



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
PRIMER CLAUSTRO UNIVERSITARIO DE COLOMBIA
T U N J A



ingenio Magno

8
No. 1



ISSN (versión impresa)

2145-9282

ISSN (en línea)

2422-2399

Enero-junio de 2017, vol. 8, no. 1

Universidad Santo Tomás

Tunja, Boyacá

Publicación semestral

Hecho el depósito que establece la ley

© Derechos reservados

Universidad Santo Tomás

Suscripción y canje

Unidad de Investigación

Cll. 19 No. 11-64

Universidad Santo Tomás, Tunja-Colombia

PBX: 744 0494

Línea gratuita: 018000 932340

desde cualquier lugar del país

<http://revistas.ustatunja.edu.co/index.php/ingeniomagno>

Los conceptos expresados en los artículos son de exclusiva responsabilidad de sus autores y no comprometen a la Institución o a la publicación.

División de Arquitectura e Ingenierías

INGENIO MAGNO	Tunja Colombia	Vol. 8 No. 1	pp. 1-172	Enero- junio	2017
---------------	-------------------	-----------------	-----------	-----------------	------



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
PRIMER CLAUSTRO UNIVERSITARIO DE COLOMBIA
T U N J A



Directivos

P. Jorge Ferdinando RODRÍGUEZ RUIZ, O.P.
Rector

P. José Antonio BALAGUERA CEPEDA, O.P.
Vicerrector Administrativo-Financiero

P. Javier Antonio CASTELLANOS, O.P.
Vicerrector Académico

P. Samuel Elías FORERO BUITRAGO, O.P.
Decano de División de Ingeniería y Arquitectura

Jimena BOHÓRQUEZ HERRERA, Ph.D.
Directora Unidad de Investigaciones

Édgar Andrés GUTIÉRREZ CÁCERES, Esp.
Director Centro de Investigaciones en Ingeniería
San Alberto Magno - (CIAM)

Editor

Fredy Andrés Aponte Novoa, M.Sc.
Centro de Investigación en Ingeniería Alberto Magno
(CIAM)
ingeniomagno@ustatunja.edu.co

Equipo Editorial

Edwin Blasnilo Rúa Ramírez, M.Sc.
Coeditor Universidad Santo Tomás, Tunja, Colombia
edwin.rua@usantoto.edu.co

José Ricardo Casallas Gutiérrez, M.Sc.
Coeditor Universidad Santo Tomás, Tunja, Colombia
jose.casallas@usantoto.edu.co

John Fredy Guzmán Vargas
Profesional en Filosofía y Letras
Corrector de estilo, redactor
fredyguzmanvargas@gmail.com

Albany Milena Lozano Násner, M.Sc.
Traducción español-portugués
mlnasner@gmail.com

Departamento de Idiomas
Traducción español-inglés
Universidad Santo Tomás, Tunja, Colombia
coordinacion.idiomas@ustatunja.edu.co

David Enrique González Camargo
Administrador OJS
Universidad Santo Tomás, Tunja, Colombia
ing.investigacion@ustatunja.edu.co

Comité Científico

Antonio Moreira Teixeira, Ph.D.
Universidad de Aberta (Lisboa, Portugal)
antonio.teixeira@uab.pt

Electo Eduardo Silva Lora, Ph.D.
Univerdidad Federal de Itajubá (Itajubá M.G., Brasil)
electo@unifei.edu.br

María Julia Mazzarino, Ph.D.
Universidad de Buenos Aires (Buenos Aires, Argentina)
mmazzari@crub.uncoma.edu.ar

Antonio Rico Sulayes, Ph.D.
Universidad de las Américas Puebla (Puebla, México)
antonio.rico@udlap.mx

Carlos Enrique Montenegro Marín, Ph.D.
Universidad Distrital Francisco José de Caldas (Bogotá
D.C., Colombia)
cemontenegrom@udistrital.edu.co

César Darío Guerrero Santander, Ph.D.
Universidad Autónoma de Bucaramanga (Bucaramanga
- Santander, Colombia)
cguerrer@unab.edu.co

Comité Editorial de la Revista

Antonio José Bula Silvera, Ph.D.
Universidad Católica del Norte (Barranquilla - Atlántico,
Colombia)
abula@uinorte.edu.co

Wilson Javier Pérez Holguín, Ph.D.
Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia
(Tunja - Boyacá, Colombia)
wilson.perez@uptc.edu.co

José Carlos Escobar Palacios, Ph.D.
Investigador Universidad Federal de Itajubá (Itajubá
M.G., Brasil)
jocesobar@unifei.edu.br

Camilo Andrés Lesmes Fabian, Ph.D.
Universidad Santo Tomás (Tunja - Boyacá, Colombia)
camilo.lesmes@usantoto.edu.co

Impresión

Editorial Jotamar Ltda.
Calle 57 No. 3-39
Tel.: (8) 745 7120
editorialjotamar@yahoo.com
Tunja - Boyacá - Colombia

La función de transformación exponencial como herramienta para la clasificación de objetos según su tamaño

The exponential transformation function as a tool for classifying objects according to their size

A função de transformação exponencial como ferramenta para classificação de objetos de acordo com o tamanho

Para citar este artículo / To reference this article / Para citar este artigo: Lagos, C. y Santillán, R. (2017). La función de transformación exponencial como herramienta para la clasificación de objetos según su tamaño. *Ingenio Magno*, 8(1), 58-74.

Camilo Lagos-Mora

Institución Universitaria CESMAG,
Grupo de Investigación RAMPA
calagos@iucsmag.edu.co

Rubén Santillán-Mosquera

Institución Universitaria CESMAG,
Grupo de Investigación RAMPA
rampa@iucsmag.edu.co

Resumen

Este artículo presenta el diseño de un algoritmo de visión artificial para la clasificación de objetos según su tamaño, basado en la función de transformación exponencial. Para su análisis se utilizaron tres estudios anteriores como referencia, en función de evaluar la efectividad de cada uno y compararlos con el algoritmo propuesto. Para categorizar las figuras, se definieron tres tipos de clasificación: clasificación 1, 2 y 3, los cuales están compuestos por tres, cuatro y cinco subgrupos, respectivamente. Se usaron figuras geométricas con áreas entre 4 cm^2 y 121 cm^2 para crear una base de datos de 500 imágenes y usarlas en las pruebas. En total se realizaron 10 diferentes pruebas, entre las que están: eficacia en las capas R, G y B, clasificación de los tipos de figuras geométricas o los rangos de área de cada tipo. Además, se calculó la cantidad de operaciones realizadas, tiempo por cada clasificación, tiempo total de ejecución, uso de memoria, eficiencia, eficacia. Las pruebas y los cálculos llevados a cabo evidenciaron que el algoritmo de clasificación de tamaño utilizando como herramienta la función de transformación exponencial equipara al algoritmo más eficiente utilizado como referencia, pero supera a todos en eficacia.

