

**ANÁLISIS Y SEGUIMIENTO DE PARTÍCULAS MEDIANTE TÉCNICAS DE  
PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES**

**DANIEL ALEGRÍA ARCE**



**UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN  
INGENIERÍA FÍSICA  
POPAYÁN  
2016**

**ANÁLISIS Y SEGUIMIENTO DE PARTÍCULAS MEDIANTE TÉCNICAS DE  
PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES**

**DANIEL ALEGRÍA ARCE**

**Trabajo de investigación  
Para optar al título de Ingeniero Físico**

**Director:  
ING. LEONAIRO PENCUE FIERRO**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN  
INGENIERÍA FÍSICA  
POPAYÁN  
2016**

Nota de Aceptación

---

---

---

---

---

Director \_\_\_\_\_  
Ing. Leonairo Pencue Fierro

Jurado \_\_\_\_\_  
Ing. Dagoberto Mayorca Torres

Jurado \_\_\_\_\_  
Ing. Rubiel Vargas Cañas

Popayán, septiembre de 2016

*Dedico este trabajo a mis padres,  
quienes dedicaron su vida, su amor y su apoyo total.*

## **Agradecimientos**

Mis más sinceros agradecimientos a:

El profesor Leonario Pencue Fierro por sus valiosos aportes a este trabajo, sus conocimientos compartidos durante todo el proceso formativo y su amistad.

De igual manera a Dagoberto Mayorca quien además de ser jurado, ha brindado su apoyo en el desarrollo de este trabajo así mismo su gran amistad.

Al profesor y jurado Rubiel Vargas por sus conocimientos dedicación y tiempo.

A los compañeros de carrera y de laboratorio Julián Muñoz, Cristian Valencia , Carlos Javier Guzmán por su amistad, conocimientos compartidos durante el proceso formativo. Y en general a los integrantes del grupo de Óptica y Laser, por dejarme ser parte de el y abrir un espacio para desarrollar este proyecto.

A los profesores del departamento de Física, quienes han entregado su vida a formar personas y profesionales compartiendo su sabiduría y experiencia.

A Luis Fernando Echeverry , "el maestro", quien ha puesto su en empeño en dejar en alto el nombre del ingeniero físico.

## Contenido

Pág.

<b>Introducción .....</b>	<b>12</b>
<b>1. Análisis de Partículas .....</b>	<b>14</b>
1.1 Importancia de las partículas .....	14
1.2 Tamaño y forma de partículas .....	15
1.2.1. Diámetros equivalentes.....	16
1.2.2 Diámetro de una esfera de volumen equivalente.....	16
1.2.3 Diámetro de una esfera de superficie equivalente .....	16
1.2.4. Diámetro de una esfera de superficie por unidad de volumen equivalente..	17
1.2.5. Diámetro de una esfera de área proyectada equivalente .....	17
1.2.6. Diámetro de una esfera de perímetro equivalente .....	18
1.2.10 Elipse equivalente .....	18
1.3 Morfología de las partículas .....	19
1.3.1 Redondez o Esfericidad .....	19
1.3.2 Circularidad.....	21
1.4 Otros parámetros del análisis de partículas en aplicaciones industriales .....	21
1.4.1 Diámetro de Martin .....	21
1.4.2 Diámetro de Feret (dF) .....	22
1.4.3 Porosidad.....	23
1.4.4 Densidad.....	23
<b>2. La visión artificial y sus componentes .....</b>	<b>24</b>
2.1 Adquisición de imágenes .....	24
2.2. Imagen digital.....	25
2.3 vídeo .....	26
2.4 Iluminación.....	26
2.4.1 Iluminación Direccional .....	27
2.4.2 Iluminación Difusa.....	27
2.4.3 Iluminación a Contraluz.....	27

2.5 Fuentes de Luz .....	28
2.5.1 Fuentes Fluorescentes .....	28
2.5.2 Diodos LED(hablar de las ventajas en el trabajo) .....	28
2.5.3 Luz Estroboscópica.....	29
2.5.4. Láser.....	29
2.6 Preprocesamiento de imágenes .....	29
2.7. Eliminación de ruido.....	30
2.8 Segmentación mediante mezclas gaussianas .....	30
2.9. Operaciones Morfológicas .....	32
2.9.1 Dilatación .....	32
2.9.2 Erosión.....	32
2.9.3 Apertura y Cierre.....	33
2.10 Características de objetos de interés.....	33
2.11 <i>Tracking</i> o seguimiento de objetos de Interés.....	33
2.11.1 Rapidez y Trayectorias .....	34
<b>3. Diseño experimental.....</b>	<b>36</b>
3.1 Adquisición de las imágenes.....	36
3.2 Preprocesamiento de imágenes. ....	37
3.3 segmentación.....	39
3.3.1 Operaciones morfológicas .....	41
3.4 Seguimiento .....	43
3.5 Resultados .....	45
3.6 montaje y captura de escenas mediante el microscopio óptico .....	46
3.7 Montaje y captura de escenas con iluminación no controlada.....	47
3.8 Montaje y captura de escenas con iluminación controlada.....	48
<b>4. Resultados y Análisis.....</b>	<b>52</b>
4.1 Adquisición de vídeo adquirido para el análisis .....	52
4.2 Iluminación.....	52
4.3 Detección de movimiento.....	53
4.3.1 Detección de movimiento en escenas con luz no controlada.....	53
4.3.2 Detección de movimiento en escenas con luz controlada .....	56

4.3.3 Detección de movimiento de escenas obtenidas mediante el microscopio óptico.....	60
4.4 Seguimiento de partículas.....	63
4.4.1 seguimiento de partículas regulares en iluminación no controlada.....	64
4.4.2 seguimiento de partículas irregulares en condiciones de iluminación controlada.....	70
4.6 Tipos de partículas.....	73
4.6.1 Partículas con forma regular.....	73
4.6.2 Partículas con forma irregular.....	75
4.5 Análisis de partículas.....	77
4.5.1 Tamaño, forma y cinemática de partículas en condiciones de iluminación no controlada.....	77
4.5.2 Tamaño, forma y cinemática de partículas en condiciones de iluminación controlada.....	80
<b>5. Conclusiones .....</b>	<b>84</b>
<b>Lista de Referencias .....</b>	<b>87</b>



## Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1: Conceptualización de área proyectada.....	18
Figura 2: Circularidad de diversas partículas. Fuente <a href="http://www.malvern.com">www.malvern.com</a> .....	21
Figura 3: Diámetro de Martin .....	22
Figura 4: Diámetro de Feret.....	22
Figura 5 : representación de una imagen digital y la convención de sus ejes. ....	26
Figura 6: diagrama de flujo de los pasos fundamentales en el procesamiento digital de imágenes. ....	36
Figura 7: microscopio óptico con cámara integrada.....	37
Figura 8: Izquierda-Arriba: imagen original. Derecha- arriba: ajuste de brillo y contraste. Abajo: aplicación de filtro gaussiano .....	39
Figura 9: Derecha: Elemento A y B. Izquierda : Expansión o dilatación. ....	42
Figura 10: Derecha: Elemento A y B. Izquierda : Expansión o dilatación .....	43
Figura 11: Criterio de mínima distancia .....	44
Figura 12: Partículas de origen orgánico .....	47
Figura 13 : Partículas con movimiento propio.....	48
Figura 14: ambiente estructurado de iluminación .....	49
Figura 15: Imágenes de alto contraste.....	50
Figura 16: reglilla de 1cm.....	51
Figura 17: Escena iluminada a contraluz .....	54
Figura 18: Segmentación inadecuada .....	55
Figura 19: Aplicación de operaciones morfológica.....	56
Figura 20: Fondo de la escena .....	58

