imagen, el resultado de esta opción se muestra en el apartado 6.
5. Botón de analizar: este botón se encarga de realizar el análisis la imagen que se seleccionó, ya sea que se le haya aplicado o no la corrección gamma, el resultado se visualiza en el apartado 6.
6. Segunda Ventana de visualización: en este apartado se visualizan los resultados del análisis final del algoritmo en la imagen que se seleccionó en el apartado 2, tanto si se le aplico o no la coacción gamma.
7. Botón nueva prueba: este botón enlaza a esta interface con la interface-Nueva Prueba.
8. Botón cerrar: al presionar este botón se cierra la interface actual y abre la interface de inicio.

Un ejemplo del funcionamiento final de esta interface se muestra en la Figura 5-33, donde como primer paso se elige el escenario Laboratorio de electrónica, después se selecciona la imagen tres, se visualiza la imagen en el paso tres, en el paso cuatro se oscurece la imagen, en el quinto paso se analiza la imagen con corrección gamma, en el sexto paso se visualiza el resultado final del proceso y como último paso al realizar una detección positiva de fuego, se emite una alerta de la existencia de fuego en el escenario.

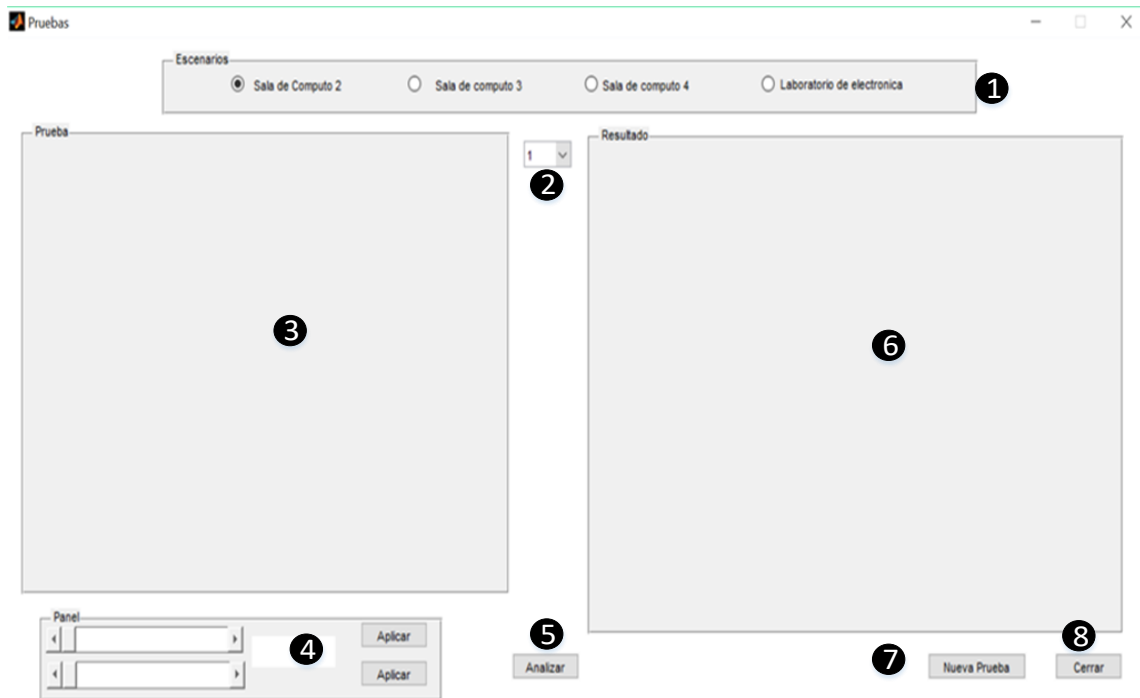


Figura 5-32 Interface Pruebas.

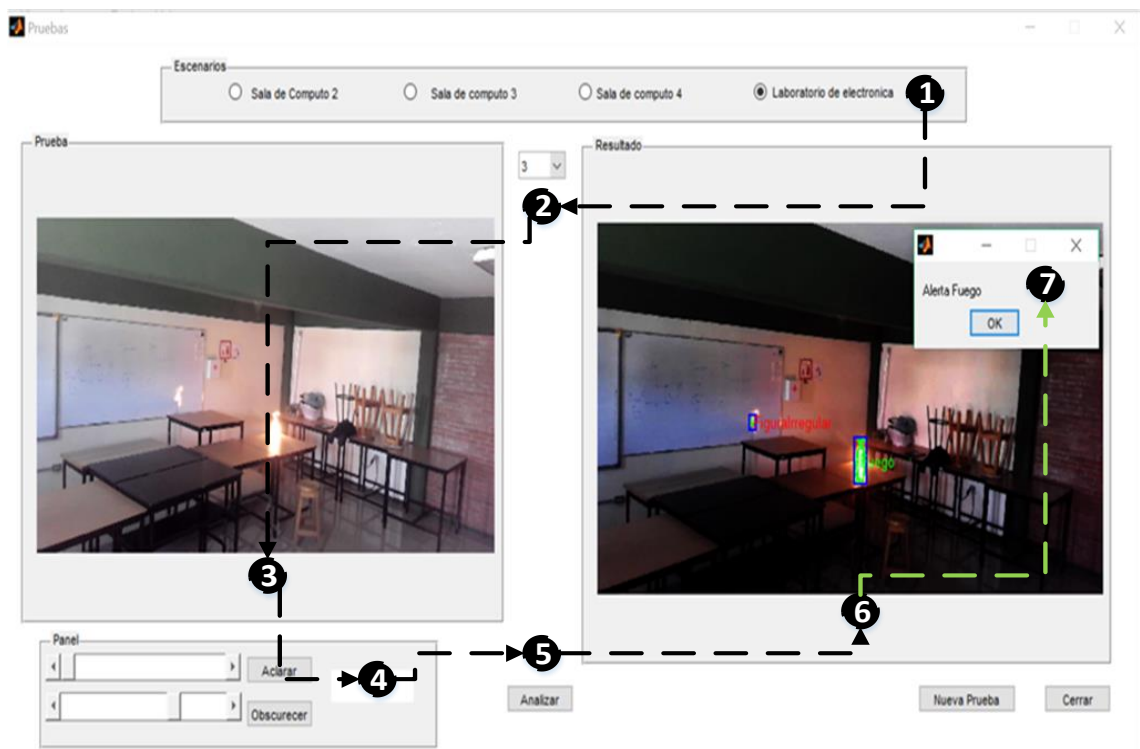


Figura 5-33 interface Pruebas en ejecución.

Los elementos de la tercer interface denominada Nueva-Prueba se describen a continuación, y se especifican en la Figura 5-34:

1. Botón Cámara: con este botón se activa la cámara que esté conectada al ordenador. Y se pre visualiza la imagen que percibe.
2. Primer Ventana de visualización: aquí se muestra la imagen que se visualiza desde la cámara.
3. Botón captura: con este botón se captura una nueva imagen, desde la cámara.
4. Opciones de corrección gamma: en esta opción se decide si se quiere obscurece o aclarar la imagen la nueva imagen obtenida.
5. Botón de analizar: este botón se encarga de realizar el análisis la imagen actual, ya sea que se le haya aplicado o no la corrección gamma, el resultado se visualiza en el apartado 6.
6. Segunda Ventana de visualización: en este apartado se visualizan los resultados del análisis final del algoritmo en la imagen que se capturo desde la cámara.
7. Botón cerrar: este botón finaliza la ejecución de esta interface y nos enlaza con la interface de inicio.

Un ejemplo del funcionamiento final de esta interface se muestra en la Figura 5-35 , donde como primer paso se visualiza la imagen actual de la cámara o en su caso se carga una imagen por defecto. Si el usuario decide utilizar el factor de corrección gamma, este elegirá el valor dependiendo de la luminosidad de la imagen; después de seleccionar el valor de corrección gamma, en el siguiente paso se analiza la imagen con el algoritmo, como último paso se visualiza el resultado final del proceso de análisis, si como resultado el algoritmo obtiene una identificación positiva, el algoritmo emite una alerta de fuego en la pantalla.

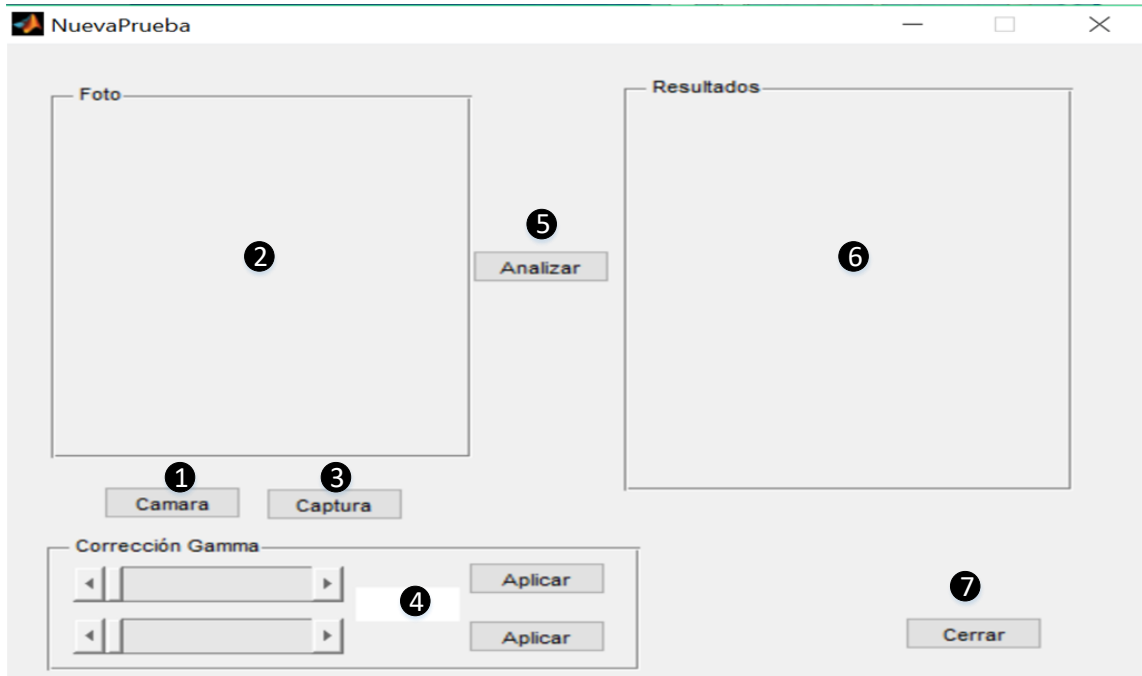


Figura 5-34 Interface prueba nueva.

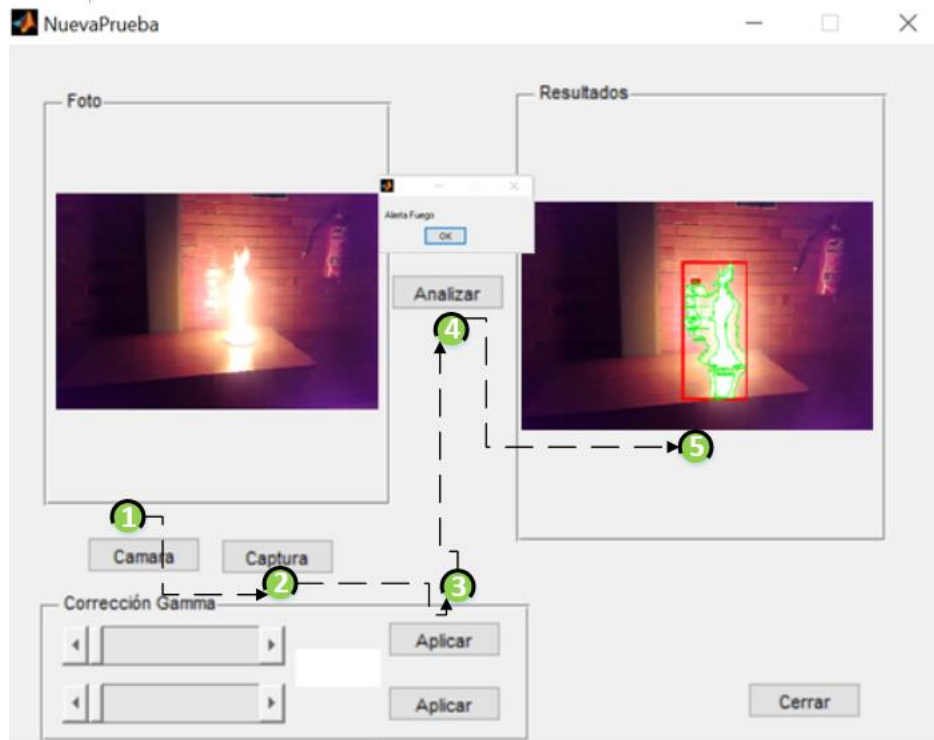


Figura 5-35 Interface de pruebas en ejecución.

6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este apartado se presenta y discute el proceso de validación del algoritmo a partir de una serie experimental en escenarios reales. Estos escenarios son espacios del Centro Universitario UAEM Atlacomulco, en donde se produjo fuego controlado. La primera parte de las pruebas consiste en un proceso de calibración para ajustar el factor de corrección gamma más adecuado al escenario. Para la segunda parte, se analiza una serie de fotogramas con algunas variaciones, para el cálculo de la sensibilidad y la especificidad.

6.1 Pruebas para calibración del algoritmo

Para verificar el funcionamiento del algoritmo, se realizaron pruebas en cuatro escenarios, tomando un total de treinta y cinco fotos por cada escenario en diferentes condiciones de luminosidad, con la presencia y no presencia de fuego en ellas. Posteriormente las imágenes fueron procesadas con el algoritmo, y se registraron los resultados obtenidos, para poder evaluar de esta forma la afectividad en cuanto al nivel de asertividad del algoritmo, en situaciones reales; esto permite conocer las condiciones en las que el algoritmo ofrece los mejores resultados.

La información de los cuatro escenarios de prueba se muestra en la Tabla 5. Cabe aclarar que los valores de luminosidad de cada escenario se percibieron desde la ubicación donde se situó la cámara, además de que corresponden a una hora específica del día, en la cual se monitoreo el escenario. En las imágenes de las Figura 6-1 y Figura 6-2, se muestran las dimensiones físicas de los escenarios.

Tabla 5 Lista de los escenarios de prueba.