Palabras clave: clasificación, efectividad, eficacia, eficiencia, transformación exponencial, visión artificial.

Abstract

This article presents the design of an artificial vision algorithm for the classification of objects according to their size, based on the exponential transformation function. For their analysis, three previous studies were used as reference, in order to evaluate the effectiveness of each one and to compare them with the proposed algorithm. To categorize the figures, three types of classification were defined: Classification 1, 2 and 3, which are composed of three, four and five subgroups, respectively. Geometric figures with areas between 4 cm^2 and 121 cm^2 were used to create a database of 500 images and use them in the tests. In total, 10 different tests were performed, including: efficiency in the R, G and B layers, classification of the types of geometric figures or the area ranges of each type. In addition, the following variables were calculated: The number of operations performed, time per classification, total execution time, memory usage, efficiency, efficiency. The tests and calculations carried out showed that the size classification algorithm using the exponential transformation function as a tool equates to the most efficient algorithm used as a reference, but exceeds all in efficiency.

Keywords: classification, effectiveness, effectiveness, efficiency, exponential transformation, artificial vision.

Resumo

Neste artigo se apresenta o projeto de um algoritmo de visão artificial para a classificação de objetos de acordo com o tamanho, baseado na função de transformação exponencial. Para a análise, foram utilizados como referência três estudos anteriores, a fim de avaliar a efetividade dos mesmos e compará-los com o algoritmo proposto. Para categorizar as figuras, foram definidos

três tipos de classificações: classificação 1, 2 e 3, que são compostos por três, quatro e cinco subgrupos, na devida ordem. As figuras geométricas com áreas entre 4 e 121 cm² foram usadas para gerar uma base de dados de 500 imagens e utilizá-las nos testes. No total, foram realizados 10 testes diferentes, incluindo: eficiência nas camadas R, G e B, classificação dos tipos de figuras geométricas ou intervalos de área de cada tipo. Além disso, a quantidade de operações realizadas foi calculada, o tempo por cada uma das classificações, o tempo total de execução, o uso da memória, eficiência e eficácia. Os testes e cálculos realizados mostraram que o algoritmo de classificação de tamanho que utiliza a função de transformação exponencial como ferramenta é equivalente ao algoritmo mais eficiente que tem se utilizado como uma referência, mas excede os demais em eficácia.

Palavras chave: classificação, efetividade, eficácia, eficiência, transformação exponencial, visão artificial.

I. Introducción

La visión artificial se cataloga como un campo dentro de la inteligencia artificial; es usado para aproximar el comportamiento que tiene el ser humano en su sentido de la vista y en el pensamiento racional para la solución de diversos problemas en los que se ve involucrada dicho sentido. Por ello, se ha dado un crecimiento en el uso de esta tecnología para corregir las limitaciones que poseen las personas en relación con la subjetividad, el estrés, el cansancio, la mala percepción, entre otros aspectos, en actividades en los que se necesita una respuesta rápida, precisa y objetiva; por tanto, estas desempeñan un papel importante en los sistemas de clasificación basados en visión artificial, junto con su efectividad a la hora de realizar un proceso de selección (González *et al.*, 2006; García, 2008).

Uno de los principales problemas de este proceso es el costo computacional que posee un algoritmo, pues este puede funcionar de manera eficaz pero no eficiente, o viceversa, lo que implica que no pueda utilizarse para ciertas tareas en tiempo real. Este estudio pretende aportar una metodología basada en la función

de transformación exponencial, que permite aumentar la eficacia sin afectar la eficiencia para un sistema de visión artificial orientado a la clasificación de objetos según su tamaño; de igual manera, busca suministrar la información para el crecimiento de este campo de inteligencia artificial.

Existen varios estudios que hacen uso de visión artificial para la solución de una problemática específica. Así, se encuentran aspectos importantes como aporte para la investigación, entre los que se pueden resaltar los mencionados a continuación. Para la etapa de adquisición de imágenes, se trabaja sobre una estructura para estabilizar la cámara y mantener una distancia fija entre el objeto y el lente, como lo hacen Guevara y Gómez (2011). De igual manera, se obtienen mejores resultados al configurar adecuadamente la cámara digital y realizar una base de datos de imágenes, que posteriormente se utilizará de acuerdo con los planteamientos de Sánchez y Morales (2009). Además, se presenta un mejor desempeño cuando se trabaja con una imagen de menor tamaño, lo cual es planteado empíricamente por Jiménez *et al.* (2012).

En la etapa de preprocesado es necesario evaluar cada una de las componentes R, G y B, para obtener características y resultados importantes, desde la perspectiva de Sandoval y Prieto (2007). Asimismo, para la parte de segmentación, Bermúdez y Báez (2010) analizaron el histograma para la obtención de un umbral adecuado para el proceso; sin embargo, otro aspecto por resaltar es que existen estudios que calculan el umbral solo en la capa azul del modelo RGB, como lo realizan Montoya, Cortes y Chaves (2014) para la segmentación de la imagen en escala de grises. Se encuentra también el aporte de Oviedo, Berrío y Mojica (2014), que busca sintetizar la información de técnicas y métodos de visión artificial de doce estudios relacionados con procesos automatizados para la clasificación.

Por último, para la etapa de clasificación, se implementa un sistema de clasificación basado en visión artificial, similar al sistema realizado por Velásquez (2014), muy útil para retomar algunos puntos de su diseño y lograr valorar la propuesta realizada en esta investigación. De hecho, así lo realizan Ramírez *et al.* (2009), al implementar un sistema experimental de visión artificial para la clasificación de figuras geométricas según el tamaño, el color y la forma.