Figura 21: Movimiento aleatorio de partículas .....	58
Figura 23: Ruido debido al movimiento del fluido. ....	59
Figura 24: Lado izquierdo imagen original. Lado derecho imagen segmentada. ...	60
Figura 25: Izquierda: Imagen sin procesamiento. Derecha: Segmentación del movimiento browniano .....	62
Figura 26 Izquierda: imagen sin procesamiento. Derecha: Segmentación respectiva.....	63
Figura 27: Lado izquierdo: Escena iluminación no controlada. Lado derecho: Escena con iluminación controlada.....	64
Figura 28: Seguimiento de partículas en condiciones de iluminación no controlada. ....	65
Figura 29: Izquierda: segmentación incompleta. : <i>Tracking</i> incorrecto debido a la mala segmentación .....	66
Figura 30: Izquierda: Segmentación aplicando operaciones morfológicas. Derecha: <i>Tracking</i> correcto.....	66
Figura 31: Arriba-izquierda: Seguimiento de objetos de interés en el frame n. Arriba-derecha: Interacción de objetos de interés. Abajo-izquierda: Pérdida de etiquetas en el frame n+1. Abajo-derecha: Asignación de etiquetas de manera aleatoria después de la separación de las partículas. ....	68
Figura 32: Izquierda: Separación de contornos, derecha: Asignación de etiquetas correctamente .....	69
Figura 33: Seguimiento de partículas en condiciones controladas de iluminación.....	71
Figura 34: izquierda: separación de contornos, derecha: <i>tracking</i> correcto.....	72
Figura 35: Arriba: Hormigas y espermatozoides, respectivamente.. Abajo: esporas y levadura, respectivamente .....	75
Figura 36: semillas.....	75
Figura 37: trozos de madera y cera de parafina respectivamente. ....	76
Figura 39: Curvatura de la trayectoria.....	80
Figura 40: Trayectoria y velocidad de las partículas. ....	83

## Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1: Número de objetos en relación al número de objetos detectados, sin aplicar operaciones morfológicas .....	55
Tabla 2: Número de objetos en relación al número de objetos detectados, una vez se han aplicado operaciones morfológicas .....	56
Tabla 3: número de objetos reales en relación al número de objetos detectados, sin aplicación de operaciones morfológicas .....	57
Tabla 4: detección de movimiento en escenas obtenidas mediante el microscopio óptico en relación al número real de objetos en la escena.....	61
Tabla 5: relación entre el número de objetos seguidos y número de etiquetas generadas en la escena. ....	69
Tabla 6: Número real de objetos respecto al número de objetos seguidos .....	71
Tabla 7: Rango de velocidades y su respectivo color sobre la línea de trayectoria. ...	79
Tabla 8: Rango de coeficiente de correlación de los puntos de la trayectoria y su respectivo color. ....	80

## Introducción

Los sistemas de partículas se encuentran presentes en diversas aplicaciones industriales; más del 75% de los materiales procesados en la industria están en forma particulada tal como en la minería, construcción, metalurgia, farmacéutica, alimentaria, petrolera, pigmentos y manufactura de semiconductores, además de ser un tema de gran interés para determinar el grado de contaminación del ambiente por material particulado en suspensión [1]. Teniendo en cuenta que la calidad de los productos obtenidos en la industria, depende del tamaño, distribución y morfología de las partículas que los conforman, es de suma importancia conocer y caracterizar estos corpúsculos para garantizar una excelente materia prima, al igual, que en el ambiente para determinar los efectos adversos de estas en la salud, además de ser tema de interés en diversos estudios en biología [1].

Los métodos mecánicos y manuales para el análisis de sistemas de partículas en aplicaciones industriales o aplicaciones ambientales, tienen limitaciones en la adquisición de información, así como la demanda de costos, espacio que ocupan y además los equipos existentes en el mercado están calibrados de acuerdo a estándares del país donde han sido fabricados [1]. Algunos métodos no se consideran precisos; pues su respuesta varía considerablemente debido a factores externos del ambiente, además la información procesada se genera de manera global y no individual [1]. Algunas técnicas resultan destructivas, alterando la calidad del producto final o el resultado de las investigaciones. No obstante, no son versátiles para diferente talla de partículas y en general no permiten identificar la cinemática de estas; que puede ser útil para diversas aplicaciones (como por ejemplo partículas en fluidos, estudios en biología, etc.).

El objetivo de este trabajo es facilitar el análisis de partículas para diferentes campos de aplicación, según la necesidad de estudio, teniendo la posibilidad de adaptarse una variedad de situaciones en relación al material particulado, para ello se recurre al uso de técnicas de procesamiento digital de imágenes, en las cuales se realice tareas de segmentación y detección de movimiento, seguimiento y cálculo de parámetros morfológicos, a partir de escenas previamente obtenidas. con la finalidad de obtener un análisis y seguimiento de partículas en fluidos para la caracterización de diferentes parámetros como tamaño, así mismo determinar la cinemática de la partícula, de manera que se tenga un historial de la trayectoria del corpúsculo que permita calcular, velocidad, coeficiente de correlación de los segmentos de la trayectoria, marcando cada punto para un posterior análisis y finalmente automatizar la adquisición de la información que se obtiene a partir del escaneo de los corpúsculos; efectuándose de manera versátil, rápida y eficiente, a un bajo costo.

## 1. Análisis de Partículas

### 1.1 Importancia de las partículas.

En castellano la palabra “partícula” deriva del latín, y se encuentra compuesta por dos elementos definidos como: “par, partis”, que puede traducirse como “parte”, y el sufijo “-cula”, que es equivalente a “pequeña”.

En la física, las partículas son definidas como un cuerpo dotado de masa del que se hace abstracción del tamaño y de la forma pudiéndose considerar como un punto. Así todo objeto es considerado como puntual, para facilitar su estudio. Cuando miramos a nuestro alrededor, observamos muchas partículas o material particulado, como ya se había mencionado, más del 75% de todos los materiales procesados en la industria están en forma particulada. Las partículas pueden ser solidas, liquidas o gaseosas, algunas son naturales, otras son procesadas industrialmente desde productos naturales y algunas completamente sintéticas [2].

Las partículas microscópicas que flotan en el aire son de muchos tipos, como: partículas en suspensión, humo generado por motores, partículas formadas fotoquímicamente, corpúsculos de sal formadas de aerosoles (partículas en el aire) del océano y partículas de hielo o gotas de las nubes en la atmósfera. Esta gran variedad de partículas tiene la capacidad de afectar no solamente la visibilidad y el clima, también afecta la salud y la calidad de vida [3].

En la industria, el tamaño, distribución de tamaño y forma son parámetros decisivos para determinar las propiedades de productos o como control de calidad en procesos. por ejemplo en el caso de la industria farmacéutica el tamaño es un parámetro importante y decisivo en la fabricación de medicamentos, las partículas deben atravesar diversas barreras en el organismo para que los medicamentos

surtan el efecto necesario, para el caso de la barrera hematoencefálica (evita que pasen sustancias tóxicas al cerebro), el rango de corpúsculo debe estar entre 15 y 150 nanómetros; o en el endotelio (tejido que recubre la zona interna de todos los vasos sanguíneos) deben ser menores de 150 nanómetros. Así mismo la morfología es importante para la aplicación o producto final. Por ejemplo las nanopartículas de oro poseen propiedades ópticas interesantes y son aplicadas en el campo de los biosensores. Estas pueden tener distintas morfologías y sus propiedades ópticas varían según si son; nanoesferas, nanohilos y nanobarras. También para la manufactura de materiales con superficies rugosas o ásperas, los corpúsculos de los que se componen, deben tener formas puntiagudas para obtener dicha características [4].

El estudio de la modelización, organización y coordinación de los comportamientos de los animales se estudia a partir de su cinemática, por ejemplo el análisis de las trayectorias de las hormigas, revela movimientos que esconden patrones matemáticos. Aparte del interés biológico, estos avances podrían aplicarse en diversos campos tecnológicos, como por ejemplo diseñar la coordinación de un grupo de pequeños robots para limpiar un área contaminada u otras tareas.[12].

## **1.2 Tamaño y forma de partículas**

La partícula en ciencia es definida como una porción concreta de materia gaseosa, líquida y sólida mayor que una molécula. El agua, el aire y desperdicios sólidos tienen partículas de diversos tamaños. En muchos casos es importante expresar el tamaño y forma convenientemente [5].