Núm.	Nombre	Dimensiones (largo x ancho x altura)	Luminosidad (Lúmenes)		
			8:00 am	17:00 pm	14:00 pm
1	Sala de computo 2	6.20m x 7.90m x 2.90m	22 lux	32 lux	172 lux
2	Sala de computo 3	6.20m x 7.90m x 2.90m	22 lux	69 lux	110 lux
3	Sala de computo 4	6.20m x 7.90m x 2.90m	28 lux	69 lux	110 lux
4	Laboratorio de electrónica	6.20m x 7.90m x 2.90m	14 lux	32 lux	86 lux



Figura 6-1 Dimensiones físicas de los escenarios 1 y 2.

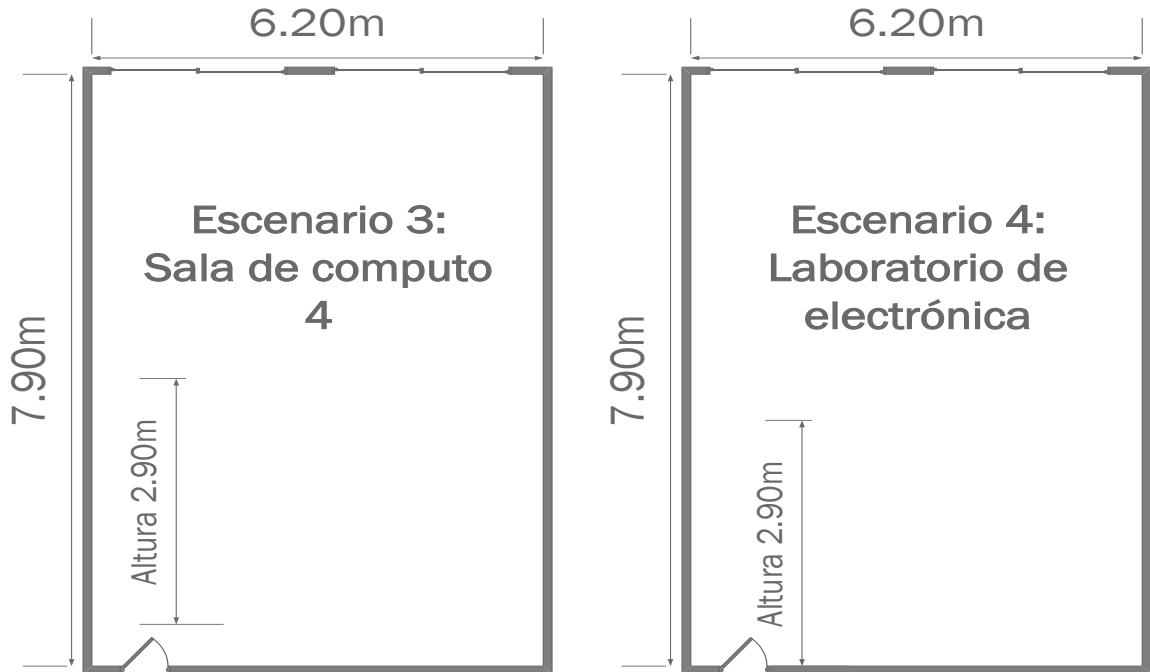


Figura 6-2 Dimensiones físicas de los escenarios 3 y 4.

Debido a que el factor de la variación de iluminación en los escenarios depende de la hora del día, la variación de color del fuego se hace presente en todos los escenarios, por lo tanto, se puede decir que para identificar al fuego en cada escenario se necesitan valores únicos para cada uno de ellos. Sin embargo, en la etapa donde se estableció el valor de la ventana de color, para la detección por color, se establecieron valores generales en la escala de colores RGB, que permiten hacer una identificación del fuego en los escenarios de prueba. Las únicas variables que se pueden ajustar a cada escenario son: la ubicación de la cámara y el valor del factor gamma.

Cabe aclarar que la relación que existe entre las dimensiones físicas de los escenarios y la detección de fuego depende de la ubicación de la cámara, pues esta relación es la que determina el ángulo de visión que tiene la imagen que el algoritmo analiza para la realizar la detección de fuego.

La ubicación de la cámara para cada escenario fue la siguiente:

Para el escenario 4 “Laboratorio de electrónica”, se muestra en la imagen de la Figura 6-3.



Figura 6-3 Ubicación de la cámara en el escenario 4

Para el escenario 3 “Sala de computo 4”, en la Figura 6-4



Figura 6-4 Ubicación de la cámara en el escenario 3.

Para el escenario 2 “Sala de computo 3”, en la Figura 6-5

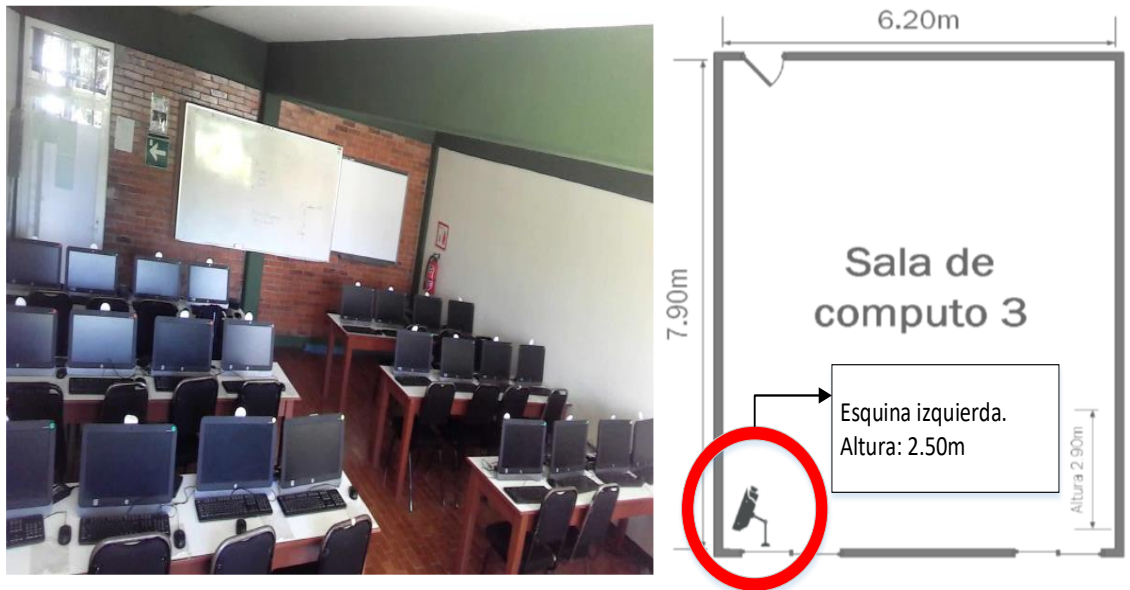


Figura 6-5 Ubicación de la cámara en el escenario 2.

Para el escenario 1 “Sala de computo 2” la ubicación se muestra en la Figura 6-6.

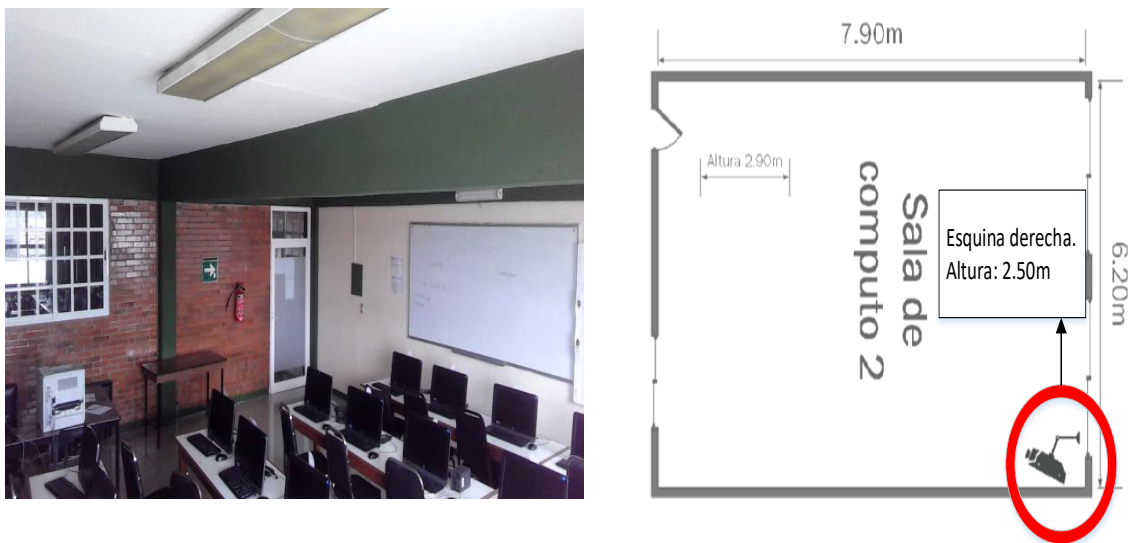


Figura 6-6 Ubicación de la cámara en el escenario 1

Para establecer el valor del factor gamma que se utiliza en cada escenario, se hicieron pruebas preliminares de cada uno, eligiendo cuatro fotos al azar para analizarlas con el algoritmo, antes de realizar las pruebas completas de cada escenario, y poder fijar el valor del factor gamma, adecuado para cada uno.

Los resultados que se obtuvieron de estas pruebas de calibración en los escenarios se describen a continuación:

Las fotos que se eligieron para el escenario 4, Laboratorio de electrónica, se muestran en la Figura 6-7, donde se puede observar también la diferencia de valores de luminosidad que hay entre cada foto.



Figura 6-7 Fotos de muestra para el escenario 4.

Para el escenario 3 se eligieron las imágenes de la Figura 6-8, observando que en la primera foto existe una variación significativa de luminosidad a las demás.



29 lúmenes



70 lúmenes



70 lúmenes



70 lúmenes

Figura 6-8 Fotos de muestra para el escenario 3.

Para el escenario 2 se eligieron las imágenes de la Figura 6-9 en este escenario como en los dos anteriores existe una diferencia de luminosidad en la primera foto con respecto a las demás fotos.



22 lúmenes



69 lúmenes



69 lúmenes



69 lúmenes

Figura 6-9 Fotos de muestra para el escenario 2.

Para el escenario 1 se eligieron las imágenes de la Figura 6-10, donde se aprecia que, de las imágenes elegidas para este análisis, existe una variación mínima de luminosidad entre, las fotos seleccionadas.

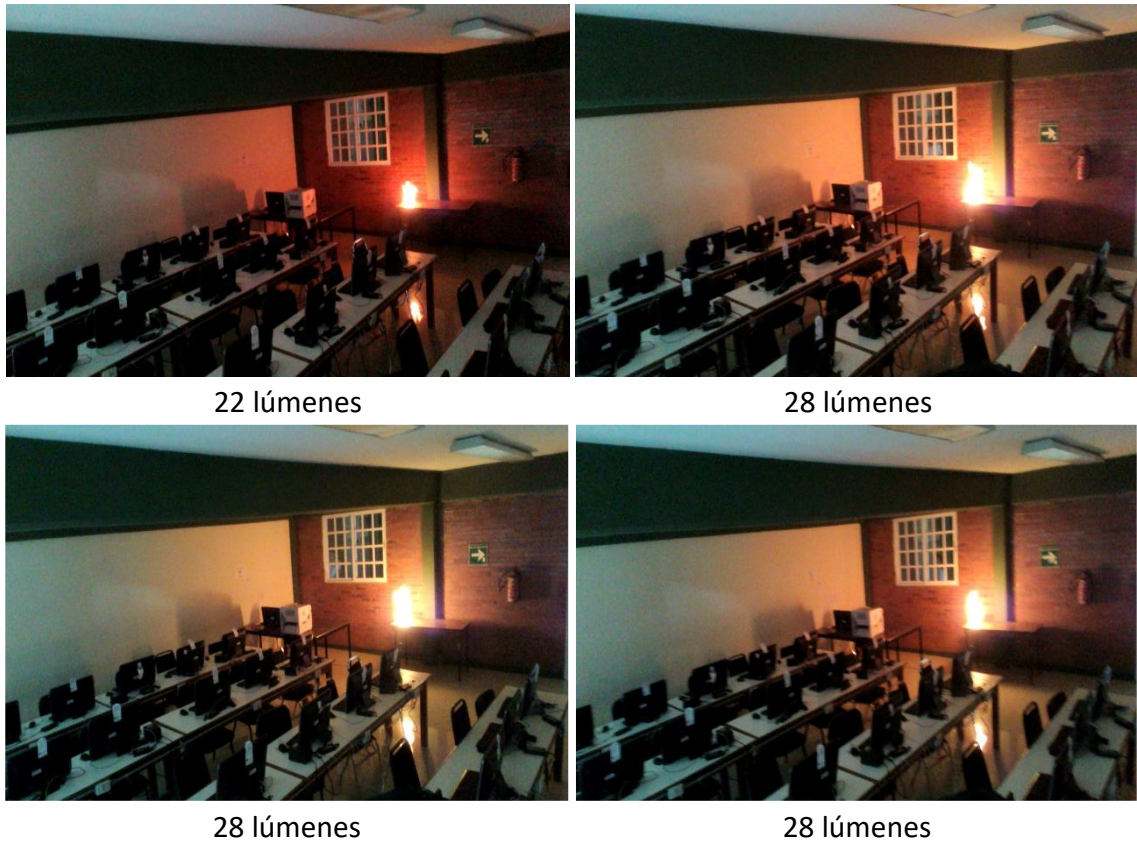


Figura 6-10 Fotos de muestra para el escenario 1.

Analizando las imágenes anteriores con el algoritmo se obtienen los siguientes resultados:

Como mejor escenario de prueba, el escenario 1 (Sala de computo 2), muestra resultados de identificación positiva en la imágenes de prueba analizadas por el algoritmo, como ejemplo, se muestra el resultado del análisis de la primer imagen de prueba elegida para este escenario en la Figura 6-11, donde después del análisis de la imagen el algoritmo muestra como resultado una identificación positiva del fuego, la ubicación del fuego en la imagen y encierra al objeto clasificado como fuego en un rectángulo de color rojo. Además de mencionar, que la identificación se realiza sin la necesidad de realizar algún tipo de

ajuste en la luminosidad en la imagen, por medio del factor de corrección gamma, como un resultado adicional también muestra el número de objetos encontrados que son considerados como fuego.