Además, se utilizan tres estudios exitosos, que, dentro del estado del arte, son los que presentan mejores resultados en cuanto a eficiencia y eficacia; por otro lado, existe una similitud entre la línea de investigación y los estudios de Ramírez *et al.* (2009), Montoya *et al.* (2014) y Mascotte *et al.* (2013), que en adelante denominados como estudio 1, 2 y 3, respectivamente, que permitieron evaluar el algoritmo de visión artificial para la clasificación de objetos según el tamaño propuesto.

II. Materiales y Métodos

A. Análisis de algoritmos

En el análisis de un algoritmo se mide la dificultad inherente de un problema y de su evaluación (Valenzuela, 2003). Debido a la inexistencia de computadores estándar, se ve la necesidad de utilizar metodologías que permitan evaluar los algoritmos de manera tal que los resultados sean válidos, sin importar la plataforma en la que se realicen. Para el presente estudio, los algoritmos analizados fueron programados en un solo lenguaje e implementados en el mismo computador; a partir de este punto se realizaron medidas de tiempo de ejecución para obtener medidas de rendimiento del algoritmo, según lo propuesto por Duch (2007). En el desarrollo de la investigación es utilizado el lenguaje de Matlab, y se mide la eficiencia, la eficacia y, por tanto, la efectividad.

B. Número óptimo de simulaciones

De acuerdo con Chamorro y Revelo (2008), se calcula el número óptimo de simulaciones por realizar, denominado *corrida de simulación*, como lo muestra [1].

$$n = \frac{1}{\alpha k^2} \quad [1]$$

Donde α es la probabilidad de error máxima permitida y k es la desviación absoluta máxima permitida sobre la medida de distribución por simular. Cabe resaltar que el valor de n equivale a la cantidad de imágenes necesarias para lograr resultados con un error α y una desviación entre ellos de k .

C. Sistema de visión artificial

Según González *et al.* (2006), un sistema de visión artificial se compone de etapas que se realizan de manera secuencial. El presente

estudio se apoyó en un diagrama de etapas (figura 1) y fue la base para el diseño del algoritmo basado en la función de transformación exponencial.



Figura 1. Etapas de un sistema visión artificial

Fuente: adaptado de González *et al.* (2006).

1. Etapa de sensorial o adquisición de imágenes

En esta etapa se utiliza una base de datos de imágenes creada con una cámara fotográfica digital Samsung ES17, configurada en modo escena en primer plano, con tamaño de imagen 1M 1024 × 768, en calidad superfina y área de enfoque central; se encuentra apoyada en una estructura para estabilizarla, retomado de Guevara y Gómez (2011), con una distancia de 26 cm desde la superficie donde descansa el objeto hasta el lente de la cámara. Además, se utiliza iluminación difusa por medio de matrices LED y un fondo color negro.

Para conocer el número de imágenes que se debieron adquirir según [1], se tomó $\alpha = 0,05$ y $k = 0,2$; entonces, se tiene:

$$n = \frac{1}{(0.05)(0.2)^2} = 500$$

La cantidad de imágenes que fueron capturadas son 500 y se utilizan figuras geométricas como lo presenta Ramírez *et al.* (2009), $n/2$ de esferas y $n/2$ de cubos dentro de los rangos de área entre 9 cm² y 20 cm².

2. Etapa de preprocesamiento

Se analizó la viabilidad de utilizar una capa del modelo RGB para mejorar los resultados (Sánchez y Morales, 2009; Ramírez *et al.* 2009) y minimizar las operaciones que realiza el algoritmo. Por otra parte, para segmentar la imagen, se utilizó la función de transformación exponencial expresada en [2], que, según Rodríguez y Sossa (2012), es empleada en imágenes de escala de grises, cuya operación es puntual y rápida en ejecución, su expresión matemática y su aplicación es sencilla, además de ser muy conocidas y utilizadas.

$$t(x, y) = \frac{(1 + k)^{f(x, y)} - 1}{k} \quad [2]$$

Donde t es la imagen aplicada la transformación exponencial, f es la imagen en escala de grises por transformar y k es el parámetro controlador de la transformación. Ahora bien, al igual que Bermúdez y Báez (2010), se analizó el histograma para calcular un valor adecuado de k .

3. Etapa de parametrización

Se determina el número de píxeles para convertir en área expresada en cm². La conversión es realizada por medio de la aproximación por mínimos cuadrados.

4. Etapa de clasificación

La clasificación está conformada por tipos de clasificación: clasificación 1, 2 y 3; a su vez, cada una posee tres, cuatro y cinco subgrupos, como lo muestra la tabla 1. Las etiquetas serán asignadas a cada objeto para saber en qué rango de área pertenece.

Tabla 1. Parámetros de clasificación

Tipo de clasificación	Etiqueta	Cantidad de objetos		Área (cm ²)
		Esfera	Cubo	
Clasificación 1	1	210	150	(4-43)
	2	42	60	(43-82)
	3	0	38	(82-121)
Clasificación 2	1	168	120	(4-33,3)
	2	84	60	(33,3-62,5)
	3	0	45	(62,5-91,8)
	4	0	23	(91,8-121)
Clasificación 3	1	126	75	(4-27,4)
	2	84	90	(27,4-50,8)
	3	42	45	(50,8-74,2)
	4	0	30	(74,2-97,6)
	5	0	8	(97,6-121)

D. Eficiencia

Se obtuvo el tiempo de ejecución del código por medio de las funciones *tic* y *toc*, que inician y detienen el contador del tiempo. Para determinar la eficiencia, se utiliza la ecuación [3], que compara los estudios 1, 2, 3 y la propuesta. Se tomó como eficiencia del 100% el tiempo utilizado por el algoritmo más rápido en comparación con los demás.

$$Eficiencia_i = \frac{\min(x_1, x_2, \dots, x_n)}{x_i} \times 100\% \quad [3]$$

Donde x es el conjunto que contiene los tiempos de todos los estudios y la propuesta, x_i es el tiempo del estudio para calcular la eficiencia e $i=1, 2, 3, 4$ representan los estudios 1, 2, 3 y la propuesta.

E. Eficacia

Se determinó de acuerdo con la relación de cantidad de objetos clasificados correctamente y el total de objetos, como lo muestra [4].

$$Eficacia = \frac{oc}{n} \times 100\% \quad [4]$$

Donde *oc* es la cantidad de objetos clasificados correctamente y *n* es el número de total de imágenes [1]. Como resultado se obtiene un porcentaje de aciertos. La eficacia se calcula por tipo de clasificación y según la etiqueta asignada.