La descripción de los parámetros de mezclas de partículas es difícil, sobre todo para materiales sólidos, en la que el sistema de partículas no es homogéneo en cuanto a su tamaño y forma. La caracterización de la forma y tamaño de partículas

se realiza mediante expresiones matemáticas con un diámetro equivalente que a continuación se describe .

### **1.2.1. Diámetros equivalentes**

El concepto de esfera equivalente es un parámetro usado para la caracterización del tamaño de partícula, el cual se basa en que una partícula irregular tiene su esfera equivalente con propiedades iguales. El diámetro de la esfera equivalente caracteriza el tamaño de la partícula [6]. En la figura 1. Se muestra el área proyectada de una partícula con forma irregular

### **1. 2.2 Diámetro de una esfera de volumen equivalente**

Es el diámetro de una esfera que posee el mismo volumen (V) que la partícula que se desea caracterizar [6]. La ecuación 1 relaciona el diámetro de una esfera en función del volumen como se muestra a continuación:

$$d_v = \left(\frac{6V}{\pi}\right)^{\frac{1}{3}}$$

**Ecuación 1**

### **1.2.3 Diámetro de una esfera de superficie equivalente**

Es el diámetro de una esfera que posee la misma superficie externa (S) que la partícula que se desea caracterizar [6]. La ecuación 2 relaciona el diámetro de una esfera en función del la superficie como se muestra a continuación:

$$d_s = \left(\frac{S}{\pi}\right)^{\frac{1}{2}}$$

**Ecuación 2**



#### **1.2.4. Diámetro de una esfera de superficie por unidad de volumen equivalente**

Es el diámetro de una esfera, que posee la misma relación de superficie externa (S) por unidad de volumen (V) que la partícula que se desea caracterizar [6]. En la ecuación 3 se muestra la relación entre la superficie y el volumen como se muestra a continuación.

$$\frac{S}{V} = \frac{6d_s^2}{d_v^3}$$

**Ecuación 3**

De manera que el diámetro de una esfera de superficie por unidad de volumen equivalente se puede escribir como:

$$d_{sv} = \frac{6V}{S}$$

**Ecuación 4**

#### **1.2.5. Diámetro de una esfera de área proyectada equivalente**

Es el diámetro de una esfera que posee igual área proyectada (A) que la partícula que se desea caracterizar. Esta medida depende de la orientación de la partícula al momento de la medición [6]. En la ecuación 5 relaciona el diámetro de una esfera en función del área como se muestra a continuación:

$$d_a = \left( \frac{4A}{\pi} \right)^{1/2}$$

**Ecuación 5**

La Figura 1 muestra la proyección de una partícula irregular. Si se establece el área de esta proyección es posible estimar el diámetro de un círculo equivalente. La Figura indica que dependiendo en qué dirección se obtenga el área proyectada, las áreas serán diferentes y consecuentemente se obtendrán distintos diámetros equivalentes [6].

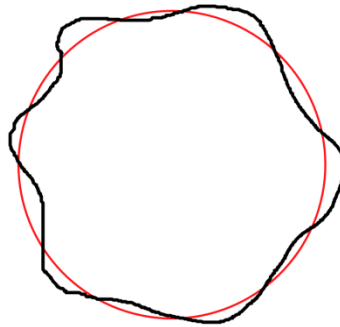


Figura 1: Conceptualización de área proyectada

### 1.2.6. Diámetro de una esfera de perímetro equivalente

Es el diámetro de una esfera que posee igual perímetro ( $P$ ) que la partícula que se desea caracterizar. Esta medida también depende de la orientación de la partícula al momento de la medición [6].

$$d_c = \frac{P}{\pi}$$

Ecuación 6

### 1.2.10 Elipse equivalente

Basándose en el centroide, radio mínimo y radio máximo de una partícula irregular, se aproxima esta a una elipse equivalente de radio mínimo  $a$  y radio máximo  $b$  como se muestra en la figura 5. Estos valores permiten calcular otros

parámetros como el área, volumen, y factores de forma. Este volumen es equivalente a un esferoide oblato [1]. Las ecuaciones de área y volumen de las partículas respectivamente son;

$$\text{Área} = \pi ab$$

**Ecuación 7**

$$\text{Volumen} = \frac{3}{4}\pi a^2 b$$

**Ecuación 8**

### **1.3 Morfología de las partículas**

Un aspecto importante en el análisis de partículas es la morfología. Este parámetro es indispensable ya que la forma determina las propiedades de un material particular.

#### **1.3.1 Redondez o Esfericidad**

Un parámetro que describe la forma de la partícula es la redondez. Esta se calcula conociendo el área proyectada A y longitud L: Como puede verse, este parámetro alcanza un valor máximo de 1 para un círculo. Esta redondez está relacionada con la compacidad, y se define en terminamos matemáticos como [1]:

$$\text{Redondez} = \frac{4A}{\pi L^2}$$

**Ecuación 9**

Otras definiciones de redondez implican la relación entre el perímetro (P) al cuadrado y el área proyectada multiplicada por 4π

$$\text{Redondez} = \frac{P^2}{4\pi} = \frac{4\pi A}{P^2}$$

**Ecuación 10**

La esfericidad (factor de forma,  $S_F$ ) expresa el grado de aproximación de la partícula a una esfera de igual volumen. En este aspecto, un cubo es más esférico que un cuerpo con forma de tabla por más redondeado que sea este. Una partícula es más esférica cuando su valor de esfericidad es cercano a 0 [1]. para calcular la esfericidad, se siguen algunos pasos :

$$r = \sqrt{\frac{\text{Área}}{\pi}}$$

**Ecuación 11**

$$r_{medio} = \frac{\sum_{i=1}^n r_i}{n}$$

**Ecuación 12**

$$r_{mc.d} = \sqrt{\frac{(b - r_{medio})^2 + (r_{medio} - a)^2}{2}}$$

**Ecuación 13**

Por lo tanto la esfericidad se expresa como

$$S_F = \frac{r_{mc}}{r_{medio}}$$

**Ecuación 14**

Donde  $r_{mc.d}$  es el valor de la desviación de la media cuadrática en longitud radial y  $a$ ,  $r_{medio}$  y  $b$ , son el mínimo, media, máximo y máxima longitud radial, respectivamente. [1]

### 1.3.2 Circularidad

Otro parámetro utilizado para la caracterización de la forma de la partícula es que tan cercano es a un círculo perfecto. Esta medida se denomina circularidad, la cual se describe en la ecuación [1]:

$$C = \frac{4\pi A}{P^2}$$

Ecuación 15

Donde C es la circularidad, P es el perímetro de la partícula y A es el área proyectada.

En la figura 2, se muestran algunos valores de circularidad

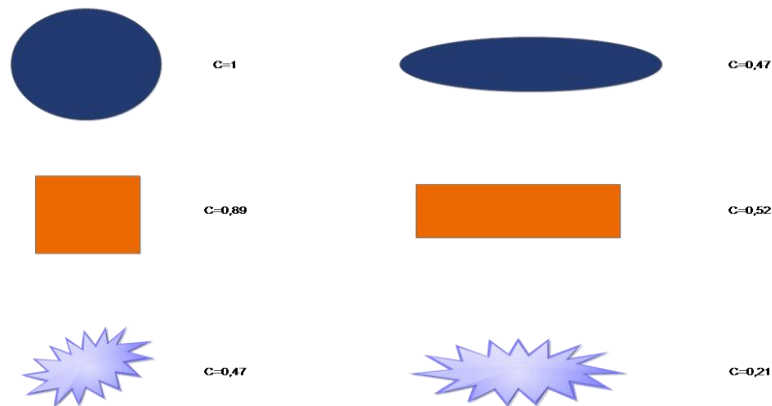


Figura 2: Circularidad de diversas partículas. Fuente [www.malvern.com](http://www.malvern.com)