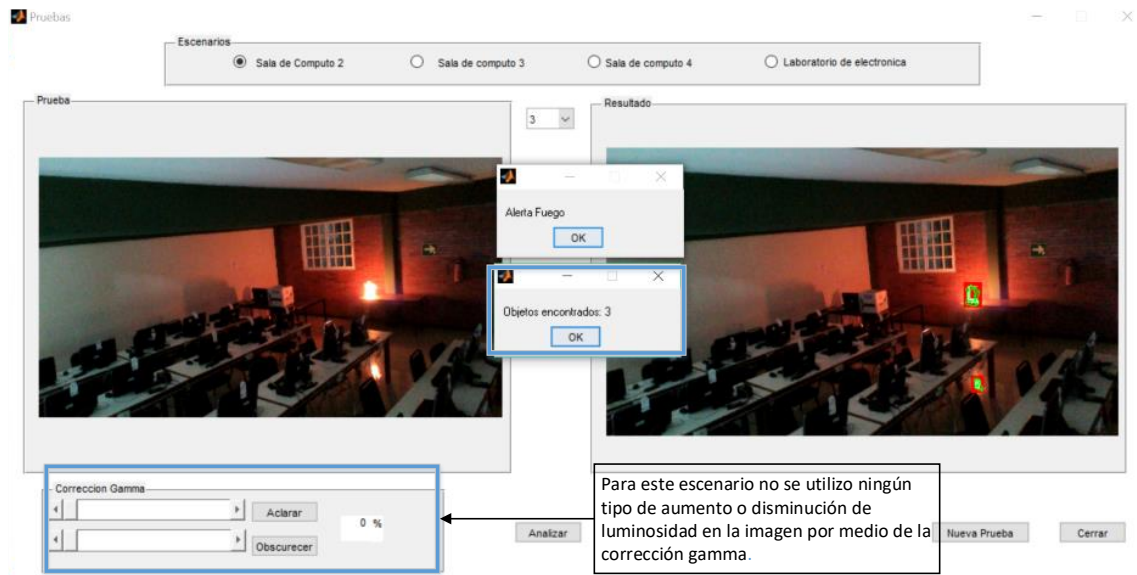


Figura 6-11 Análisis de la primera imagen del escenario 1.

En la imagen anterior de la Figura 6-11, se observa también que además de una identificación positiva del fuego, el sistema encuentra tres posibles objetos que anuncia como fuego. En la Figura 6-12 se realiza un acercamiento de la imagen para visualizar los tres objetos encontrados en la imagen. El objeto número 1 representa al fuego, el objeto número 2 representa una posible llama que es parte del fuego del primer objeto, sin embargo, el sistema lo identifica como una sección independiente al primer objeto, el objeto número 3 representa el reflejo del fuego en el suelo, debido a que el material del piso es altamente reflejante, este objeto se puede considerar como un error de detección que el usuario puede discriminar personalmente al solo ser el reflejo del fuego. El resultado del análisis del algoritmo es una detección positiva del fuego en la imagen.

Para las tres imágenes restantes el resultado se puede observar en las imágenes que muestran las: Figura 6-13, Figura 6-14, Figura 6-15.



Figura 6-12 Objetos encontrados en la imagen.

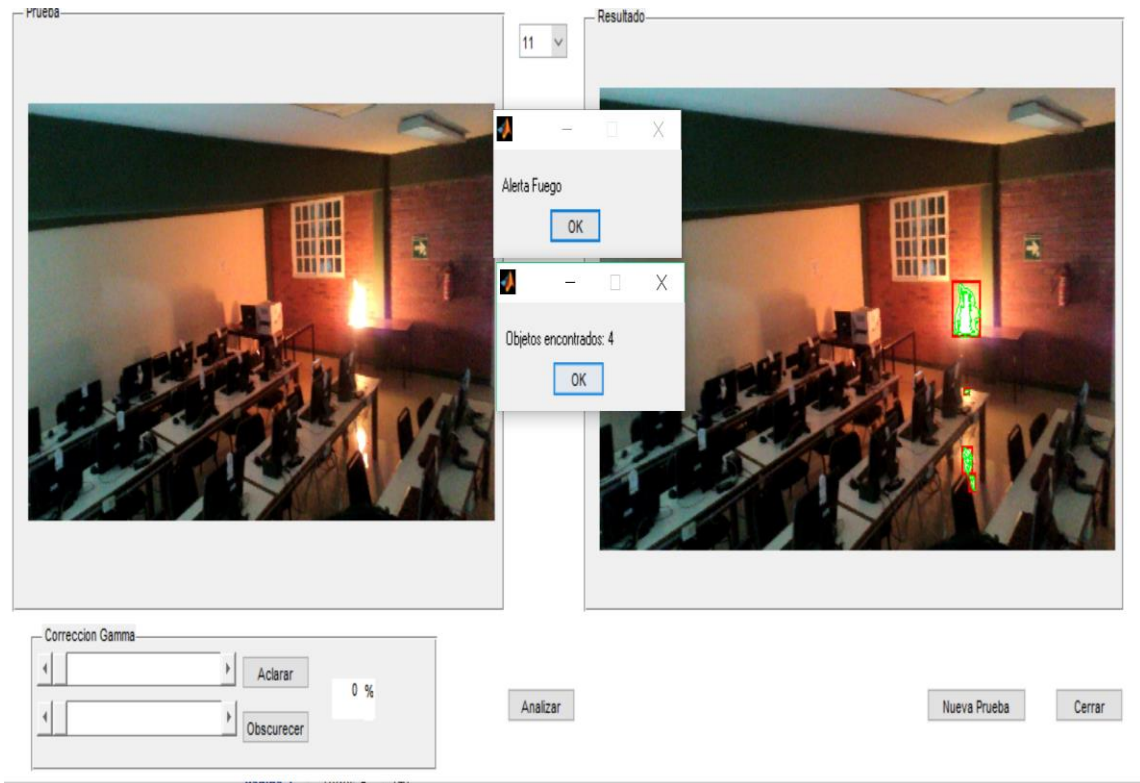


Figura 6-13 Análisis de la segunda imagen del escenario 1

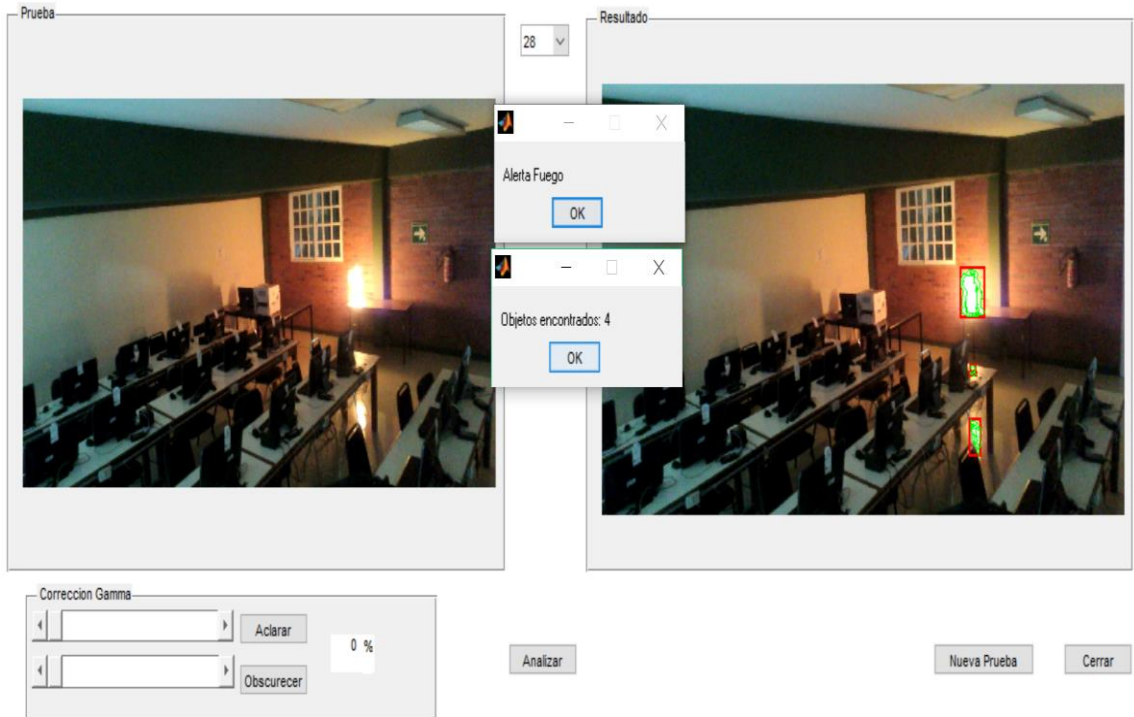


Figura 6-14 Análisis de la tercera imagen del escenario 1

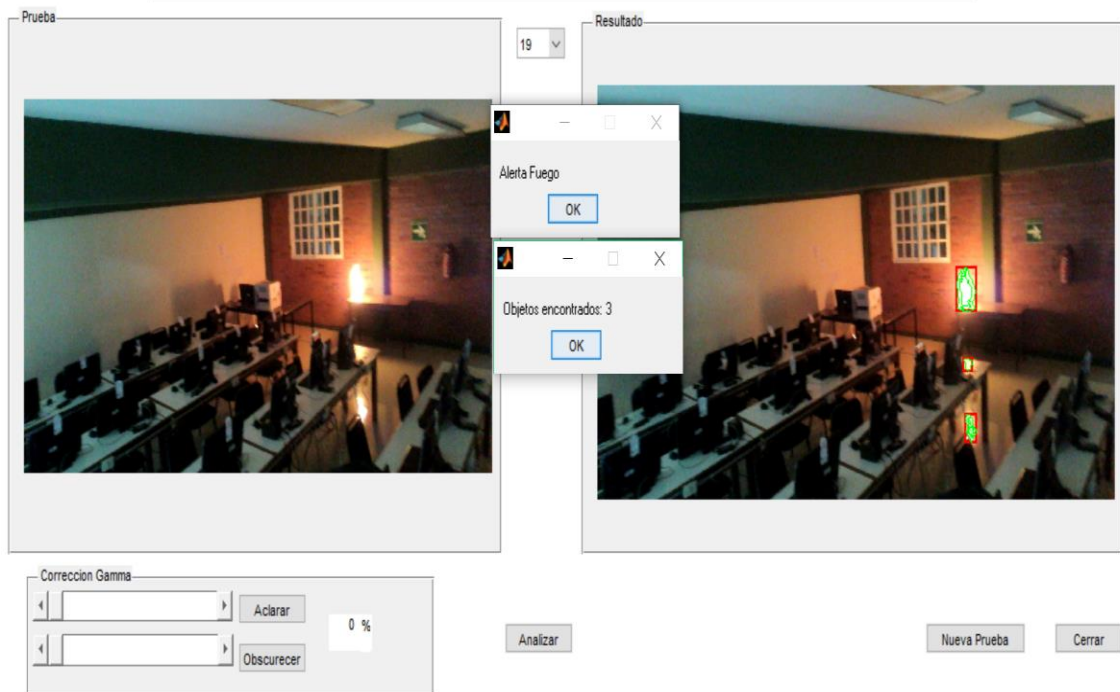


Figura 6-15 Análisis de la cuarta imagen del escenario 1

El resumen de los resultados obtenidos del primer escenario se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6 Resumen de los resultados obtenidos del escenario 1.

Figura	Detección positiva	Objetos encontrados	Objetos clasificados como fuego	Objetos clasificados como no fuego.
Figura 6 10	si	3	3	0
Figura 6 12	si	4	3	1
Figura 6 13	si	4	3	1
Figura 6 14	si	3	3	1

Tomando como referencia los resultados del escenario 1 Sala de computo 2, se concluye que para este escenario en particular la detección tuvo una identificación positiva de fuego, en las imágenes seleccionadas, aunque clasifica como fuego al reflejo en el suelo del mismo, esto se debe a factores que no se pueden controlar, como el material del suelo, el barniz de las paredes o por algún otro material, que pueda ocasionar que cualquier objeto luminoso se refleje en él. Este es un error que el usuario debe discriminar personalmente.

Entonces se deduce que el algoritmo propuesto tiene una efectividad parcialmente efectiva en el análisis de las fotos seleccionadas, a causa del horario (entre 8:00am – 8:15am) y luminosidad (22 – 28 lúmenes) con las que se tomaron. Además, se establece que para este tipo de espacios cerrados con poca luminosidad no es necesario algún ajuste en la imagen para la detección de fuego, sin embargo, si se quiere tener una percepción visual nítida o con mayor claridad del espacio cerrado se puede hacer uso del factor de corrección gamma si el usuario así lo decide.

Como segundo mejor escenario se muestran los resultados del análisis del escenario 4, Laboratorio de electrónica, donde se realiza un primer análisis de las imágenes, sin el factor de corrección gamma (Figura 6-16), teniendo una identificación positiva, pero acompañada de tres objetos que el sistema clasifica como fuego sin que lo sean, así que para la cuantificación de resultados esta prueba tendría tres objetos como errores de identificación, los cuales se corrigen parcialmente, anulando la identificación de dos de los tres objetos que se muestran como fuego, evento que se corrige al aplicar el factor de corrección gamma a la imagen para disminuir la claridad en ella, obscureciendo la imagen y mejorando la percepción de objetos luminosos en la escena de la Figura 6-17.