F. Efectividad

Es el resultado de la eficiencia y eficacia; para fines de esta investigación es considerada la

misma proporción de las dos, es decir, el 50% de eficiencia y 50% de eficacia, como lo muestra [5].

$$\text{Efectividad} = (\text{Eficiencia} \times 0.5) + (\text{Eficacia} \times 0.5)$$

[5]

G. Pruebas experimentales

Para determinar cada operación del algoritmo propuesto, se realizan múltiples pruebas; la mayoría de estas son realizadas a los estudios 1, 2 y 3 seleccionados y a la propuesta, con el fin de comparar y tener una referencia; otras pruebas son realizadas solo al mejor estudio de referencia y a la propuesta. Las pruebas realizadas se presentan a continuación.

1. Color en capas R, G y B

Con el uso de una figura geométrica de cuatro colores (amarillo, verde, azul y rojo), se analiza la mejora de resultados y la reducción de operaciones realizadas (Sánchez y Morales, 2009; Ramírez *et al.*, 2009).

2. Complejidad de un algoritmo

Según Valenzuela (2003), es una medida de recurso de tiempo y memoria que un algoritmo necesita, mediante la medición del espacio/tiempo relativo, más conocida como *complejidad espacial* y *temporal*, respectivamente. El costo en tiempo se mide como costo mejor, costo medio y costo peor, los cuales corresponden al tiempo mínimo, promedio y máximo registrado; por otra parte, el costo de memoria es el uso de memoria en la ejecución del código. En el presente estudio se utilizó la función *whos*, la cual muestra la memoria utilizada en términos de bytes, entre otros aspectos.

3. Diferencial de tiempo

Para el tiempo diferencial se toman dos registros de tiempo: el primero registra el tiempo

que se tarda por cada imagen clasificada y en el segundo se toma el tiempo total de simulación, y posteriormente se calcula la diferencia, expresada en porcentaje. El diferencial de tiempo es una prueba realizada al estudio con mejor resultado y la propuesta presentada.

4. Figura geométrica

Para esta prueba se obtiene la eficacia y la eficiencia según el tipo de figura geométrica, sea cubo o esfera.

5. Intervalo de pertenencia

De acuerdo con la tabla 1 (parámetros de clasificación), se realiza una prueba de eficacia a cada rango de área, con objetos que se encuentren en un límite superior, la mitad y el límite inferior.

6. Operaciones

Un algoritmo puede ser catalogado analizando las operaciones que realice (Valenzuela, 2003). Dichas operaciones son contabilizadas respecto a los siguientes parámetros: operación aritméticas básicas (suma, resta, multiplicación, división, potenciación y radicación), operación aritméticas complejas (todas diferentes a las básicas), asignaciones, saltos, llamadas a funciones y retorno, operaciones y comparaciones lógicas, acceso a estructuras indexadas básicas (vectores y matrices), importar/exportar datos, acceso a estructuras indexadas complejas (estructuras, objetos, etc.).

III. Resultados

A. Análisis de algoritmos

Los estudios 1, 2 y 3, incluyendo la propuesta, se implementan en el *software* Matlab para una evaluación equitativa. En la figura 2 se encuentran los métodos o las técnicas utilizadas por cada estudio y cada etapa.

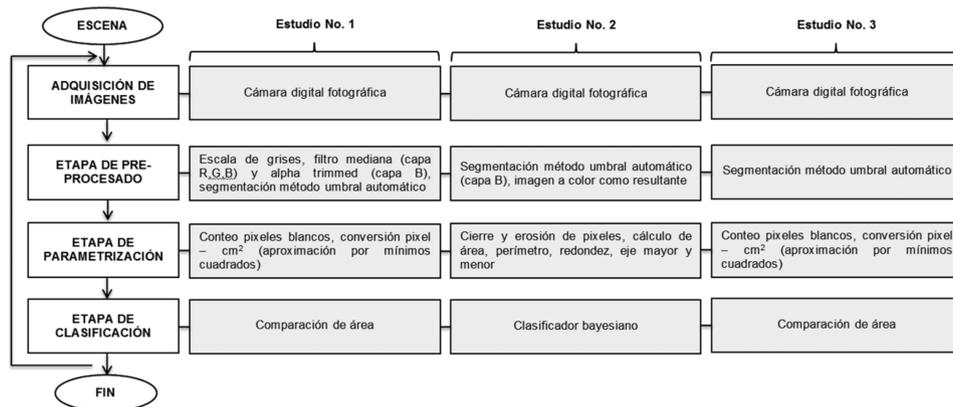


Figura 2. Métodos o técnicas aplicadas en cada etapa de los algoritmos de referencia

B. Número óptimo de simulaciones

Se obtiene según [1] y tomando como probabilidad de error máxima permitida $\alpha = 0,05$ y la desviación absoluta máxima permitida sobre la medida de distribución de los datos $k = 0,2$; entonces, $n = 500$. Este es el número de imágenes que componen la base de datos; un ejemplo de las imágenes de la base de datos es la figura 3.

C. Sistema de visión artificial

1. Etapa de sensorial o adquisición de imágenes

En la figura 3 se pueden apreciar dos figuras geométricas correspondientes a un cubo y una esfera; estas imágenes fueron usadas para evaluar los estudios de referencia y la propuesta.