## 1.4 Otros parámetros del análisis de partículas en aplicaciones industriales

### 1.4.1 Diámetro de Martin

Este diámetro es usado en microscopía, representa la longitud que bisecta el área proyectada. Ver figura 3

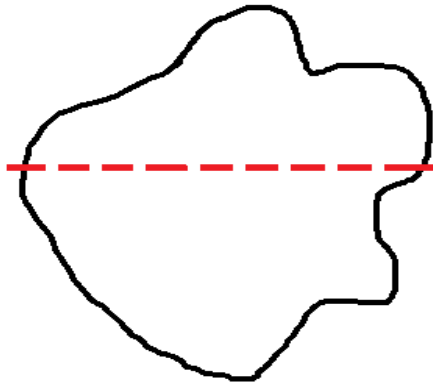


Figura 3: Díámetro de Martin

#### 1.4.2 Díámetro de Feret (dF)

El díámetro de Feret, al igual que el díámetro de Martin, es usado en microscopía. Este representa la distancia entre dos líneas paralelas que son tangenciales al contorno de la proyección de la partícula, tal como se observa en la figura 4. Como sucede con el díámetro de Martin, pueden determinarse diferentes díámetros de Feret de acuerdo a la dirección con la que se tracen las tangentes [6].

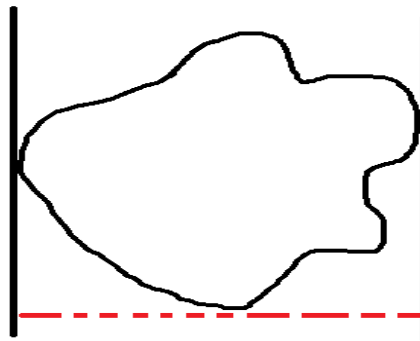


Figura 4: Díámetro de Feret

### **1.4.3 Porosidad**

La porosidad del material particulado puede ser también un importante parámetro para la caracterización. La presencia de poros y su distribución de tamaño puede estar relacionado directamente con la calidad del producto [2].

### **1.4.4 Densidad.**

La densidad de las partículas es un parámetro importante para su comportamiento. Por ejemplo el cálculo del volumen de una partícula a partir de su masa o viceversa, requiere conocer su densidad. Pero también puede haber una influencia directa sobre el comportamiento, como por ejemplo, en las propiedades de sedimentación y aerodinámicas [2]

## 2. La visión artificial y sus componentes

Un sistema de visión artificial es un conjunto de algoritmos que permite obtener información de una imagen, tal como lo podría hacer la visión humana; se constituye principalmente de una cámara, una fuente de iluminación y un computador. A continuación se destacaran los principales componentes de un sistema de visión artificial.

### 2.1 Adquisición de imágenes

El primer paso en el procesamiento de la imagen es la adquisición, cuya calidad depende de ciertos parámetros y de los elementos de este, tales como la cámara, el dispositivo de captura y la iluminación del entorno, éstos factores son decisivos en el momento de adquirir la imagen. Cuando la imagen ha sido recogida por la cámara de video, la tarjeta de adquisición y procesamiento de imágenes recibe una señal analógica enviada por ella, la cual es convertida en una señal digital, para posteriormente ser procesada [7].

- digitalizadores de imágenes o *frame grabbers*
- Digitalizadores de imágenes con procesador específico
- tarjetas de procesamiento paralelo

Los digitalizadores de imágenes muestran la señal de la cámara y guardan la imagen digital en una zona de memoria, la cual es accedida por el microprocesador del computador para su tratamiento. Están constituidos por los puertos de entrada de la señal de video y el conversor analógico-digital para obtener la imagen [7].



## 2.2. Imagen digital

La imagen digital es una función bidimensional que puede ser representada como una función de intensidad de luz  $f(x, y)$ , donde  $x$  y  $y$  representan las coordenadas espaciales en píxeles y el valor de  $f$  en un punto cualquiera  $(x, y)$ , es proporcional al brillo (o nivel de gris) de la imagen en ese punto [7]. Así, como también de la parte que sea reflejada por los objetos que componen dicha escena. Estos componentes son llamados iluminación y reflexión, siendo descritos por  $i(x, y)$  y  $r(x, y)$  respectivamente. Esto se puede expresar mediante la función [7]:

$$f(x, y) = i(x, y)r(x, y)$$

Ecuación 16

Una imagen digital puede considerarse como una matriz cuyos índices de fila y columna identifican un punto de la imagen  $(x, y)$  y el valor del correspondiente elemento de la matriz indica el nivel de gris (Este valor está dentro de 0-255) (Figura 7). Los elementos de una distribución digital de este tipo se denominan elementos de la imagen, o más comúnmente píxeles. El vídeo es una tecnología de captura electrónica, grabación, tratamiento, almacenamiento, transmisión, y reconstrucción de una secuencia de imágenes. Cada una de las imágenes de la secuencia recibe el nombre de *frame*. El número de imágenes o *frames* por unidad de tiempo se conoce como *frame rate* [8].

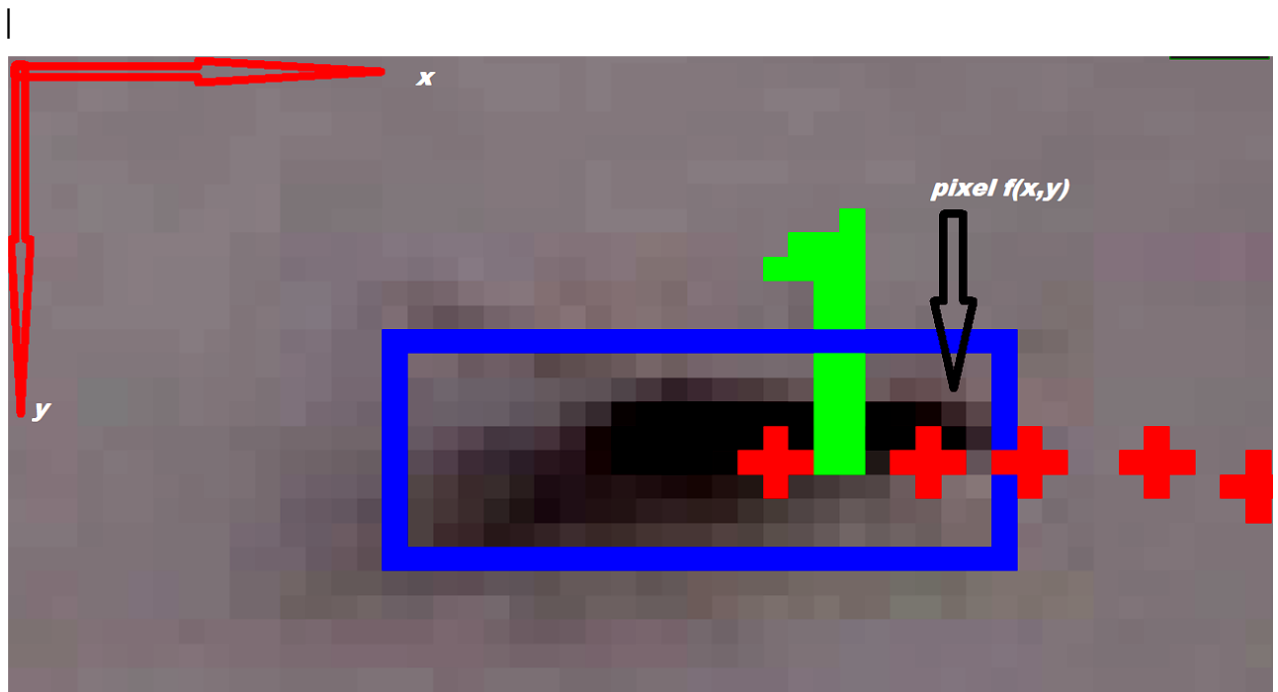


Figura 5 : representación de una imagen digital y la convención de sus ejes.