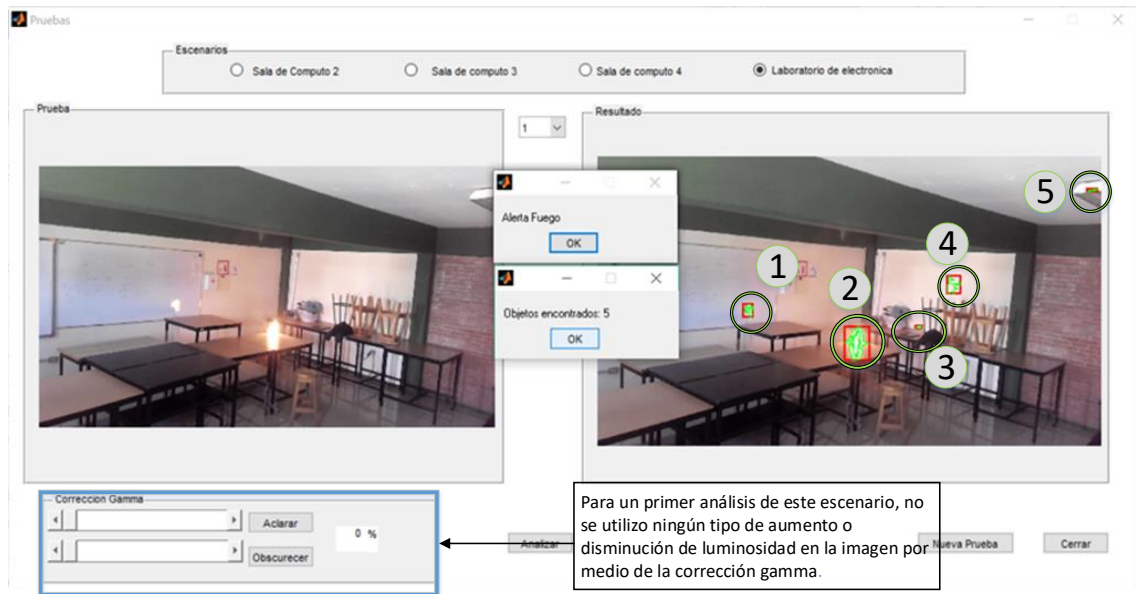


Figura 6-16 Primer análisis del escenario 4.

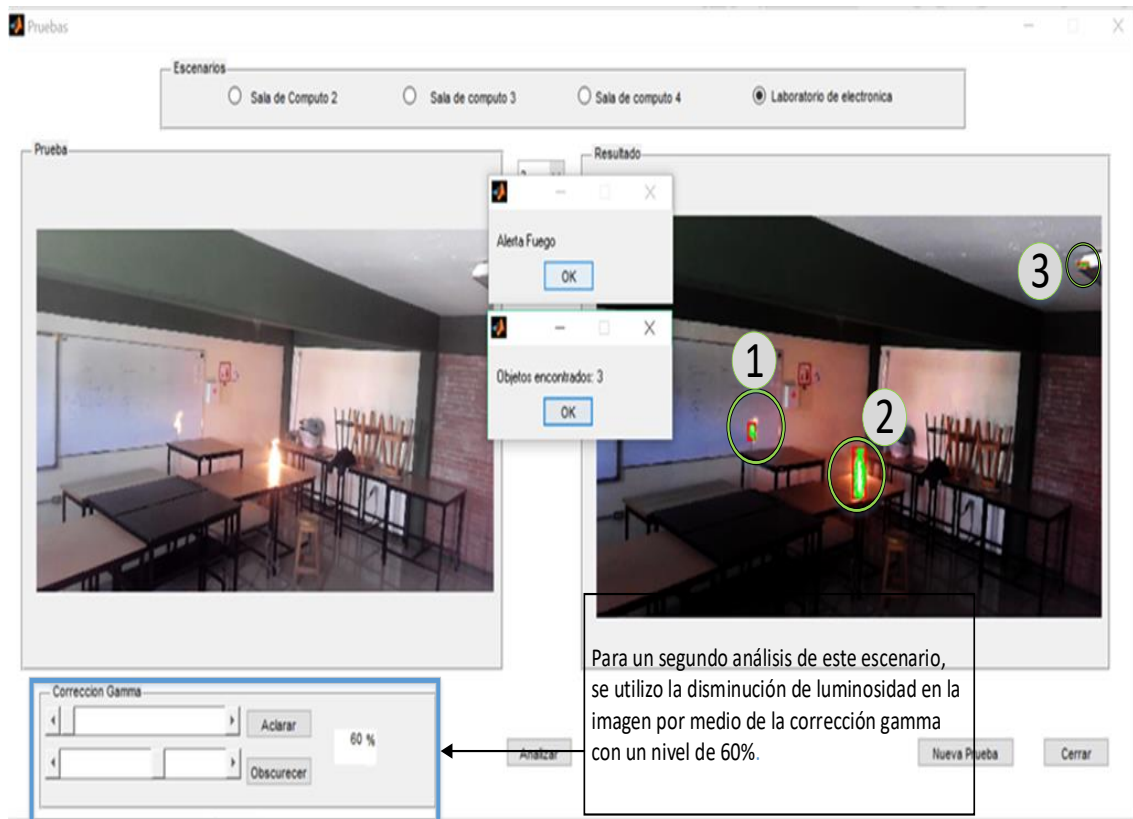


Figura 6-17 Segundo análisis del escenario 4.

De los cinco objetos encontrados, estos se pueden clasificar de la siguiente forma: el objeto uno como el reflejo del fuego y el objeto dos como el fuego, los objetos tres, cuatro y cinco, aunque el análisis dice que representan fuego, no lo son. Para lograr un mejor resultado en el análisis se decide usar el factor de corrección gamma, ajustando su valor a un 60% para oscurecer la imagen y obtener una identificación con menos errores.

Para el segundo análisis de la primera imagen del escenario 4, después de aplicar el factor gamma en un 60% en la imagen se disminuye el número de objetos encontrados de cinco a tres, teniendo de nuevo a los objetos uno como el fuego y al dos como el fuego, dejando solo un error de identificación el objeto tres, el cual es el reflejo de la luz que entra por una ventana.

El análisis de las siguientes imágenes de pruebas para este este escenario se muestran en las imágenes de las: Figura 6-18, Figura 6-19, Figura 6-20, aplicando el mismo valor al factor gamma.

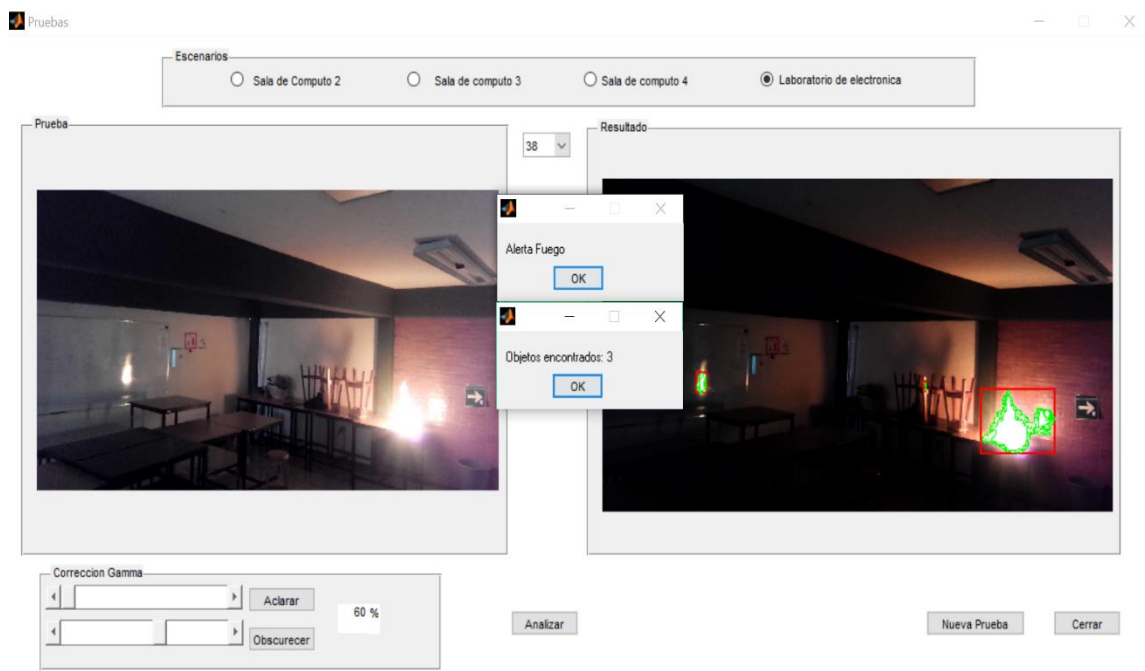


Figura 6-18 Análisis de la segunda imagen seleccionada del escenario 4.

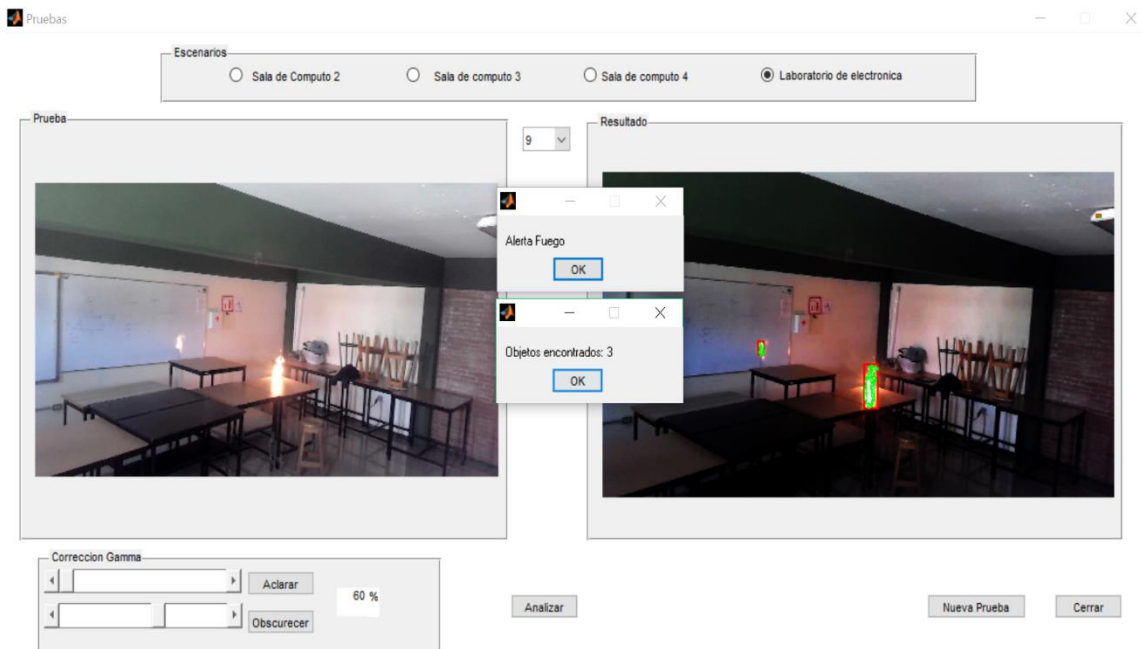


Figura 6-19 Análisis de la tercera imagen seleccionada del escenario 4.

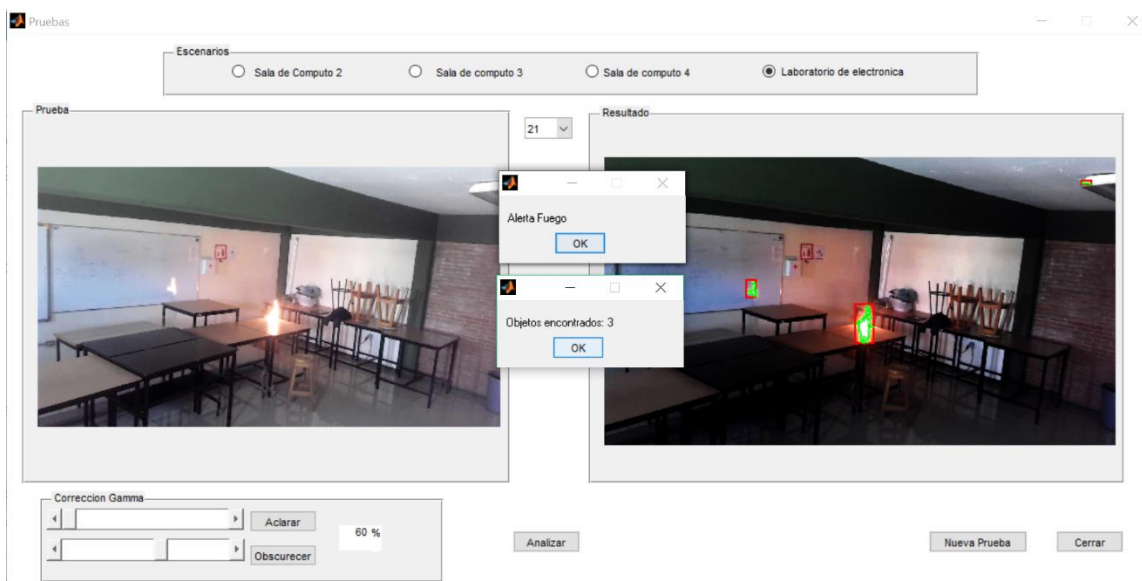


Figura 6-20 Análisis de la cuarta imagen seleccionada del escenario 4.

El resumen de los datos obtenidos del análisis de las imágenes seleccionadas para el escenario 4 se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7 Resumen de los resultados obtenidos del escenario 4

Figura	Detección positiva	Objetos encontrados	Objetos clasificados como fuego	Objetos clasificados como no fuego.
Figura 6-17	Si	3	2	1
Figura 6-18	Si	3	2	1
Figura 6-19	Si	3	2	1
Figura 6-20	si	3	2	1

Tomando como referencia los resultados del escenario 4, Laboratorio de electrónica, se concluye que para este escenario se tuvo una buena detección, al detectar fuego en las imágenes seleccionadas, pero mostrando también errores en los objetos encontrados que clasifica como fuego. Esto se debe al factor de la luminosidad que aumenta tanto por la hora en que se toman las fotos (para la imagen dos a las 8:00am y para el resto de las imágenes a las 17:00pm), y por la estructura física del escenario (ventanas que permiten el paso de luz), errores que al utilizar la herramienta de factor gamma disminuyen, si no en totalidad, si en un número considerable.

Se establece que, para el análisis de escenarios con una cantidad mayor a 32 lúmenes, se recomienda utiliza un valor en la herramienta de factor gamma igual o mayor al 60%, al realizar el análisis de la imagen, para mejorar los resultados obtenidos, y que el número de objetos encontrados correspondan a fuego.

El tercer escenario con mejores resultados es el escenario 2, Sala de computo 3, en este escenario como en el anterior, se realiza un primer análisis de las imágenes, sin aplicarle algún valor a la herramienta factor gamma. Los resultados se visualizan en la Figura 6-21, que muestra un resultado con un total de diez objetos que, al visualizar la imagen, se puede notar que más de la mitad de estos objetos encontrados no corresponden al fuego, como lo son los objetos 1, 3, 4, 5, 6, que corresponden a reflejos de luz. Como alternativa para atender este inconveniente, se vuelve a realizarla el análisis de la imagen, pero esta vez aumentando el nivel de corrección gamma a más de un 80%, para obscurecer la imagen, y mejorar la percepción de los objetos luminosos. El resultado de este nuevo análisis se muestra en la Figura 6-22.