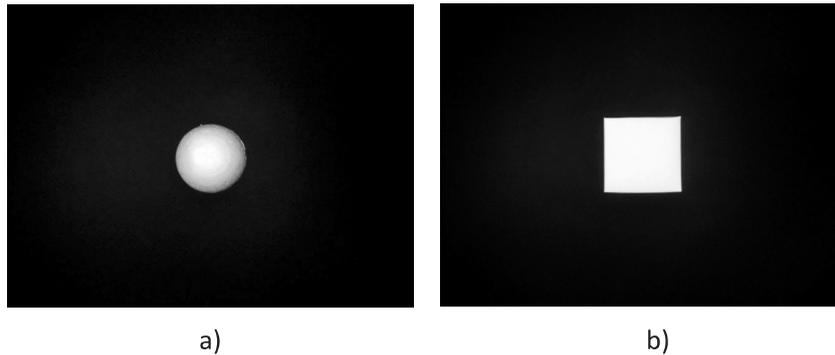


Figura 3. Imágenes de prueba: a) esfera, 3 cm; b) cubo, 3,5 cm

2. Etapa de procesamiento

Se eliminó el proceso de conversión de una imagen con color a escala de grises, al escoger una sola capa y comprobar que no afecte los resultados. En la tabla 2 se encuentran los

resultados al utilizar una capa en cada estudio, siendo el mejor resultado la capa R. Según los resultados obtenidos, se reemplaza el proceso de conversión de una imagen con color a escala de grises y solo se escoge la capa R. La eficacia es obtenida por medio de [4]

Tabla 2. Prueba de color para las capas R, G y B

	Capa R		Capa G		Capa B	
	Eficacia (%)	Tiempo (seg)	Eficacia (%)	Tiempo (seg)	Eficacia (%)	Tiempo (seg)
Estudio 1	50	48,051	25	47,934	25	50,884
Estudio 2	40	0,293	25	0,212	30	0,225
Estudio 3	50	1,395	25	1,400	0	1,433
Propuesta	50	0,154	0	0,157	0	0,157
Promedio	47,50	12,47	18,75	12,43	13,75	13,10

Por otro lado, para el proceso de segmentación es utilizada la transformación exponencial. En términos experimentales, es adecuado el parámetro controlador k de [2], por lo cual es necesario utilizar la imagen con niveles in-

vertidos; el resultando es $k = 0,0068$. El efecto causado por la transformación exponencial es la separación por completo de los niveles en el histograma correspondientes al fondo y al objeto, como lo muestra la figura 4.

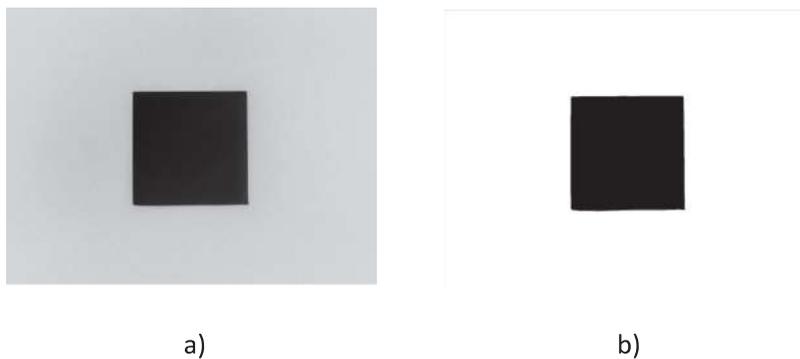


Figura 4. Transformación exponencial:
a) imagen en escala de grises invertida; b) imagen transformación exponencial

Para apreciar mejor el efecto causado por la transformación exponencial, se puede observar el histograma de la figura 5.

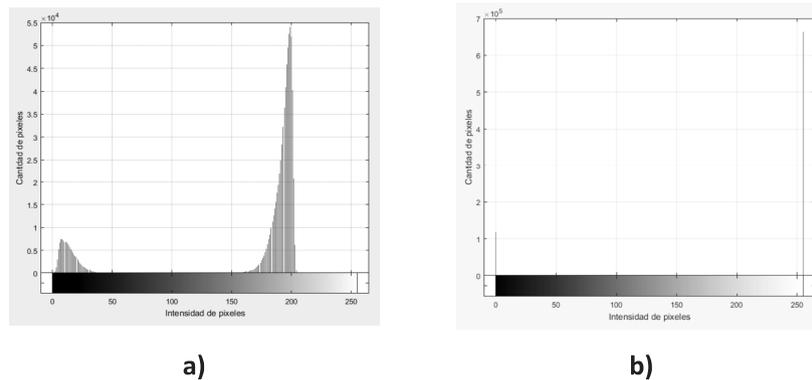


Figura 5. a) Histograma de imagen con escala de grises invertida; b) histograma de imagen con escala de grises con transformación exponencial

Por último, es necesario invertir los niveles de la imagen para que, en la clasificación, los pixeles blancos correspondan al objeto.

3. Etapa de parametrización

Con ayuda de la función *bwarea*, se calcula la cantidad de pixeles blancos correspondientes al objeto. Para realizar la conversión de una medida en pixeles a cm^2 , se utiliza la aproximación de mínimos cuadrados para encontrar la relación entre el área de los objetos y los pixeles, con una aproximación de una función potencial $\text{área en cm}^2 = 0,0048 (\text{área en pixeles})^{0,7738}$, con un coeficiente de correlación $R^2 = 0,9978$.

4. Etapa de clasificación

Según el área del objeto, se asignó una etiqueta dependiendo del tipo clasificación, de acuerdo con la tabla 1; los datos son exportados a una hoja de cálculo de Excel, con la clasificación asignada por el sistema, tiempo por cada clasificación y una columna que califica la clasificación realizada: 1 correcto, 0 error.

Tanto los estudios referentes como la propuesta tienen la misma etapa de adquisición de imágenes; por otra parte, en la etapa de clasificación, el estudio 1, 3 y la propuesta, la etapa

es igual, y el estudio 2 utiliza un clasificador de bayes; tiene en común la conversión de pixeles a cm^2 . En la figura 6 se presentan los métodos o las técnicas de cada etapa del sistema de visión artificial de la propuesta.