### 2.3 vídeo

El vídeo es una tecnología de captura electrónica, grabación, tratamiento, almacenamiento, transmisión, y reconstrucción de una secuencia de imágenes. Cada una de las imágenes de la secuencia recibe el nombre de *frame*. El número de imágenes o *frames* por unidad de tiempo se conoce como *frame rate* [7].

En la Actualidad existe una amplia variedad de formatos de video para almacenar y reproducir en un computador. Dependiendo de este formato, el video tendrá, básicamente, una calidad de video diferente y un tamaño de archivo más o menos pequeño.

### 2.4 Iluminación

La iluminación juega un papel de vital importancia en la visión artificial, debido a que de esta, depende la calidad de la imagen captada. Cuando se ilumina un

objeto adecuadamente o una escena de interés, las etapas posteriores a la adquisición de la imagen resultan más fáciles de procesar, puesto que se simplifica el análisis y la posterior interpretación de la escena. una iluminación no adecuada afecta los algoritmos de visión de manera que puede complicar el análisis ; esto puede solucionarse rápidamente cambiando la iluminación en lugar de modificar el algoritmo [7]. El principal objetivo de la iluminación es resaltar las características de interés en el objeto que se quiere estudiar y de acuerdo a esto la iluminación debe ser escogida según el estudio o una aplicación en particular. A continuación se presentan diversas técnicas de iluminación que pueden ayudar a los algoritmos a cumplir con su finalidad:

#### **2.4.1 Iluminación Direccional**

Esta iluminación es muy usada en aplicaciones que permiten localizar y reconocer objetos, o para inspeccionar su superficie. La idea es aplicar una iluminación orientada al objetivo de interés usando un haz direccional [8].

#### **2.4.2 Iluminación Difusa**

Este tipo de iluminación tiene como objetivo buscar que los haces de luz incidan sobre un objeto desde todas las direcciones. Esta iluminación es utilizada comúnmente cuando se necesitan imágenes desde varios puntos de vista, por lo que no se pueden favorecer unas zonas más que otras [8].

#### **2.4.3 Iluminación a Contraluz**

Esta iluminación produce imágenes prácticamente con sólo dos niveles de gris. El objetivo de esta consiste en iluminar el objeto por detrás, de forma que la fuente luminosa, el objeto y la cámara deben estar alineados. Esta técnica es ideal en

aplicaciones en las cuales se requiere la silueta del objeto para su reconocimiento [8].

## **2.5 Fuentes de Luz**

Para obtener una imagen de calidad que permita realizar un procesamiento más fácil y preciso, además de la forma en la cual se va a iluminar, se debe escoger una fuente de luz adecuada. Existen diversas fuentes de luz que se pueden utilizar dependiendo de la aplicación y el fin, a continuación se describe algunas de ellas hablar de las ventajas en el trabajo

### **2.5.1 Fuentes Fluorescentes**

Este tipo de fuentes son usadas como iluminación difusa; comúnmente en la iluminación de objetos con superficies reflectoras. La principal desventaja es la disminución del nivel de intensidad con el paso del tiempo [7].

### **2.5.2 Diodos LED(hablar de las ventajas en el trabajo)**

Los diodos LED emiten una luz monocromática en una variedad de colores. Este tipo de fuente dura años funcionando y es la más barata en cuanto al consumo de todas las fuentes de luz, tiene baja emisión de calor. Una de las principales desventajas es que alcanza una intensidad de iluminación pequeña, de manera que en general usan varios para iluminar. Esta fuente es muy utilizada en iluminación a contraluz, e iluminación difusa [7].

### **2.5.3 Luz Estroboscópica**

Son de utilidad cuando se debe analizar objetos en movimiento. Generan una iluminación intensa, de manera que la iluminación del ambiente influye poco. Su principal desventaja es que necesita una fuente de tensión especial, y además se deben sincronizar con las cámaras y su intensidad va decreciendo con el tiempo [7].

### **2.5.4. Láser**

Esta fuente de luz permite entre muchas otras aplicaciones, tomar medidas tridimensionales. El uso del láser concede la posibilidad de generar diversos patrones de luz como puntos, líneas muy finas o reglillas [7]

## **2.6 Preprocesamiento de imágenes**

El preprocesamiento de imágenes es el conjunto de algoritmos que permite mejorar la apariencia de la imagen, esta mejora, consiste en resaltar una característica específica o eliminar lo que las oculta, con el fin de facilitar el análisis y el tratamiento de la imagen.

Los dos objetivos principales son; mejorar la imagen, resaltando elementos específicos de ésta y restaurar la imagen original, después de que esta ha sido degradada por factores como la distorsión geométrica dentro del sistema de una cámara o ruido generado por diversos factores. Las operaciones más comunes dentro del preprocesamiento son los filtros lineales para la eliminación de ruido.

## **2.7. Eliminación de ruido**

Las imágenes tienen una pequeña cantidad de ruido, debido a los componentes de la cámara o al medio que transmite la señal. El ruido es el resultado de píxeles que toman un valor de gris diferente del de sus vecinos. El ruido puede clasificarse en cuatro tipos: Gaussiano, impulsional (sal y pimienta), frecuencial y multiplicativo [7].

El uso de filtros permite eliminar estas señales que se añaden a la imagen, esta se puede filtrar en el dominio del espacio, trabajando directamente sobre los píxeles de la imagen, o en el dominio de la frecuencia, donde las operaciones se llevan a cabo en la transformada de Fourier de la imagen, estos filtros se pueden clasificar en: Filtros lineales, Filtros no-lineales.

## **2.8 Segmentación mediante mezclas gaussianas**

Una de las tareas fundamentales de la segmentación es dividir la imagen en regiones con características similares. La característica más básica para la segmentación es el nivel de gris. Los bordes y las texturas también son atributos útiles para la segmentación [9].

La segmentación está basada bajo tres propiedades:

- La conectividad. Los píxeles que pertenecen a un mismo objeto deben ser contiguos, es decir, deben estar agrupados formando regiones conexas.
- Discontinuidad. Los objetos destacan del entorno
- Similitud. Cada uno de los píxeles de un elemento tiene valores similares[9].

Las técnicas de segmentación se basan por tanto en la búsqueda de las partes uniformes de la imagen o justo lo contrario, aquellas partes en donde se produce un cambio. Dependerá del caso concreto el que se siga un método u otro o la

unión de ambos. Una región es un conjunto de píxeles en los que existe un camino entre cualquier pareja de sus puntos, y todos los píxeles del camino pertenecen a la región [7].

En esta etapa. Se diferencian los objetos de interés del fondo usando una técnica conocida como MOG (Mixtures Of Gaussian). La idea básica es modelar cada pixel de la imagen o un píxel particular como una mezcla de distribuciones gaussianas. Basándose en la persistencia y la concordancia de cada una de las gaussianas de la mezcla, se determina cuales de ellas podrían corresponder a colores del fondo. Los valores de píxeles que no se ajustan con las distribuciones del fondo se consideran como el primer plano (donde están los objetos de interés) hasta que haya una gaussiana que los incluya [10].

El MOG se basa en un enfoque probabilístico y estadístico asumiendo que los objetos que forman parte del fondo se ven por mucha más tiempo que los del primer plano y además sus colores pueden ser modelados por una distribución gaussiana, donde la media es el valor del color de la superficie y la varianza modela los cambios en la intensidad del color a causa ya sea del ruido de la cámara, los cambios de iluminación o la propia textura del objeto.

Un píxel resulta de una superficie concreta bajo una iluminación constante, bastaría con una distribución Gaussiana simple para modelar el valor del píxel. Y si la iluminación cambia durante horas, bastaría con una distribución simple y adaptativa. Por otro lado si se tiene una iluminación no controlada en un ambiente cambiante se necesitaran múltiples gaussianas adaptativas [10]. En cada cierto tiempo los parámetros de las gaussianas son actualizados. Estas se evalúan basado en cuales son más probables que sean parte del fondo. Los valores de píxel que no concuerden con los píxeles del fondo serán agrupados usando componentes relacionados. Por último los componentes conectados son rastreados *frame a frame* usando un rastreador múltiple [10].