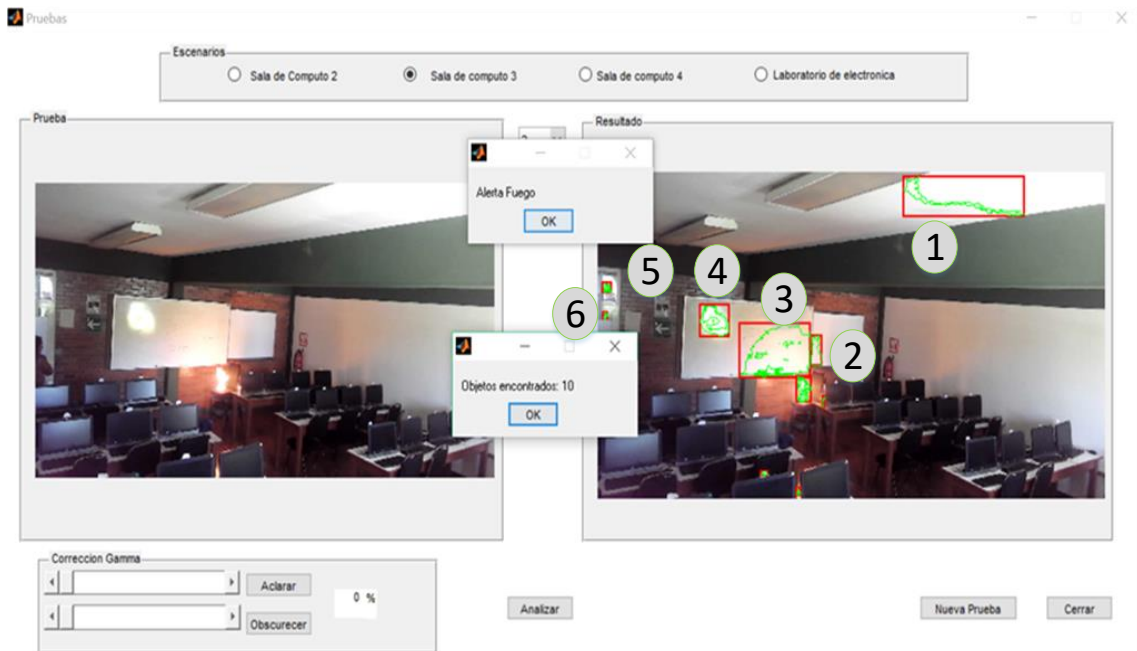


Figura 6-21 Primer análisis del escenario 2.

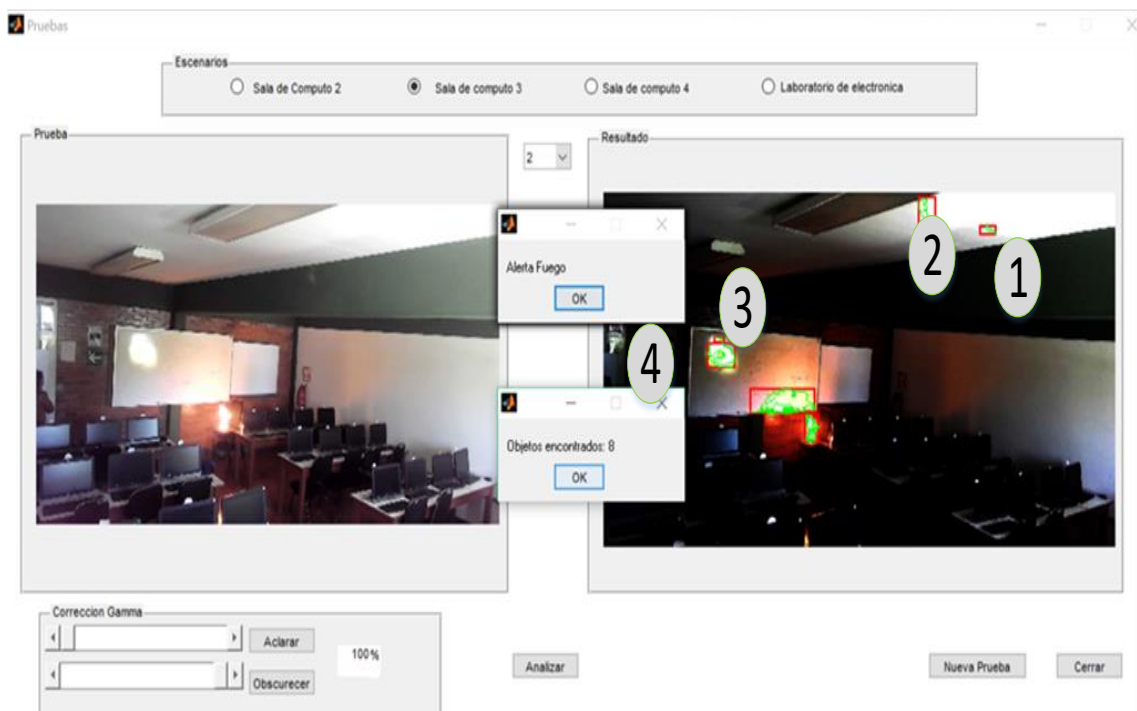


Figura 6-22 Segundo análisis de la primera imagen del escenario 2.

Aplicando el máximo valor de la herramienta corrección gamma, se logró mejorar el número de objetos identificados de diez a ocho, de los cuales seis no son fuego. El tamaño de estos es reducido, la ubicación de estos se conserva, en comparación con el análisis anterior, en este caso el análisis arroja como resultado final una identificación positiva del fuego, con más objetos de los que realmente conforman al fuego.

Se muestra a continuación los resultados del análisis de las demás imágenes seleccionadas del segundo escenario, en las imágenes de las figuras: Figura 6-23, Figura 6-24, Figura 6-25.

Para el análisis de la tercera imagen (Figura 6-24), se mostró mayor eficiencia que en los dos análisis anteriores. Al identificar cuatro objetos como fuego, de los cuales tres de ellos son reflejos de las llamas del fuego y no reflejos de luz. Sin embargo, esta tercera foto tiene un valor de luminosidad menor que las tres anteriores además de que se tomó en un horario diferente a las otras tres fotos seleccionadas para realizar las pruebas de este escenario.

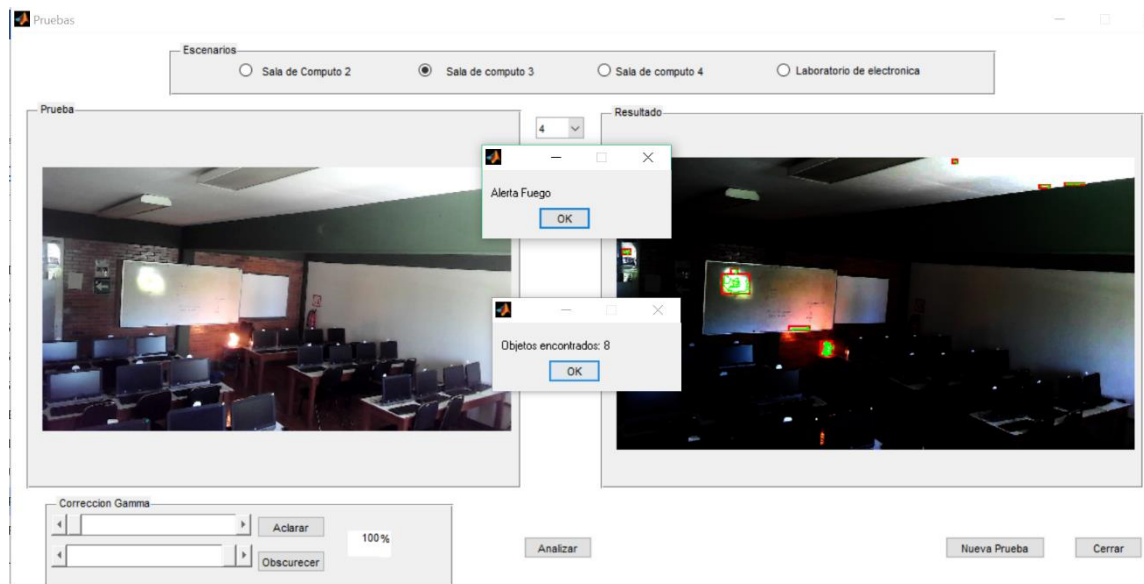


Figura 6-23 Análisis de la segunda imagen del escenario 2.

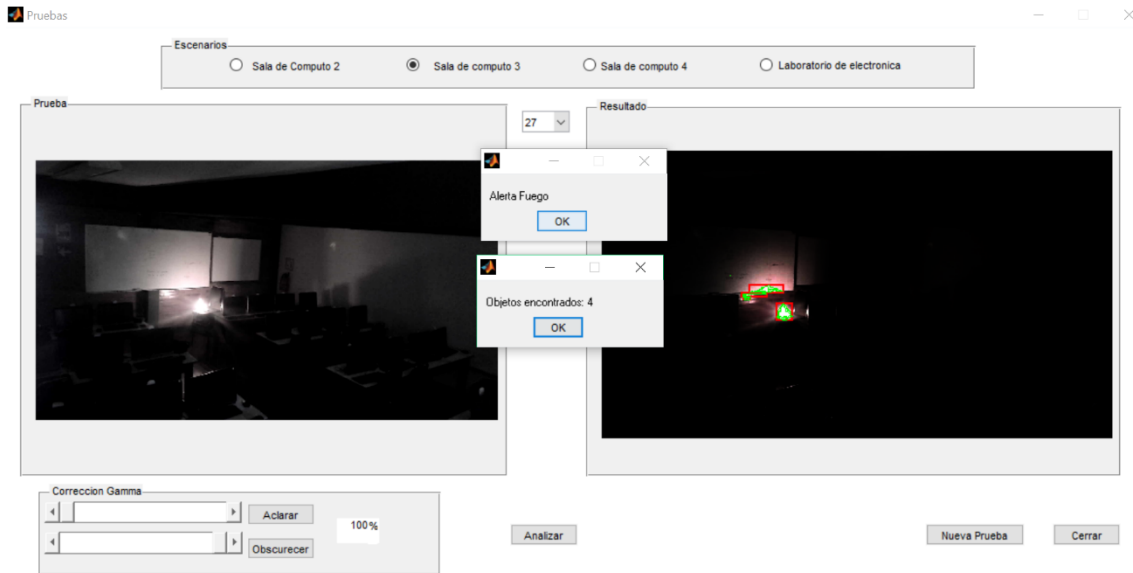


Figura 6-24 Análisis de la tercera imagen del escenario 2.

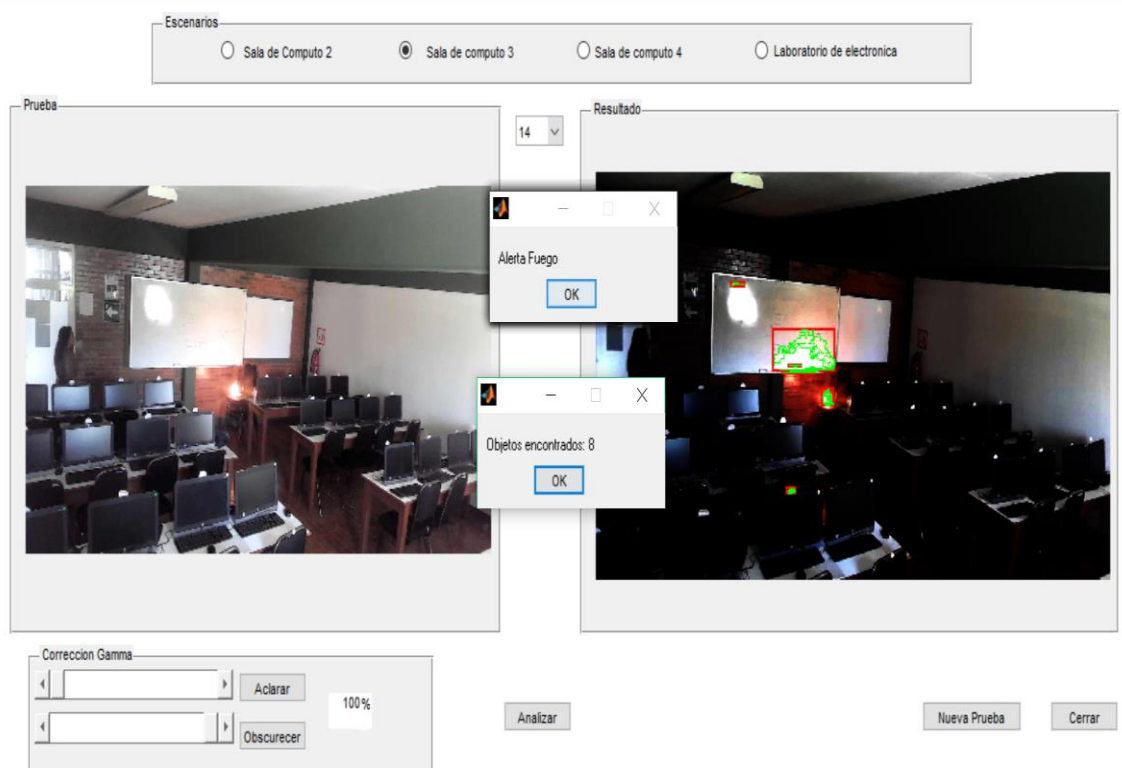


Figura 6-25 Análisis de la cuarta imagen del escenario 2.

Los resultados del análisis del segundo escenario se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8 Resumen de los resultados obtenidos del escenario 2

Figura	Detección positiva	Objetos encontrados	Objetos clasificados como fuego	Objetos clasificados como no fuego.
Figura 6-22	Si	8	2	6
Figura 6-23	Si	8	2	6
Figura 6-24	Si	4	4	0
Figura 6-25	si	8	2	6

Al tener el resumen de los resultados de las pruebas del algoritmo en las fotos seleccionadas del escenario 2, se concluye que, para este escenario en particular, la detección tiene una efectividad reducida en comparación a los dos escenarios anteriores, al identificar un mayor número de objetos que no corresponden al fuego. Concluyendo que, para los escenarios con una percepción de luz mayor a 69 lúmenes en su interior, el algoritmo tiene dificultades para un correcto funcionamiento.