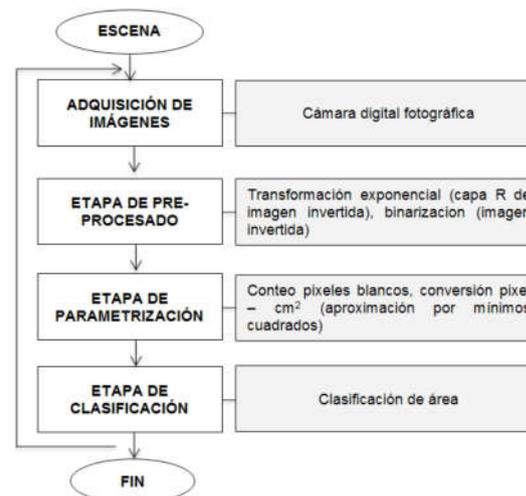


Figura 6. Métodos o técnicas aplicadas en cada etapa del algoritmo propuesto

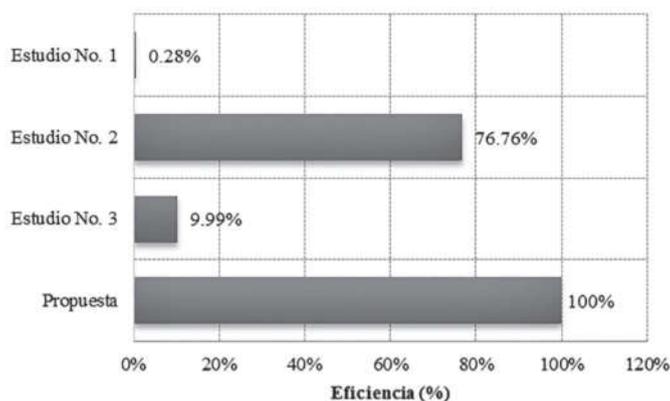
D. Eficiencia

El tiempo promedio registrado por cada estudio y propuesta para la clasificación de las 500 muestras se encuentra en la tabla 3, catalogado según el tipo de clasificación.

Tabla 3. Tiempo promedio de estudios y propuesta

Tipo de clasificación	Tiempo promedio (seg)			
	Estudio 1	Estudio 2	Estudio 3	Propuesta
Clasificación 1	55,1973	0,1962	1,6456	0,1510
Clasificación 2	55,5655	0,1971	1,4586	0,1510
Clasificación 3	53,6152	0,1972	1,4509	0,1513
Promedio	54,793	0,197	1,518	0,151

En la figura 7 se observa la eficiencia de cada estudio y la propuesta utilizando [3].

**Figura 7.** Eficiencia de estudios y propuesta

E. Eficacia

En la tabla 4 se encuentra el número de clasificaciones realizadas correctamente para cada estudio y propuesta.

Tabla 4. Numero de clasificaciones correctas de estudios y propuesta

Tipo de clasificación	Número de clasificaciones correctas			
	Estudio 1	Estudio 2	Estudio 3	Propuesta
Clasificación 1	496	493	496	500
Clasificación 2	500	489	500	500
Clasificación 3	492	470	499	500
Promedio	496	484	498	500

Según la cantidad de objetos clasificados correctamente y aplicando [4], se obtienen los resultados de la figura 8.

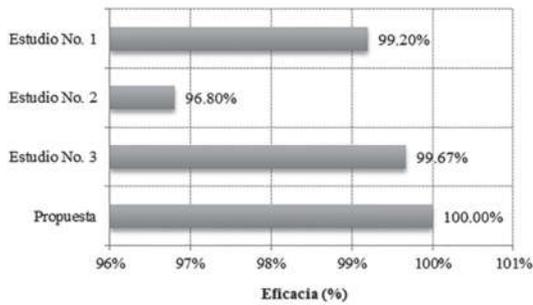


Figura 8. Eficiencia de estudios y propuesta

F. Efectividad

Tomando el 50% de eficiencia y 50% de eficacia según [5], se obtuvo una efectividad del 100% para la propuesta. La figura 9 realiza una comparación entre el mejor estudio referente (estudio 2) y la propuesta.

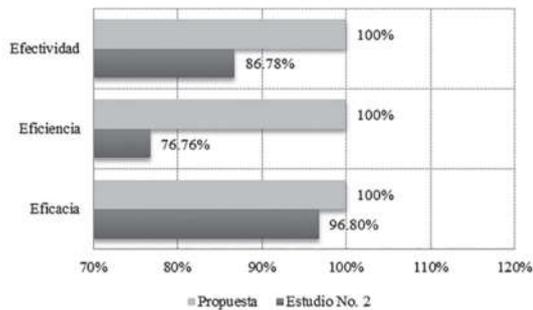


Figura 9. Efectividad, eficiencia y eficacia

G. Pruebas experimentales

1. Color en capas R, G y B

En la figura 10 se muestran los valores de eficacia promedio de los tres estudios y la propuesta, para la capa R, G y B, de acuerdo con la tabla 2.

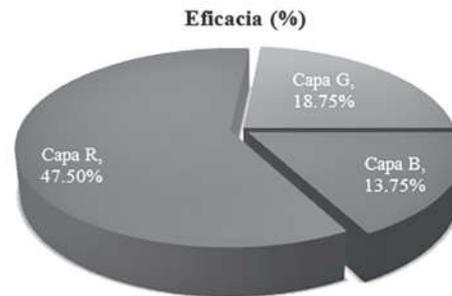


Figura 10. Efectividad, eficiencia y eficacia

2. Complejidad de los algoritmos

Esta prueba es realizada para la propuesta y el estudio número 2 con mejor resultado de eficiencia y eficacia. Los resultados de la prueba se pueden observar en la tabla 5.

Tabla 5. Complejidad del algoritmo

	Costo de espacio (bytes)	Costo en tiempo (seg)		
		Mejor	Medio	Peor
Estudio f2	22.673.592	0,1751	0,1968	0,2618
Propuesta	9.465.624	0,1467	0,1511	0,1933

3. Diferencial de tiempo

Al encontrar la diferencia entre el tiempo de clasificación y simulación, es obtenido el dife-

rencial en porcentaje respecto al tiempo mayor de cada uno. Los resultados se muestran en la tabla 6.

Tabla 6. Diferencia de tiempo

	Tiempo (seg)		Diferencial (%)
	Clasificación	Simulación	
Estudio 2	98,518	97,284	1,25
Propuesta	75,550	64,841	14,17

4. Figura geométrica

Esta prueba se realiza para los tres estudios y la propuesta, en función de evidenciar si la

condición geométrica del objeto influye en eficiencia o eficacia. Los resultados se encuentran en la figura 11.