## **2.9. Operaciones Morfológicas**

Cada objeto en la imagen puede ser analizado individualmente, una vez se haya culminado el proceso de segmentación. Se deberá resolver un problema generado por la segmentación como una mala clasificación de los píxeles, bordes imprecisos de los objetos o regiones que están solapadas. Por tanto, antes de extraer más características se requiere de una etapa de post-procesamiento. En esta fase se suele emplear el tratamiento morfológico. Es una técnica de procesamiento no lineal de la señal, caracterizada en realzar la geometría y forma de los objetos [7].

El objetivo de las operaciones morfológicas o transformaciones morfológicas es la extracción de estructuras geométricas y modificar la forma de los objetos presentes en la imagen. Además la morfología permite la eliminación de ruido debido a la segmentación

La morfología matemática se basa en la teoría de conjuntos y en la topología. A continuación se describen algunas nociones básicas utilizadas en este trabajo.

### **2.9.1 Dilatación**

La dilatación puede definirse como una transformación en la cual, los píxeles del fondo que están tocando al objeto cambian mientras el resto queda igual [7].

### **2.9.2 Erosión**

La erosión elimina objetos de poca importancia o muy simples además de simplificar la estructura de los objetos. Objetos complicados mediante erosión pueden quedar descompuestos en objetos más simples [7].



### 2.9.3 Apertura y Cierre

Ambos aplicaciones tienen como utilidad el eliminar ciertos detalles específicos de menor tamaño que el elemento estructural. La estructura total de la imagen casi no se ve dañada ni modificada [7].

### 2.10 Características de objetos de interés

Cuando los objetos de interés han sido separados en regiones conexas, es posible calcular una serie de valores para describir estos objetos, que son indispensables para el análisis y seguimiento de estos

### 2.11 *Tracking* o seguimiento de objetos de Interés

Una vez detectadas las partículas u objetos, se realiza el seguimiento o *tracking* en cada *frame*. Esta técnica se basa en el criterio de mínima distancia, es decir que se usa una medida de similitud cuyo objetivo es decidir si la región identificada corresponde a la misma región en la siguiente imagen de la secuencia. La región se toma de tal modo que contenga alguno de los objetos de interés, generalmente los límites de estas regiones son polígonos o rectángulos que encierran estos objetos [11]. Estos límites también son conocidos como *bounding box*.

Si entre los *bounding boxes* de un mismo objeto, en dos *frames*  $t$  y  $t + 1$ , existe un solapamiento o intersección, se puede afirmar que esa región es la misma del *frame* anterior, de lo contrario, corresponde a otra diferente. Para llevar un registro de cada región objeto detectado, se almacenan algunos parámetros en un vector o base de datos, cuyo objetivo es obtener los valores de posición, área, dirección de movimiento, velocidad, etiqueta, entre otros parámetros de interés para el análisis de las partículas u objetos.

Los algoritmos de *tracking* deben desarrollarse pensando en el comportamiento y el movimiento de un sistema de partículas. Existen algunos casos que pueden dificultar el correcto funcionamiento de los algoritmos de seguimiento, como por ejemplo, dos objetos o más que se juntan formando un contorno de mayor área, cuando hay una distribución de tamaño homogénea, en cierto punto de la escena y posteriormente se separan, En estos casos los algoritmos detectan un área que es mayor al promedio del área de las partículas encontradas en el *frame* y las fragmenta. Para dividir cada contorno el algoritmo promedia un área (cuando hay una distribución homogénea de partículas), si el área de un contorno es N veces mayor que el área promedio, deberá dividirse en N contornos, el orden de esta división no se tendrá en cuenta ya que solo servirá para que la etiqueta no se asigne de forma aleatoria o se generen etiquetas inexistentes.

Los objetos o partículas deben cumplir también otros criterios para que el algoritmo funcione correctamente como:

- La ubicación de un objeto cambia suavemente en el tiempo.
- La velocidad de un objeto cambia suavemente en el tiempo: esto incluye tanto la magnitud como la dirección.
- Un objeto puede estar en una única posición en la imagen en un instante de tiempo dado.
- Dos objetos no pueden ocupar la misma posición al mismo tiempo.

### 2.11.1 Rapidez y Trayectorias

La rapidez de una partícula, se calcula a partir de la posición de su centro de masa, en dos *frames*  $t$  y  $t + 1$ , y el tiempo transcurrido entre esos dos *frames*. Matemáticamente se expresa como:

$$rapidez = \frac{pcm - pcm'}{\Delta t}$$

Ecuación 17

Donde  $p_{cm}$  es la posición del centro de masa de la partícula en *frame*  $t$  y  $p_{cm}'$  es la posición del centro de masa de la misma en un *frame*  $t+1$  y  $\Delta t$  es el tiempo transcurrido entre los dos *frames*  $t$  y  $t+1$ .

La trayectoria de la partícula es coloreada de acuerdo a un valor de rapidez que esta lleve en un determinado número de *frames*. Esta trayectoria es almacenada en un vector en la cual se analiza el radio de curvatura que presenta en un segmento de esta, de acuerdo esto es coloreada.

### 3. Diseño experimental

El análisis y seguimiento de partículas basado en técnicas de visión artificial tiene como pasos fundamentales: la adquisición de las imágenes, preprocesamiento de las imágenes, segmentación, seguimiento y resultados. Estos elementos permiten que a partir de una imagen de entrada, se obtenga una salida, de datos morfológicos y de la cinemática de las partículas. en la figura 7 se puede observar los pasos fundamentales seguidos en este trabajo.

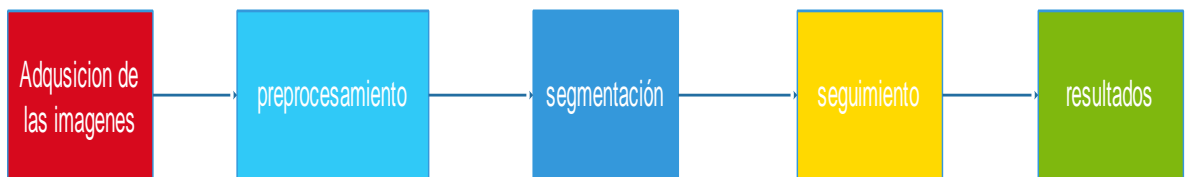


Figura 6: diagrama de flujo de los pasos fundamentales en el procesamiento digital de imágenes.

Los pasos fundamentales en el procesamiento digital de imágenes en este trabajo, son algoritmos desarrollados, utilizando el lenguaje de programación c++ y OPENCV, que es una librería de visión artificial de Intel, a continuación se describen los metodos de procesamiento:

#### 3.1 Adquisición de las imágenes

Para el desarrollo del trabajo y prueba de los algoritmos, fue necesario realizar la grabación y captura de video con una cámara digital de alta definición, con la finalidad de obtener buenas imágenes y ayudar a los algoritmos a facilitar su trabajo, para esto, se usó una cámara Samsung NX100, la cual cuenta con un sensor CMOS, una resolución de 14 mega píxeles y una resolución de video de 1280 X 720 a 30 fps, en un ambiente de iluminación controlado y no controlado cuyo objetivo son objetos macroscópicos entre el orden de los milímetros hasta los centímetros. Por otro lado se realiza la adquisición de video de objetos

microscópicos mediante un microscopio óptico Nikon Eclipse E 100, el cual incluye una cámara integrada Optika (ver figura 8) , con un objetivo de 4 a 40 aumentos, este dispositivo es conectado mediante USB al computador. Los videos obtenidos son almacenados en la memoria de la cámara para posteriormente ser procesados por los algoritmos o también son puesto a prueba directamente desde la cámara. En este trabajo por comodidad se decidió realizar pruebas con videos almacenados en la laptop.