Para el último escenario al que se le realizaron las pruebas preliminares, el escenario 3, sala de cómputo 4, los resultados del análisis previo fueron los siguientes:

Como una primera prueba del escenario 3, se analiza la primera imagen seleccionada para este escenario, debido a que la luminosidad es menor a treinta lúmenes, se decide realizar el análisis de la imagen sin utilizar el factor de corrección gamma, teniendo el resultado que se muestra en la Figura 6-26.

Como resultado del análisis de la primera foto se obtuvo una identificación positiva además se identificó dos objetos, los cuales representan: el reflejo del fuego el objeto 1 y objeto 2 el fuego, resumiendo que realizó un análisis con un buen resultado. Sin embargo, para las siguientes tres imágenes que se eligieron, no se tiene este mismo nivel de luminosidad y la hora en que se tomaron fue diferente a la primera foto. Al realizar el análisis de las siguientes fotos se tuvo como resultado:

En la segunda imagen que se eligió analizar tiene una iluminación de setenta lúmenes, en el cual se hizo uso de un factor gamma de más del 70%, los resultados obtenidos se muestran en las imágenes de las figuras: Figura 6-27, Figura 6-28, Figura 6-29.

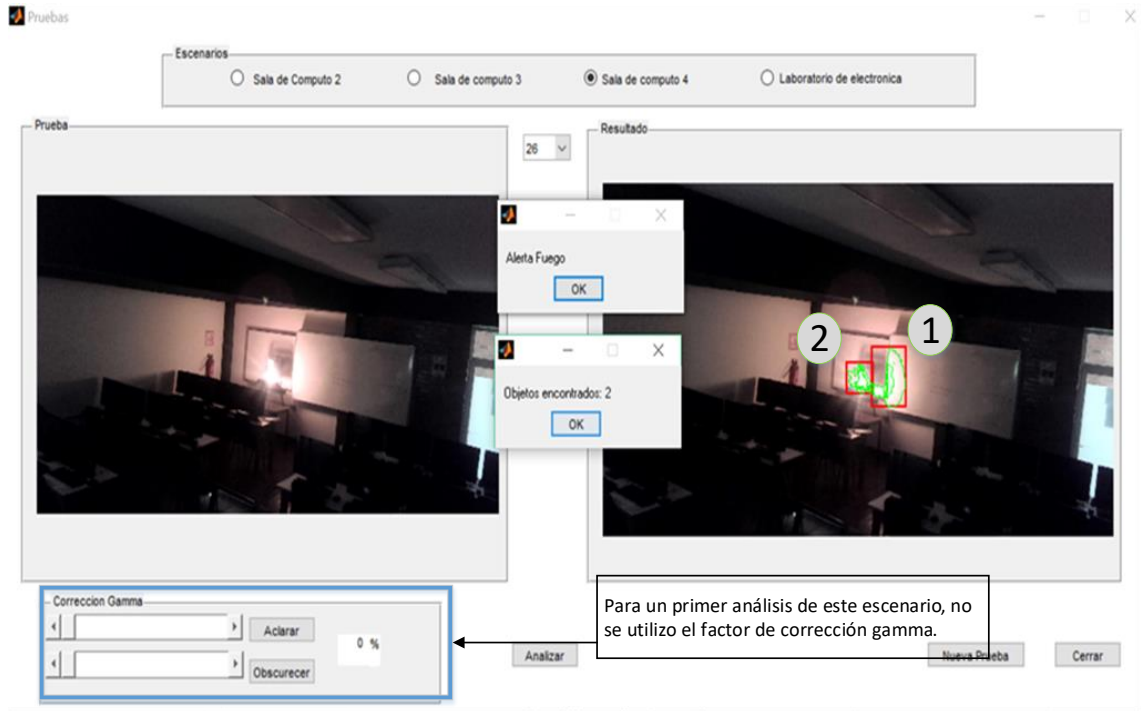


Figura 6-26 Primer análisis del escenario 3

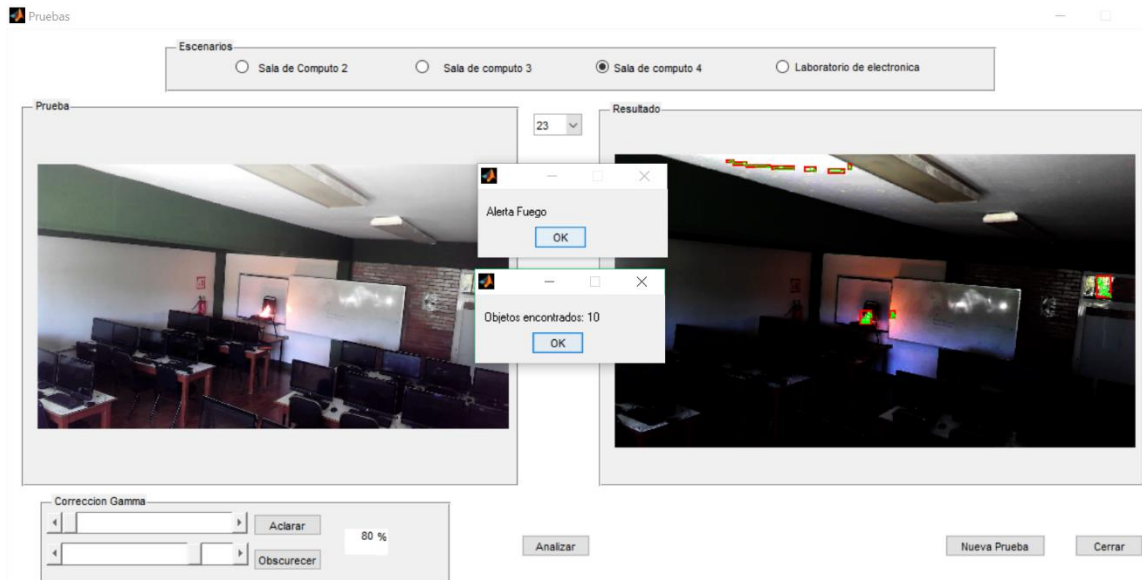


Figura 6-27 Segunda imagen analizada del escenario 3

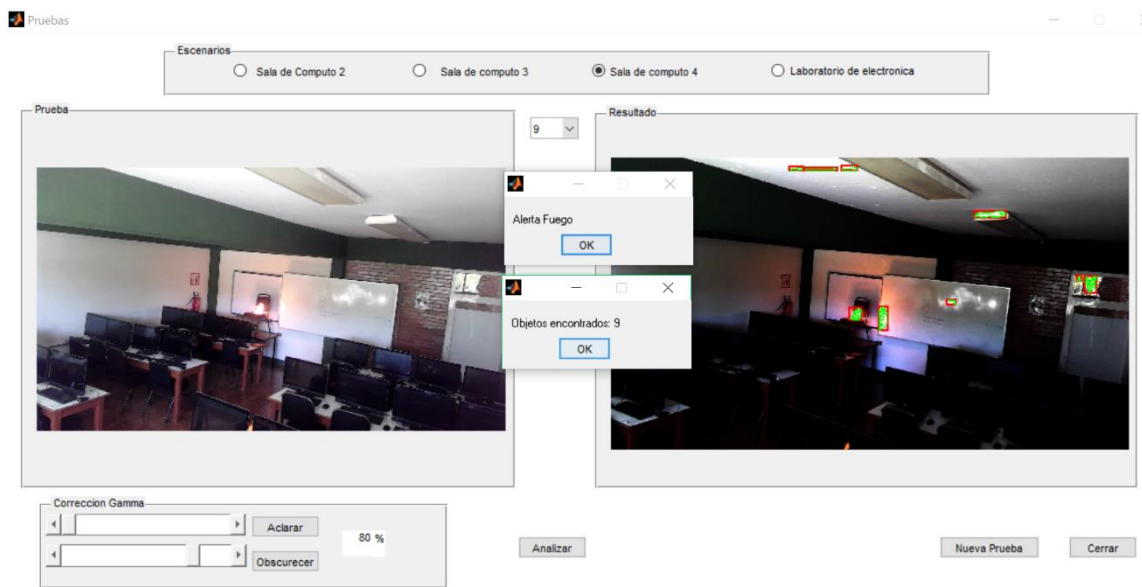


Figura 6-28 Tercera imagen analizada del escenario 3

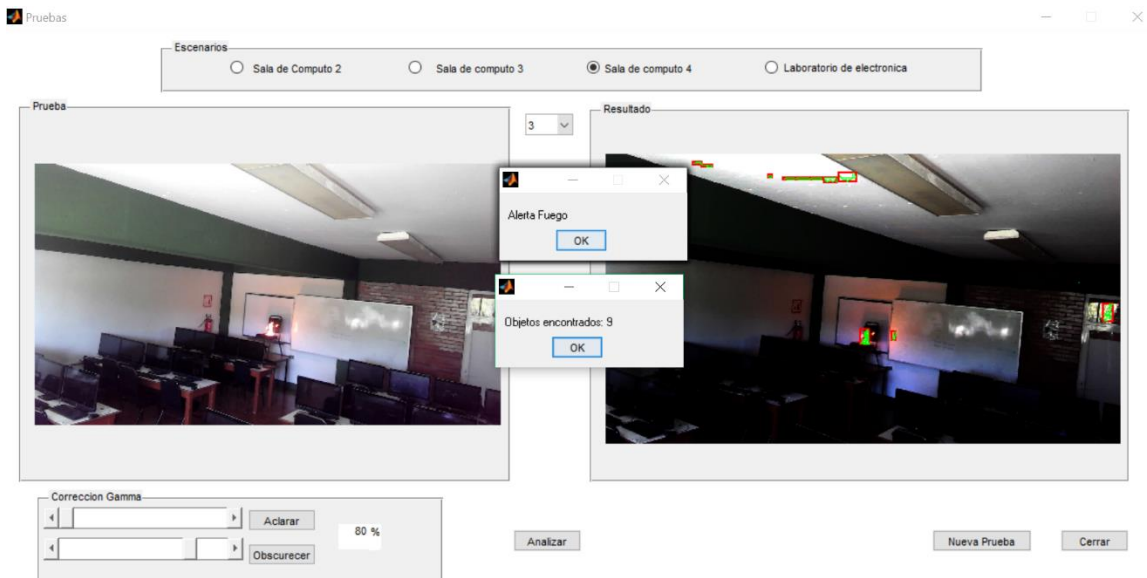


Figura 6-29 Cuarta imagen analizada del escenario 3.

En el análisis de las últimas tres imágenes se obtuvieron resultados no similares al que se obtuvo del análisis de la primera imagen, difiriendo en el número de objetos encontrados, ya que es mayor en este último análisis, esto se debe al factor de la iluminación del escenario que depende de la estructura física del escenario (si hay posibles entradas de luz, como ventanas o rejillas). Los resultados obtenidos de análisis del tercer escenario se registraron en la Tabla 9.

Tabla 9 Resumen de los resultados obtenidos del escenario 3

Figura	Detección positiva	Objetos encontrados	Objetos clasificados como fuego	Objetos clasificados como no fuego.
Figura 6-26	Si	2	2	0
Figura 6-27	Si	10	4	6
Figura 6-28	Si	9	2	7
Figura 6-29	Si	9	2	7

Se puede observar en la tabla anterior que el número de objetos que identificados como fuego en la primera foto es considerablemente menor que el de las tres fotos, siendo menor por casi cinco veces a ellas, esto es debido a la cantidad de luminosidad que depende en este escenario de la hora en que se toma la fotografía. Entonces se establece nuevamente

que, en los escenarios con un valor de luminosidad mayor a 70 lúmenes, la identificación de fuego presenta un resultado menor efectivo que en escenarios con un valor de luminosidad menor que 30 lúmenes, al confundir objetos luminosos como fuego.

Como conclusión de estas pruebas preliminares, se establece que:

Para los escenarios con luminosidad menor a 35 lúmenes, se puede no usar el factor gamma para realizar el análisis de las fotografías, y si usar el factor gamma para tener una mejor percepción visual del escenario.

En escenarios con un valor de luminosidad mayor a 65 lúmenes, se decide usar el factor gamma entre el 60% y el 90% obscureciendo la fotografía para realizar el análisis del algoritmo, y no usar el factor gamma solo para tener una mejor percepción visual del escenario.

Y solo para los escenarios que tengan un nivel de luminosidad mayor a cien lúmenes utilizar más del 90% del valor del factor gamma, para realizar el análisis del algoritmo, y usar un valor menor al 30% para la percepción visual del escenario.

6.2 Validación del funcionamiento

Debido a que no existe un estándar para la medición de efectividad total de un algoritmo que detecta fuego en imágenes digitales, es esta investigación se toman en cuenta dos parámetros para la evaluación de la efectividad del algoritmo, los cuales son:

- La sensibilidad: que representa de la tasa del total de detecciones, el porcentaje real de detecciones verdaderas o correctas (Verdaderos positivos).
- La especificidad: que representa del total de la tasa de no detecciones, el porcentaje real de no detecciones correctas (Verdaderos negativos) [29].

Para evaluar el funcionamiento real del algoritmo, se realizó el análisis de treinta y cinco fotos por cada uno de los cuatro escenarios, con y sin presencia de fuego en ellas. Con el objetivo de conocer el porcentaje de Sensibilidad y Especificidad. Además de utilizar las

pruebas preliminares como una herramienta de apoyo, que cumplen la tarea de calibrar el valor del factor gamma para mejorar el análisis de cada escenario.

Los resultados de la evaluación de la efectividad del algoritmo en cada escenario se muestran a continuación:

Para el primer escenario el resultado se muestra en la Tabla 10.

Tabla 10 Resultados de la efectividad del escenario 1

Efectividad del escenario 1 Sala de computo 2		
Total de fotos		35
Fotos con presencia de fuego		26
Fotos sin presencia de fuego		9
Fotos con presencia de fuego		
Total de fotos	26	100%
Identificación positiva	24	
Identificación negativa	2	
Sensibilidad		92.31%
Fotos sin presencia de fuego		
Total de fotos	9	100%
No identificación de fuego	5	
Identificación positiva de fuego	4	
Especificidad		55.56%

En el primer escenario del total de las treinta y cinco fotos, veintiséis de ellas contaban con presencia de fuego y nueve de ellas no contaban con fuego. En el caso de las veinte seis fotos que contaban con presencia de fuego, el análisis del algoritmo acertó en la detección de fuego en veinticuatro fotos y erro en dos ellas, teniendo como resultado final del análisis un nivel de sensibilidad de 92.31%, para el caso de las nueve fotos que no contaban con presencia de fuego, el análisis del algoritmo acertó en la no detección de fuego en cinco de las fotos y erro en cuatro de ellas, teniendo como resultado final un nivel de especificidad de 55.56%, cabe aclarar que las imágenes donde el sistema erro se deben a condiciones físicas del escenario.