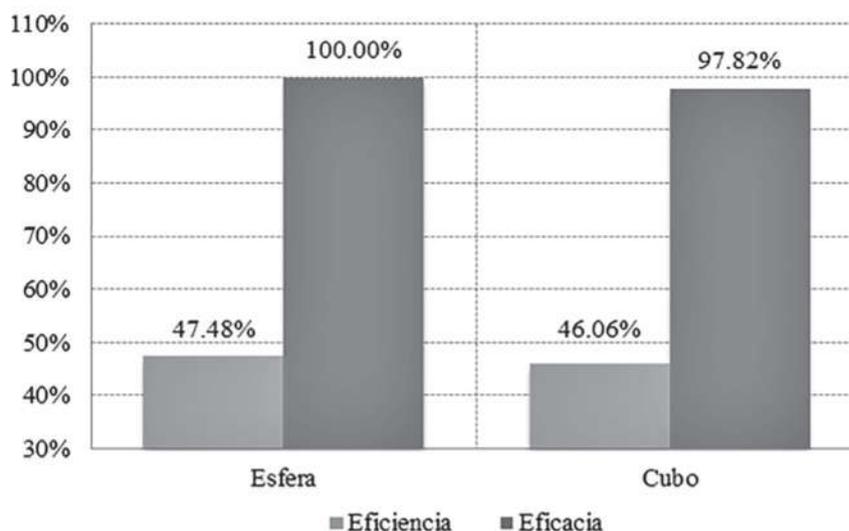


Figura 11. Eficiencia y eficacia de figuras geométricas

5. Intervalos de pertenencia

La prueba de intervalos es realizada a los estudios 1, 2, y 3, a fin de identificar el límite de

los intervalos donde existe mayor error. En la figura 12 se encuentra la eficacia de cada límite con relación al tipo de clasificación según la tabla 1.

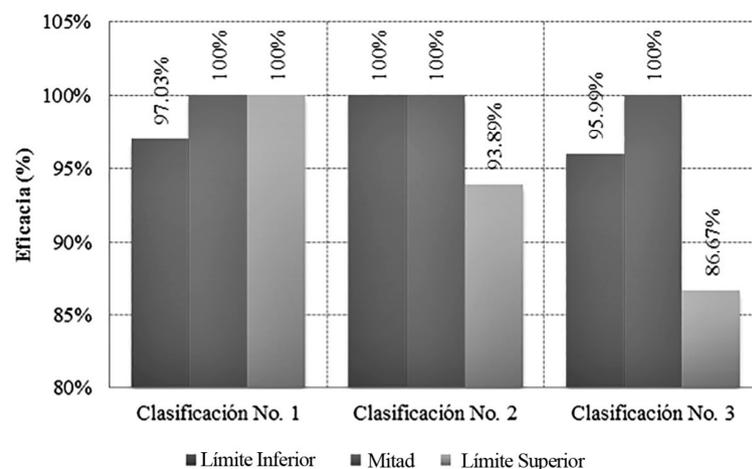


Figura 12. Eficacia de intervalos de tipos de clasificación

6. Operaciones

Para calcular las operaciones se tiene en cuenta el estudio 2, con la propuesta con mejores

resultados en eficiencia y eficacia. Los resultados están en la tabla 7, junto con los parámetros que se tienen en cuenta para la obtención de las operaciones realizadas.

Tabla 7. Operaciones realizadas

N.º	Parámetros	Número de operaciones	
		Estudio 2	Propuesta
1	Acceso a estructuras indexadas básicas	1348	78
2	Acceso a estructuras indexadas complejas	376	6
3	Asignaciones	4429	183
4	Importar/exportar datos	16	1
5	Operaciones aritméticas básicas	1010	41
6	Operaciones aritméticas complejas	27	0
7	Operaciones y comparaciones lógicas	1750	97
8	Saltos, llamadas a funciones y retorno	7856	293
	Total	16.812	699

IV. Análisis de resultados

1. Sistema de visión artificial

Siguiendo las figuras 2 y 6, en la etapa de preprocesamiento el estudio que realiza mayor número de procesamiento es el estudio número 1, le sigue con menos cálculos el estudio número 2 y la propuesta por igual, y el estudio número 3 realiza la menor cantidad de procesamiento de imagen.

Sin tener en cuenta la eficiencia en la etapa de parametrización el estudio número 1, número 3 y propuesta, hacen menos tarea y el estudio número 2 realiza más procesamiento. Se analiza el proceso de cada etapa, como se describió anteriormente, y existe aparentemente poca diferencia entre los estudios, pero cada proceso puede realizar subprocesos o cálculos internos que aumenten el tiempo de ejecución.

Reemplazando la conversión de imagen con color a escala de grises, se reduce las operaciones en la etapa de preprocesamiento; en la segmentación se obtienen buenos resultados gracias a la transformación exponencial, esta separa por completo el objeto del fondo de imagen como se puede ver en la figura 5.

Con ayuda del cálculo de operaciones, se determinó que la función *bware* realiza menos operaciones según los parámetros de la tabla 7, esta función entrega la cantidad de píxeles blancos utilizada en la etapa de parametrización de la propuesta.

2. Efectividad

De los estudios de referencia, el estudio número 1 tiene la menor eficiencia de 0,28%, que demuestra que tarda mayor tiempo de ejecución y se corrobora con la tabla 3; por otro lado, la propuesta tiene el mejor tiempo

y tiene una diferencia sobre 23,24% respecto del estudio número 2. Según lo anterior, un factor que influye para que la propuesta tenga el menor tiempo es la cantidad de operaciones realizadas según la tabla 7.

El estudio número 1 aplica un filtro en la capa R del modelo RGB; por lo anterior, en la ejecución del código realiza un recorrido de la mayor parte de la imagen, de tal manera que si el tamaño es 1024x768 el código realiza aproximadamente 786432 iteraciones (dependiendo de la máscara del filtro) solo para aplicar el filtro, sin tomar en cuenta las operaciones que realiza por cada iteración. El tiempo promedio de este estudio es de 54,79 segundos.

Los estudios y la propuesta poseen una eficacia mayor al 94%; la propuesta clasifica correctamente todos los objetos y el estudio número 3 el 99,67% de ellos; por otra parte, el estudio con mayor error es el estudio número 2 con 3,2% de error. La posible causa del error es la falta de entrenamiento del clasificador de bayes que utiliza.

La eficacia del 100% de la propuesta se debe en gran parte a la transformación exponencial, que se encargó de separar el objeto del fondo de la imagen para calcular los píxeles correspondientes al objeto. El estudio número 2 tiene 86,78% de efectividad, la cual es superada por la propuesta en un 13,22%, ya que esta propuesta posee una efectividad del 100%.