Figura 7: microscopio óptico con cámara integrada

### 3.2 Preprocesamiento de imágenes.

En este paso fundamental del procesamiento de imágenes, como procedimiento opcional del sistema, se afina el contraste y brillo además de aplicar un filtro gaussiano a cada una de las imágenes de la secuencia de video, con la finalidad de lograr mayor contraste en las escenas de interés.

Para realizar un ajuste en el brillo y el contraste de las escenas se utilizó la multiplicación de un factor  $\alpha$  y la suma de un factor  $\beta$  a la imagen de entrada. tal

como se muestra en la siguiente expresión:

$$g(x) = \alpha f(x) + \beta$$

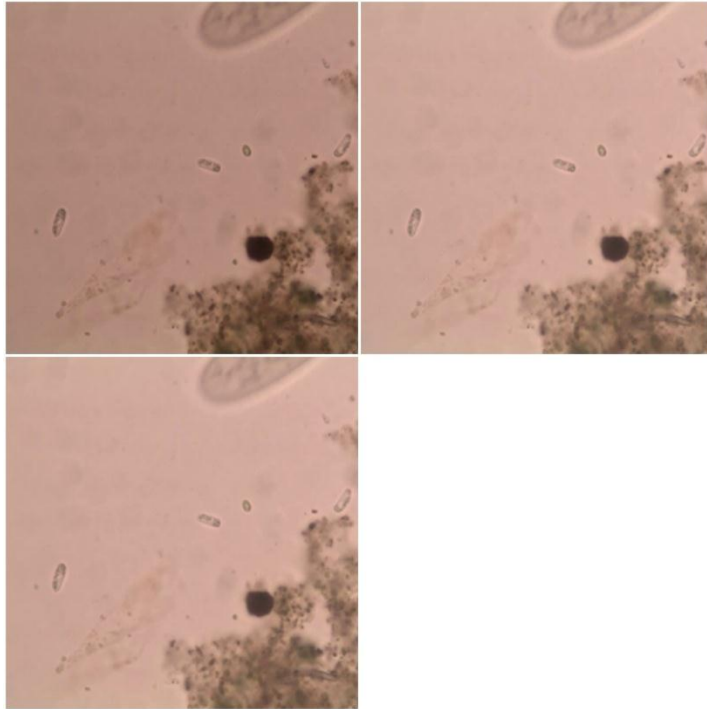
**Ecuación 18**

Donde  $f(x)$  es la imagen de entrada,  $g(x)$  es la imagen de salida, los valores de  $\alpha$  son ajustados entre 1 y 3, para  $\beta$  se afina entre 0 y 100, esto depende de las escenas y el tipo de iluminación. Posteriormente se interviene las imágenes mediante un filtro gaussiano con el objetivo de minimizar el ruido generado por la cámara y resaltar algunas características en la escena. Básicamente, el tratamiento que se realiza sobre la imagen consiste en primer lugar, en considerar la imagen como una matriz de píxeles, con unos valores determinados de rojo, verde y azul. A partir de aquí, los valores de cada punto de la nueva imagen, serán una combinación de los puntos cercanos. De esta forma, si un punto es de color rojo, y cercano a él hay puntos negros, este rojo se tornará de un tono más oscuro (y los negros se enrojecerán).

Para determinar cuáles son los píxeles que son cercanos, y los que no, se debe especificar al filtro un radio de acción. Con esto, si por ejemplo indicamos un radio de 10 píxeles, cada píxel de la nueva imagen se verá modificado por los todos los píxeles a menos de 10 unidades de distancia. Pero no todos los píxeles modifican con la misma "fuerza", cuanto más cerca estén del píxel que se está modificando, más valor tendrán en el cálculo del nuevo color. La función de la distribución gaussiana permite adjudicar cuánto aporta cada píxel, en función de la distancia a la que se encuentre. esta distribución se expresa matemáticamente como:

$$f(x) = ae^{-\frac{(x-b)^2}{c^2}}$$

**Ecuación 19**



**Figura 8: Izquierda-Arriba: imagen original. Derecha- arriba: ajuste de brillo y contraste. Abajo: aplicación de filtro gaussiano**

Donde  $(x - b)$  es la distancia entre el pixel que se está modificando y el pixel del que se toma el valor a y c, son iguales a 1 y  $f(x)$  representa el porcentaje de influencia.

En la imagen 9 se puede observar el preprocesamiento de imagen en una escena obtenida mediante el microscopio óptico.

### **3.3 segmentación**

En esta etapa se realiza la detección de movimiento utilizando un método conocido como mezclas gaussianas (MOG), Con esta técnica cada pixel es modelado de manera independiente por una mezcla de K gaussianas  $(\mu_i, \sigma_i, \omega_i)$ . La probabilidad de observar el valor de un determinado pixel, x, en el instante de tiempo t mediante una mezcla de gaussianas es:

$$P(x_t) = \sum_{i=1}^k \omega_{i,t} \eta(x_t - \mu_{i,t}, \Sigma_{i,t})$$

**Ecuación 20**

Donde  $\Sigma$  es la matriz de covarianzas y  $\omega_i$  la amplitud de pico. Se considera que cada una de las  $K$  gaussianas describe sólo uno de los objetos observables de fondo o el primer plano. Aquí,  $K$  se tomó entre un valor de 3 y 7.

Para llevar la ecuación 26 en un único modelo de fondo, se necesita un criterio que, el cual discrimine entre las distribuciones del primer plano y fondo. Para ello, todas las distribuciones se clasifican en base a la relación entre la amplitud de pico ( $\omega_i$ ) y la desviación típica ( $\sigma_i$ ). Se asume que cuanto mayor y más compacta sea la distribución, mayor probabilidad tiene de pertenecer al fondo. De esta manera, las primeras  $B$  distribuciones que cumplan lo anterior y verifiquen la desigualdad 27, son consideradas como fondo.

$$\sum_{i=1}^B \omega_i > T$$

**Ecuación 21**

donde  $T$  es un umbral definido.

En cada instante de tiempo  $t$ , se debe resolver simultáneamente dos problemas: asignar un nuevo valor  $x_t$ , a la distribución que mejor se ajuste y estimar los parámetros para actualizar el modelo. De todas las distribuciones que satisfacen la siguiente desigualdad:

$$|x_t - \mu_{i,t}| > 2,5\sigma_{i,t}$$

**Ecuación 22**



La primera es la que se ajusta mejor a  $x_t$ . Por otro lado, los parámetros  $(\mu_i, \sigma_i, \omega_i)$ , se actualizan para el mejor ajuste y a través del uso de promedios acumulativos simples. si no se encuentra una coincidencia, la ultima distribución es remplazada por una nueva que este centrada en  $x_t$  con peso  $\omega_i$  bajo y alta varianza  $\sigma_i$ .

### 3.3.1 Operaciones morfológicas

Es necesario en algunas circunstancias, aplicar operaciones morfológicas, en los casos donde la iluminación no es constante, se aplicó dilatación y erosión, con la finalidad de corregir algunos errores presentes en la segmentación los cuales generan regiones no conexas y deben ser adecuadas para un optimo seguimiento. La dilatación es una operación la cual dada una imagen A y un elemento estructural B, (ambos imágenes binarios con fondo negro), la dilatación de A por B se define como :

$$A \oplus B = \{ x \text{ tal que } (\widehat{B}_x) \cap A \neq \emptyset \}$$

**Ecuación 23**

El primer elemento de la dilatación, A esta asociado con la imagen que se está procesando y el segundo recibe el nombre de elemento estructural, la forma que actúa sobre A en la dilatación para producir  $A \oplus B$ .