Para el segundo escenario los resultados se muestran en la Tabla 11.

Tabla 11 Resultados de la efectividad del escenario 2

Efectividad del escenario 2 Sala de computo 3		
Total de fotos		35
Fotos con presencia de fuego		27
Fotos sin presencia de fuego		8
Fotos con presencia de fuego		
Total de fotos	27	100%
Identificación positiva	23	
Identificación negativa	4	
Sensibilidad		85.19%
Fotos sin presencia de fuego		
Total de fotos	8	100%
No identificación de fuego	6	
Identificación positiva de fuego	2	
Especificidad		75.00%

El segundo escenario con igual total de treinta y cinco fotos, en veintisiete de ellas se contaba con presencia de fuego y ocho de ellas no se contaba con fuego. En el caso de las fotos con presencia de fuego el análisis del algoritmo acertó en la detección de fuego en veintitrés fotos y erro en cuatro de ellas, teniendo como resultado final del análisis un nivel de sensibilidad de 85.19%, para las fotos que no contaban con presencia de fuego, el análisis del algoritmo acertó en la no detección de fuego, en seis de las fotos y erro en dos, teniendo como resultado final un nivel de especificidad de 75%, aumentando en alrededor de un 20% este último nivel en comparación del resultado del nivel de especificidad del primer escenario.

Para el tercer escenario los resultados registrados del análisis del algoritmo se muestran en la Tabla 12.

Tabla 12 Resultados de la efectividad del escenario 3

Efectividad del Escenario 3 Sala de computo 4	
Total de fotos	35
Fotos con presencia de fuego	26
Fotos sin presencia de fuego	9
Fotos con presencia de fuego	

Total de fotos	26	100%
Identificación positiva	24	
Identificación negativa	2	
Sensibilidad		92.31%
Fotos sin presencia de fuego		
Total de fotos	9	100%
No identificación de fuego	7	
Identificación positiva de fuego	2	
Especificidad		77.78%

En el tercer escenario de las treinta y cinco fotos, como en el primer escenario en veintiséis de ellas se contaba con presencia de fuego y en nueve de ellas no se contaba con fuego, para este caso el algoritmo acertó en la detección positiva de fuego en veinticuatro fotos y erro en dos ellas, teniendo como resultado final un nivel de sensibilidad de 92.31% compartiendo este resultado con el del primer escenario y aumentándolo casi un 5% con respecto al del segundo escenario. En el caso de las nueve fotos que no contaban con presencia de fuego, el análisis del algoritmo acertó en la no detección de fuego, en siete de las fotos y erro en dos de ellas, teniendo como resultado final un nivel de especificidad de 77.78%, teniendo un resultado semejante al del segundo escenario difiriendo con alrededor de 2% y aumentando como el segundo escenario en casi 20% en comparación del primer escenario.

Para el cuarto escenario los resultados se muestran en la Tabla 13.

Tabla 13 Resultados de la efectividad del escenario 4

Efectividad del Escenario 4 Laboratorio de electrónica		
Total de fotos		35
Fotos con presencia de fuego		24
Fotos sin presencia de fuego		11
Fotos con presencia de fuego		
Total de fotos	24	100%
Identificación positiva	21	
Identificación negativa	3	
Sensibilidad		87.50%
Fotos sin presencia de fuego		
Total de fotos	11	100%
No identificación de fuego	8	
Identificación positiva de fuego	3	
Especificidad		72.73%

Para el cuarto y último escenario de las treinta y cinco fotos seleccionadas, en veinticuatro se contaba con presencia de fuego y en once de ellas no se contaba con fuego. En el primer caso de las fotos con fuego el algoritmo acertó en la detección positiva en veintiún fotos y erro en tres ellas, teniendo como resultado final un nivel de sensibilidad de 87.50%, resultado semejante al del segundo escenario con una diferencia de alrededor de 2% y difiriendo con los resultados del primer y tercer escenario por casi un 5%. En el caso de las fotos que no contaban con presencia de fuego, el análisis del algoritmo acertó en la no detección de fuego, en ocho de las fotos y erro en tres de ellas, teniendo como resultado final un nivel de especificidad de 72.73%, resultado semejante al del segundo y tercer escenario difiriendo alrededor de 2% y 3% y aumentando este resultado como lo hacen el segundo y tercer escenario en casi 20% comparándolos con el del primer escenario.

6.3 Resumen de los resultados

Para los resultados de efectividad del algoritmo en los cuatro escenarios se realizaron evaluando a los dos parámetros escogidos para esta tarea, la sensibilidad y la especificidad, el resultado general se visualiza en la gráfica de la Figura 6-30, con el color

azul se representa el nivel de la sensibilidad y con el color naranja se representa el nivel de especificidad de cada escenario.

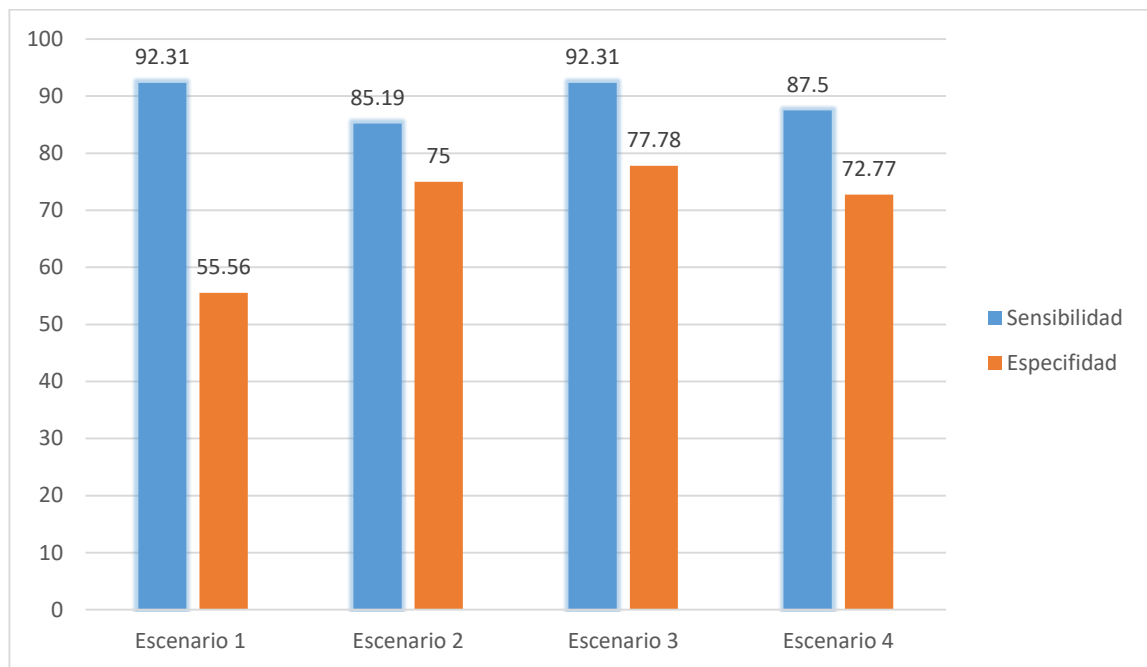


Figura 6-30 Resultados de la sensibilidad y especificidad de los cuatro escenarios.

La grafica anterior muestra el resumen de los dos parámetros que se eligieron para la evaluación del algoritmo en los cuatro escenarios de prueba, mostrando el nivel que tienen cada uno, de estas dos variables.

Como un último criterio personal, se realiza el promedio del nivel total de sensibilidad y especificidad, por los cuatro escenarios.

- Sensibilidad promedio: 89.32%
- Especificidad promedio: 70.27%

Haciendo referencia a la hipótesis de la investigación, y tomando en cuenta los resultados de cada escenario, se concluye que la hipótesis planteada, se cumplió en el caso de detecciones positivas.

CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado el proceso de diseño y validación del funcionamiento de un algoritmo para la detección de fuego en imágenes digitales mediante el uso de técnicas de visión artificial, dentro de las que se pueden destacar: aplicación de filtros, sustracción de fondo, corrección de factor gamma, binarización, segmentación, extracción de características geométricas y extracción de componentes de color.

El uso de estas técnicas, en una secuencia adecuada, permiten la identificación de elementos que distinguen al fuego de otros elementos que se encuentran en una imagen, por lo que puede proponerse como un método adecuado para la monitorización y vigilancia de espacios cerrados de manera autónoma, empleando cámaras convencionales, como las utilizadas en sistemas de circuito cerrado de televisión.

Como principal conclusión de este trabajo se tiene un desempeño satisfactorio del algoritmo desarrollado, según el nivel de sensibilidad obtenido en los cuatro escenarios evaluados, con valores por arriba del 80 %. Tomando como referencia este resultado se determina que se cumple la hipótesis propuesta, al superar el valor establecido como un 75 % al inicio del proyecto, en lo que se refiere a la identificación positiva del fuego en las imágenes digitales.

Por otro lado, el nivel de especificidad en tres de los escenarios (escenario 2, escenario 3 y escenario 4), se encontraron entre el 72 y 77 %, dejando solo al escenario 1 con un nivel de especificidad de 55 %. Esto implica que el algoritmo emite falsas alarmas con relativa frecuencia, por lo que requiere de una investigación más profunda para mejorar este índice.

Es importante hacer notar que los resultados se ven influenciados por los factores físicos de cada escenario, que es afectado por características como: el nivel de luminosidad (factor que depende tanto de la hora en que se monitorea el escenario, así como también de algún elemento del escenario que permita el acceso de luz en el escenario, como alguna ventana o puerta) u objetos reflejantes (material del suelo, algún espejo, pintaron), que pueden ocasionar un error al realizar el análisis mediante el algoritmo, provocado como resultado la emisión de una detección errónea o falsa detección.

Algunas herramientas y métodos pueden ser empleados para mejorar la percepción para la identificación del fuego; por ejemplo, las fotos de los escenarios con alta luminosidad se vieron notablemente mejoradas mediante el ajuste del factor gamma, permitiendo un buen funcionamiento del algoritmo en la detección correcta del fuego. De aquí se desprende que un ajuste automático del factor gamma, a partir de la medición en tiempo real de la luminosidad, puede ser incorporado al algoritmo para incrementar su especificidad.

ANEXO 1: Secciones especiales del código

Corrección digital.

Para el caso del método de corrección digital, se utiliza el factor de corrección gamma, empleando la ecuación Ec 1.

$$V_{out} = V_{in}^{\gamma} \quad Ec 3$$

Donde:

V_{out} → Nuevos valores de salida de los pixeles.

V_{in}^{γ} → Valores de entrada o valores originales de los pixeles,
elevados al exponente Gamma.

Donde en MATLAB

V_{in}^{γ} → la matriz de valores originales de la imagen, multiplicados por el exponente gamma.

Donde el valor de gamma para aclarar la imagen tiene un intervalo de 0 a 1, aumentando en 0.1, los valores del exponente gamma.

Y para obscurecer la imagen, el valor de gamma tiene un intervalo de 1 a 4, aumentando en 0.1, los valores del exponente gamma.

V_{out} → son los nuevos valores de la matriz de la imagen.

El código es el siguiente:

```
function pushbutton4_Callback(hObject, eventdata, handles)
global v
global bg %Es la matriz original, que guarda la informacion de la
imagen.
global pos1 %Representa el valor del exponente Gamma
    ag2=double(v);
    ag2=ag2/255; % Se utiliza una nueva matriz para realizar la operación
del factor de corrección gamma.
    bg=ag2.^(pos1); % Se realiza el factor de correccion gamma.
    bg=bg*255;
    bg=uint8(bg);
    axes(handles.axes2)
```

```
imshow(bg);
```

DetECCIÓN POR COLOR.

Condiciones de color

Para la detección por color se realizó una función que separa los píxeles según los valores deseados, en este caso los que se obtuvieron para la ventana de color.

Se describe a continuación la función para la detección por color del fuego en una imagen, en el lenguaje de Matlab.

```
function [im_yellow, num]=VentanaDeColor(im)
[m,n,]=size(im); %carga la imagen
im_yellow=zeros(m,n); %Tamaño de la imagen
num=0;
%aplicacion de los valores de la ventana de color
for i=1:m
    for j=1:n
        if(im(i,j,1)>243&&im(i,j,1)<253) %límites de color del plano
rojo
            im_yellow(i,j)=1;
            num=num+1;
        elseif(im(i,j,2)>174&&im(i,j,2)<230) %límites de color del
plano verde
            im_yellow(i,j)=1;
            num=num+1;
        elseif(im(i,j,3)>70&&im(i,j,3)<160) %límites de color del plano
azul
            im_yellow(i,j)=1;
            num=num+1;
        elseif(im(i,j,1)==255&&im(i,j,2)==255&&im(i,j,3)==255) %límites
de color para los tres planos de color
            im_yellow(i,j)=1-1;
            num=num+1;
        end
    end
end
end

% la imagen procesada se guarde en la variable im, para su análisis
posterior.
```

En el método de la detección por color, se comparan los valores de los objetos de la imagen y solo se quedan los que cumplan con las condiciones de color, como resultado se obtiene una región de interés.

Sustracción de fondo.

Una vez que se cuenta con la región de interés, la imagen pasa al método de binarización, según el siguiente método para la binarización de la imagen en el lenguaje de Matlab.

```
Como primer paso
% Se carga la imagen im (imagen arbitraria).
a = imread ( 'im.jpg' );
%Como segundo paso
%Se Calcula el umbral usando graythresh. Los valores tienen un rango de
0 a 1
nivel = graythresh (im)
nivel = 0.4941 %Valor por defecto del nivel, para separar los valores
% Se binariza la imagen con la siguiente instruccion
BW = imbinarize (im, nivel);
% La imagen se guarda en la variable BW, para su uso posterior
%Se muestra la imagen.
imshow (BW);
```

En este apartado del código, los valores de la imagen en formato RGB, que tienen un valor de intensidad de color que va de 0 a 255, pasan a ser valor de entre 0 y 1, separando a la región de interés (al igualar los valores a 1), del fondo de la imagen (igualando los valores del fondo a 0).