3. Pruebas experimentales

Por medio de la prueba de color en las capas R, G y B se obtiene la mayor eficacia y reducción de operaciones con la capa roja, ya que se reemplaza la conversión de imagen a color a escala de grises y simplemente se toma la capa roja. Según la figura 10, la capa R tiene el 47,50% de eficacia; a pesar de no ser un valor

alto en la prueba, sí es el mejor y se obtuvo una eficacia en el algoritmo de 100%.

En la complejidad de los algoritmos, el estudio 2 tiene más costo de espacio, con una diferencia de 13.207.968 bytes sobre la propuesta, es decir, la propuesta utiliza 58,25% menos bytes de memoria de variables que el estudio 2. Para el costo en tiempo hay una diferencia entre el costo peor y el costo mejor de la propuesta de 0,0466 y el estudio 2 de 0,0867. Esto significa que entre menor sea la diferencia del tiempo, tiende a ser más confiable el promedio de tiempo y los datos de tiempo en general.

En cuanto al diferencial de tiempo, es una medida de corrección para el tiempo de clasificación que se le determinó a los dos estudios. Este diferencial de tiempo corresponde al tiempo que conlleva usar la función tic y toc en un ciclo de 500, lo cual se corrobora con los datos obtenidos en el tiempo de simulación en la prueba del diferencial de tiempo.

En la prueba realizada de figuras geométricas, la esfera predomina con mejores resultados en eficiencia y eficacia, aunque la diferencia es relativamente pequeña. En eficiencia hay una diferencia de 1,42% y eficacia de 2,18%. Por su parte, los resultados de la prueba de intervalos muestran errores de clasificación cometidos en los límites superior e inferior, pero la parte donde se cometen más errores es en el límite superior, con un promedio de error de 6,48% e inferior de 2,33%.

V. Conclusiones

- No hay una relación directa entre el tamaño de los objetos y la eficiencia en los resultados finales, ya que el tamaño de la imagen es constante y no cambia la cantidad de píxeles por analizar.

- La capa R del modelo RGB de las imágenes de la base de datos es más eficaz que las demás capas para reemplazar el proceso de conversión de una imagen a color a escala de grises, debido al contraste que hay entre el objeto y el fondo de la imagen.
- Se demostró que es más eficiente la función *bwarea* frente a *regionprops*, debido a que la primera utiliza 71,91% menos operaciones (según los parámetros de la tabla 7) respecto a la segunda función.
- El estudio permitió verificar que la efectividad del algoritmo propuesto no es influenciado por las características físicas, la cantidad y el tamaño de los objetos, debido a los resultados obtenidos.
- A pesar de que la transformación exponencial generalmente se utiliza para mejorar los detalles de zonas claras de la imagen, se pudo comprobar que al calibrar adecuadamente, puede ser usada como una herramienta efectiva para la segmentación; esta es la base de la mejora del algoritmo propuesto.
- La clasificación que utiliza la función de transformación exponencial mostró una eficacia mayor que los otros algoritmos analizados, lo cual se debe a que esta fue diseñada originalmente para el mejoramiento de imágenes, lo que implica mayor nitidez para su procesamiento.
- La utilización de la función de transformación exponencial reduce el número de operaciones necesarias para la adecuación de la imagen, lo cual mejora la efectividad general del algoritmo de clasificación de objetos según su tamaño, porque, al ser ejecutadas menos operaciones, reduce el tiempo que tarda en clasificar cada uno de ellos y, por ende, mejora la eficiencia y la efectividad.

Referencias

- Bermúdez, H. y Báez J. (2010). *Aplicación de técnicas de visión artificial para el reconocimiento de naranjas maduras en el árbol* (tesis de pregrado). Bucaramanga: Universidad Pontificia Bolivariana.
- Chamorro, L. (2008). *Simulación un primer contacto*. San Juan de Pasto: Universidad de Nariño.
- Duch, A. (2007). *Análisis y diseño de algoritmos*. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya.
- García, I. (2008). *Visión artificial y procesamiento digital de imágenes usando Matlab*. Ibarra: Núcleo de Pichincha.
- González, A., Martínez de Pisón, F., Pernía, A., Alba, F., Castejón, M., Ordieres, J. y Vergara, E. (2006). *Técnicas y algoritmos básicos de visión artificial*. La Rioja: Universidad de La Rioja.
- Guevara, F. y Gómez, J. (2011). Sistema de visión artificial para la clasificación de granos de trigo y cebada. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 9(3), 672-681.
- Jiménez, R., Avilés, O., Espinosa, F. y Gordillo, C. (2012). Controlador de tráfico inteligente con prelación para vehículos de emergencia. *Ingeniería*, 17(1), 14-24.
- Mascotte, M., Vázquez, J., Hernández, S., Hernández, M. y Ríos, A. (2013). Inspección por visión artificial de probetas plásticas. *Eleventh LACCEI Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology*. Cancún, México.
- Montoya, C., Cortés, J. y Chaves, J. (2014). Sistema automático de reconocimiento de frutas basado en visión por computador. *Revista Chilena de Ingeniería*. 22(4), 504-516.
- Oviedo, A., Berrío, K. y Mojica, J. (2014). *Sistema de visión artificial para determinar el estado de recolección del fruto del árbol azadirachta indica* (tesis de pregrado). Medellín: Universidad Pontificia Bolivariana.
- Ramírez, D., Gerardino, B., Estupiñán, E., Pulido, G., Cruz, J. y Cancino, S. (2009). Adquisición y reconocimiento de imágenes por medio de técnicas de visión e inteligencia artificial. *ITECKNE, Innovación e Investigación en Ingeniería*, 6(1), 5-13.
- Rodríguez Morales, R., y Sossa Azuela, J. H. (2012). *Procesamiento y análisis digital de imágenes*. Ciudad de México: Alfaomega
- Sánchez, H. y Morales, A. (2009). *Sistema de visión artificial para determinar el estado de recolección del fruto del árbol azadirachta indica* (tesis de pregrado). Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.
- Sandoval, Z. y Prieto, F. (2007). Caracterización de café cereza empleando técnicas de visión artificial. *Revista Facultad Nacional de Agronomía*, 60(2), 4105-4127.
- Valenzuela, V. (2003). *Manual análisis de algoritmos*. Copiapó: Instituto Nacional de Capacitación.
- Velásquez, E. (2014). *Simulación sistema de clasificación basado en visión artificial* (tesis de pregrado). Ibagué: Universidad Nacional Abierta y a Distancia.