Segmentación.

Obtención de propiedades

Con la instrucción: `regionprops`, en Matlab se obtienen las propiedades de los objetos que se encuentran en formato binario de Matlab.

```
%Calculo de propiedades de los objetos
prop=regionprops(L, 'Area', 'Perimeter', 'Centroid', 'BoundingBox');
```

Circularidad

La propiedad obtenida con la instrucción anterior sirve para realizar la comparación con figuras regulares. Que se realiza al comparar los valores del resultado de la circularidad de los objetos encontrados como fuego, con valores de figuras regulares que ya están establecidos.

```
if circularidad >= 0.04811
%text(prop(k).Centroid(1),prop(k).Centroid(2), 'Triangulo', 'Color', 'r');
```

```
elseif circularidad >= 0.0795
%text(prop(k).Centroid(1),prop(k).Centroid(2),'Circulo','Color','g');
    else if circularidad >= 0.0625

%text(prop(k).Centroid(1),prop(k).Centroid(2),'Cuadrado','Color','b');
else if circularidad >= 0.00675
%text(prop(k).Centroid(1),prop(k).Centroid(2),'Fuego','Color','b');
    warndlg('Alerta Fuego ','Mensaje');

end
```

Se compara el valor de la propiedad “circularidad” de los objetos, y de acuerdo con su valor, será clasificado como figura regular o fuego.

ANEXO 2 Código de la interface Pruebas

```
function varargout = Pruebas(varargin)
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
                  'gui_Singleton',   gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn',  @Pruebas_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn',   @Pruebas_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn',   [] , ...
                  'gui_Callback',    []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% End initialization code - DO NOT EDIT

% --- Executes just before Pruebas is made visible.
function Pruebas_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
function varargout = Pruebas_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)

% Get default command line output from handles structure
varargout{1} = handles.output;

% --- Executes on button press in pushbutton1.
function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
close(Pruebas);
Inicio

% Hints: contents = cellstr(get(hObject,'String')) returns popupmenu1
contents as cell array
%     contents{get(hObject,'Value')} returns selected item from
popupmenu1

% --- Executes when selected object is changed in Escenarios.
function Escenarios_SelectionChangeFcn(hObject, eventdata, handles)
global A
A=get(hObject,'String');
A=str2num(A);

% --- Executes on selection change in popupmenu1.
function popupmenu1_Callback(hObject, eventdata, handles)
global A v
b=A;
%% Mostrar imagenes del escenario 1
if b==1
```

```

        cont=get(hObject,'string');
a=get(hObject,'Value');
val=cont(a);
switch cell2mat(val)
    case '1'
        v=imread('C:\Users\Gus\Documents\MATLAB\Afina1\2 Sala de
computo 2\E2 pruebas finales\1 (1).jpg');
    case '2'
        v=imread('C:\Users\Gus\Documents\MATLAB\Afina1\2 Sala de
computo 2\E2 pruebas finales\1 (2).jpg');

end
axes(handles.axes1)
imshow(v);
%% Mostrar imagenes del Escenario 2
elseif b==2
    cont=get(hObject,'string');
a=get(hObject,'Value');
val=cont(a);
switch cell2mat(val)
    case '1'
        v=imread('C:\Users\Gus\Documents\MATLAB\Afina1\3 Sala de
computo 3\E3 pruebas finales\1 (1).jpg');
    case '2'
        v=imread('C:\Users\Gus\Documents\MATLAB\Afina1\3 Sala de
computo 3\E3 pruebas finales\1 (2).jpg');

end

axes(handles.axes1)
imshow(v);
%% Mostrar imagenes del Escenario 3
elseif b==3
    cont=get(hObject,'string');
a=get(hObject,'Value');
val=cont(a);
switch cell2mat(val)
    case '1'
        v=imread('C:\Users\Gus\Documents\MATLAB\Afina1\4 Sala de
computo 4\E4 pruebas finales\1 (1).jpg');
    case '2'
        v=imread('C:\Users\Gus\Documents\MATLAB\Afina1\4 Sala de
computo 4\E4 pruebas finales\1 (2).jpg');
end

axes(handles.axes1)
imshow(v);
%% Mostrar imagenes del escenario 4
elseif b==4
    cont=get(hObject,'string');
a=get(hObject,'Value');
val=cont(a);
switch cell2mat(val)
    case '1'

```

```

        v=imread('C:\Users\Gus\Documents\MATLAB\Afinal\5 Laboratorio de
electronica\Pruebas finales\1 (1).jpg');
        case '2'
            v=imread('C:\Users\Gus\Documents\MATLAB\Afinal\5 Laboratorio de
electronica\Pruebas finales\1 (2).jpg');
        end

        axes(handles.axes1)
        imshow(v);

end

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function popupmenu1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to popupmenu1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns
called

% Hint: popupmenu controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes on button press in pushbutton2.
function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)
clc

global v bg
axes(handles.axes2);
a=bg;
imshow(a);
[b]=imBinaria(a);           %Obtener imagen en FORMATO BINARIO
%binarizacion
a_bin=im2bw(b);
%Eliminar objetos pequeños
a_bin=bwareaopen(a_bin,100); %Mas grande 14500 MP 386-400
a_label=bwlabel(a_bin,8);
n1=max(max(a_label));
%Elementos conectados
[L n]=bwlabel(a_bin);
%Calculo de propiedades de los objetos
prop=regionprops(L,'Area','Perimeter','Centroid','BoundingBox');
hold on
%Graficacion de las cajas de objetos
for n=1:size(prop,1)

rectangle('Position',prop(n).BoundingBox,'EdgeColor','r','LineWidth',3)
end

%Perimetro de la imagen
B=bwboundaries(a_bin);

```

```

for k=1:length(B)
boundary=B{k};
plot(boundary(:,2),boundary(:,1),'g','LineWidth',1)
end
hold off

%Ubicacion de objetos en la imagen por sus coordenadas de su centroide
cen=regionprops(a_bin,'centroid');
centroides=cat(1,cen.Centroid)

% --- Executes on slider movement.
function slider6_Callback(hObject, eventdata, handles)
global pos
pos=get(hObject,'Value');
pos2=(pos*10);
set(handles.text1,'String',pos2);

%axes(handles.axes2);
%imshow(bg);

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function slider6_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to slider6 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: slider controls usually have a light gray background.
if isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor',[.9 .9 .9]);
end

% --- Executes on button press in pushbutton3.
function pushbutton3_Callback(hObject, eventdata, handles)
global v pos bg
ag1=double(v);
ag1=ag1/255;
bg=ag1.^((pos)*(0.1));
bg=bg*255;
bg=uint8(bg);
axes(handles.axes2)
imshow(bg);

% --- Executes on slider movement.
function slider7_Callback(hObject, eventdata, handles)
global pos1
pos1=get(hObject,'Value');
pos3=(pos1*100)/4;
set(handles.text1,'String',pos3);

```

```

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function slider7_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to slider7 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns
called

% Hint: slider controls usually have a light gray background.
if isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor',[.9 .9 .9]);
end

% --- Executes on button press in pushbutton4.
function pushbutton4_Callback(hObject, eventdata, handles)
global v pos1 bg
ag2=double(v);
ag2=ag2/255;
bg=ag2.^(pos1);
bg=bg*255;
bg=uint8(bg);
axes(handles.axes2)
imshow(bg);

% --- Executes on button press in pushbutton5.
function pushbutton5_Callback(hObject, eventdata, handles)
close(Pruebas);
NuevaPrueba

```

REFERENCIAS

- [1] M. J. Hurley y S. o. f. P. Engineers, *SFPE handbook of fire protection engineering*, New York.: Springer., 5ta ed. 2016.
- [2] J. Areu Capote, «Seguridad contra Incendios y Explosiones: Principios Basicos, E.T.S.Ingenieros Industriales y de telecomunicación., SANTANDER, 2011.
- [3] C. K. Westbrook, «ScienceDirect Elsevier B.V.,» 01 01 1991. [En línea]. Available <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0082078481800793>. [Último acceso: Jueves 6 de abril Abril 2017].
- [4] C. E. y B. Jr., *Oxygen-Enhanced combustios second edition*, NEW YORK: CRC Press, 2013.
- [5] J. G. Rodriguez, «es.slideshare.net,» 9 Febrero 2013. [En línea]. Available http://es.slideshare.net/josegpradar1/principios-bsicos-de-deteccin-y-alarma-contraincendios-16439697?qid=b78afa89-631e-49a7-a19d-afb8727ded71&v=&b=&from_search=8. [Último acceso: 16 Agosto 2016].
- [6] W. D. Walton, T. Philip H. y Y. Ohm, «Estimating Temperatures in Compartme Fires,» de *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, New York, Spring 1995, pp. 996-1023.
- [7] M. M. Industries, «Metal Manufacturing Industries,» Urano PyME, 9 Enero 201: [En línea]. Available: <http://mmiopenings.com/cuales-son-las-etapas-de-un-incendio/>. [Último acceso: 9 Marzo 2017].
- [8] FireStation La biblioteca del parque., «Clases de fuego segun UNE-EN-2-1994/A de 2005, NFPA 10 y NCH 934.,» FireStation, 20 10 2010. [En línea]. Available <https://firestation.wordpress.com/2010/10/30/clases-de-fuego-segun-une-en-2-1994a1-de-2005/>. [Último acceso: 18 05 2017].

- [9] V. H. Medina García, J. M. Cueva Lovelle, R. González Crespo y E. Torres Franco «Software para la detección y Extinción de incendios Forestales,» de *Seventh LACCEI Latin America And Caribbean Conference for Engineering and Technology (LACCEI'2009)*, San Cristoval Venezuela,, 2009 June 2-5..
- [10] C. Pérez, «Novedades Tecnológicas en la detección de incendios,» de *6th International Conference on Fire Safety Engineering*, Madrid, 2011.
- [11] A. W. Keung Kwork y F. Nai Kong, «Study of Pool Fire Heat Release Rate Using Wide Fire Detection,» *International High Performance Buildings Research Centre for Fire Engineering*, vol. 136, p. 1 15, 2014.
- [12] J. L. Ibarra Montoya y F. M. Huerta Martínez, «Modelado espacial de incendio una herramienta predictiva para el Bosque "La Primavera" Jalisco México.,» *Ambiente & Agua An interdisciplinary Journal of Applied Science*, vol. 11, pp. 34-49, 2016.
- [13] R. Campbell, «"Incendios intencionales" de la NFPA,» NFPA Research, Data and Analytics Division, Batterymarch Park, Quincy, MA 02169, EE. UU., Julio de 2017.
- [14] J. P. Dukuzumuremyi, B. Zou y D. Hanyurwimfura, «A Novel Algorithm for Fire/Smoke Detection based on Computer-Vision,» *International Journal of Hybrid Information Technology*, vol. 7, pp. 143-154, 2014.
- [15] U. Töreyn B., Y. Dedeoglu , U. Güdükbay y E. A. Cetin, «Computer vision based method for real-time fire and flame detection,» *Elsevier*, vol. 26, pp. 49-58, 2008
- [16] U. B. Töreyn, Y. Dedeoglu y E. A. Cetin, «Flame detection in video using hidden markov models,» de *Image Processing, 2005. ICIP 2005. IEEE International Conference on*, Genova, Italy, 2005.

- [17]L. Villers Ruiz y J. López Blanco, Incendios forestales en México Metodos de evaluación, México: Universidad Nacional Autónoma de México, Centro de Ciencias de la Atmosfera , 2006.
- [18]J. M. Montero Martínez, J. M. Polanco Martínez y F. Oropeza Rosale «Implementación de un algoritmo para la detección de fuegos usando imágenes GOES,» de *Incendios Forestales en México Métodos de evaluación*, México Universidad Nacional Autónoma de México, Centro de Ciencias de la Atmosfera 2006, pp. 25-40.
- [19]G. Bermúdez y P. Sierra, «Robot para la detección de focos de incendio “Flamebot”,» *ResearchGate*, pp. 1-6, 2014.
- [20]G. Galiano Casas y E. García Gonzalo, «Computación Numérica,» Departament de Matemàtiques Universidad de Oviedo, 05 06 2014. [En línea]. Available http://www.unioviedo.es/compnum/laboratorios_web/laborat03_intro_imagen/laborat03.html. [Último acceso: 29 11 2016].
- [21]E. Cuevas, D. Zaldívar y M. Pérez, *Procesamiento digital de imágenes con MATLAB y Simulink*, México: Alfaomega, 2010.
- [22]G. Pajares Martinsanz, *Visión por computador*, México: Alfaomega, 2008.
- [23]D. Renza, D. L. Ballesteros y R. Rincon, «Método de ocultamiento de píxeles para esteganografía de imágenes en escala de gris sobre imágenes a color.,» *Ingeniería y Ciencia.*, vol. 12, pp. 145-162, 2016.
- [24]M. F. De Abreu, V. Barrios y A. Reigosa, «Selección Automática del nivel optimo de umbral para segmentación por histograma de imágenes RGB de cortes histológicos de cáncer de mama.,» *INGENIERÍA UC*, vol. 9, nº 1316-6832, pp. 1-10, 2002.

- [25]J. A. Cortés Ososrio y W. Ardila Ureña, «Técnicas alternativas para la conversión de imágenes a color a escala de grises en el tratamiento digital de imágenes.,» *Scientia Et Technica.*, vol. XVII, pp. 207-212, 2011.
- [26]The MathWorks, Inc. © 1994-2017, «System Requirements & Platform Availability, System Requirements for MATLAB R2017a,» MathWorks, - - 2017 [En línea]. Available: <https://www.mathworks.com/support/sysreq.html>. [Último acceso: 9 Abril 2017].
- [27]D. M. Domènech Borregón, «Sistema de detección de incendios forestales utilizando técnicas de procesamiento de imagen.,» Universidad Politécnica de Catalunya, España, 2011-2012.
- [28]Carlos A. Cattaneo, Ledda I. Larchera, Ana I. Ruggeri, Andrea C. Herrero, Enrique M. BIASONI., «Métodos de umbralización de imágenes digitales basados en entropía de Shannon y otros.,» *Asociación Argentina de Mecánica Computacional*, vol. XXX, pp. 2785-2805, 2011.
- [29]K. ByoungChul, J. P. JunOh y N. Jae-Yeal, «Spatiotemporal bag-of-features for early wildfire smoke detection☆,» *Image and Vision Computing*, vol. 31, n° 10, pp. 786-795, 2013.