Al realizar una dilatación con un elemento estructural que no contiene el cero, lo que se realiza es una expansión de la imagen. a continuación se muestra un ejemplo grafico del la dilatación:

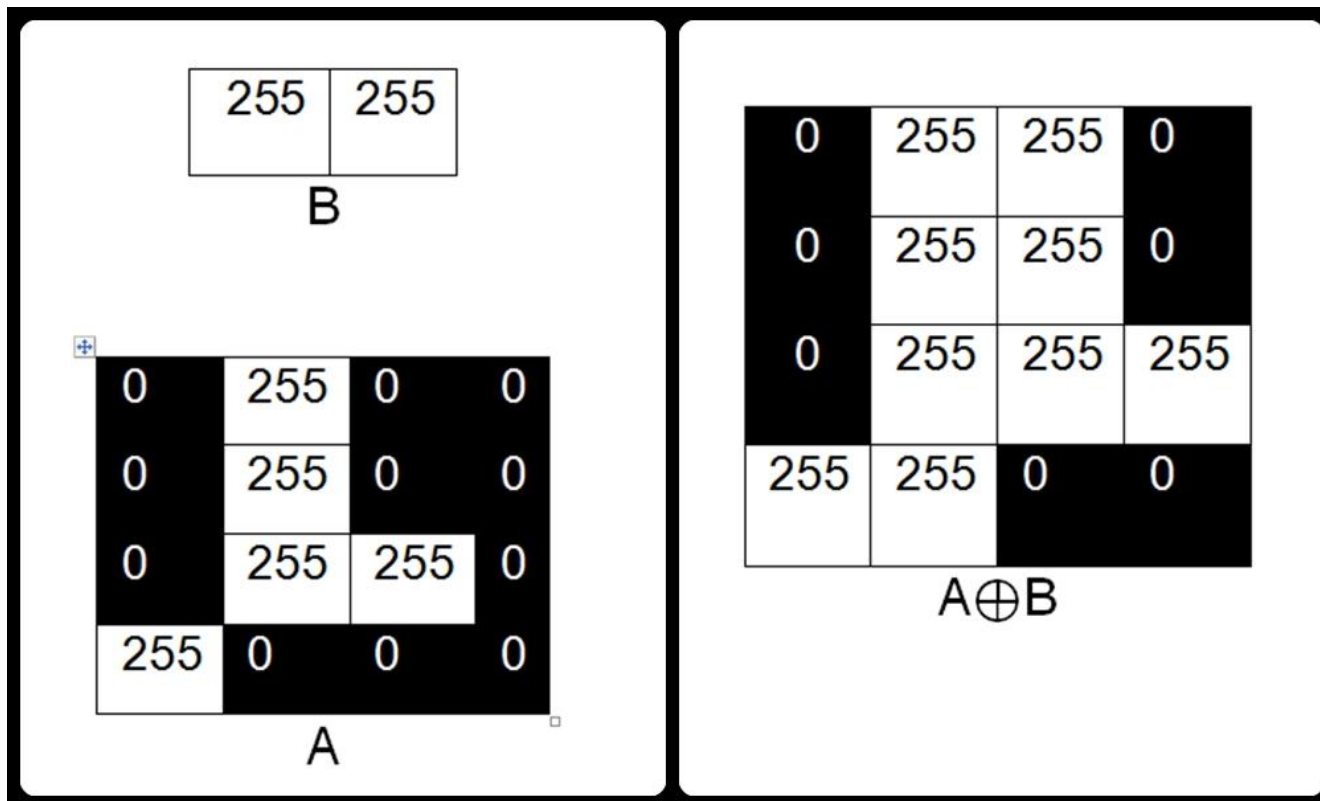


Figura 9: Derecha: Elemento A y B. Izquierda : Expansión o dilatación.

En la erosión se toma una imagen A y un elemento estructural B. La erosión de una imagen A, por un elemento estructural B, es el conjunto de todos los elementos x para los cuales B trasladado por x está contenido en A:

$$A \ominus B = \{ x \text{ tal que } B_x \subseteq A \}$$

Ecuación 24

Un ejemplo de erosión se ilustra en la siguiente figura, aquí se puede concluir que la esta operación es una reducción de la imagen :

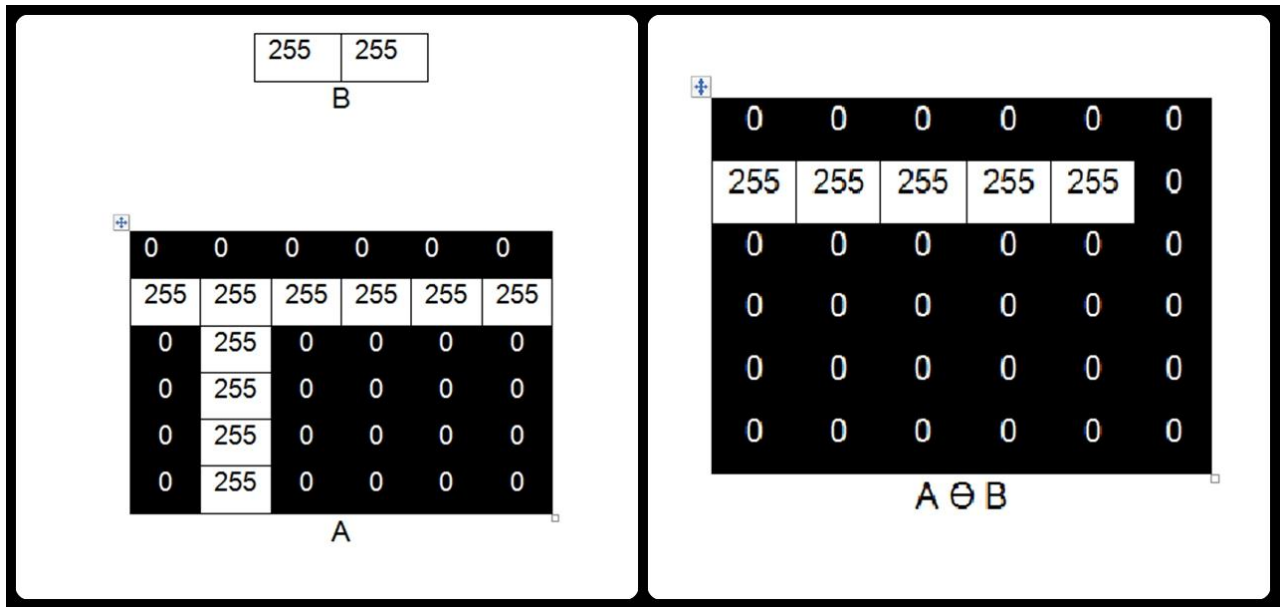


Figura 10: Derecha: Elemento A y B. Izquierda : Expansión o dilatación

### 3.4 Seguimiento

En esta etapa se reciben las imágenes segmentadas correctamente y cada objeto es seguido mediante el algoritmo de *tracking*, el cual sigue los corpúsculos utilizando el criterio de mínima distancia. El *tracking*, permite obtener y almacenar los puntos de la trayectoria de cada objeto y por consiguiente se puede calcular la rapidez de la partícula y el coeficiente de correlación de los segmentos de la trayectoria.

Para realizar el seguimiento o *tracking* se parte de la idea que de un *frame* a otro no se puede determinar si el número de objetos se mantiene constante, se plantean los siguientes criterios para la realización del seguimiento:

1. El número de objetos de un *frame* a otro no cambia: esto supone que las etiquetas de cada uno de los objetos se entregaran a los objetos del siguiente *frame* siguiendo el criterio de mínima distancia e independientemente de los valores de las etiquetas.
2. El número de objetos de un *frame a otro* disminuye. Los objetos en un

*frame* cederán sus etiquetas a los del *frame* posterior, obedeciendo el criterio de mínima distancia, lo que implica que algunas etiquetas no aparecerán en el último *frame* .

3. El número de objetos de un *frame* al siguiente aumenta: Aquí, Los objetos en un *frame* cederán sus etiquetas a los del siguiente *frame* obedeciendo el criterio de mínima distancia. Por tanto, algunos objetos no tendrán etiquetas (etiqueta por defecto = -1). Siendo necesario etiquetar de nuevo en orden ascendente.
4. En la Figura 10 se ilustra un objeto identificado en el primer *frame*, y luego debe decidir a quién asignarle la etiqueta, el criterio establece que debe cedérsela a quien haya cambiado mínimamente de posición en relación a la imagen anterior.

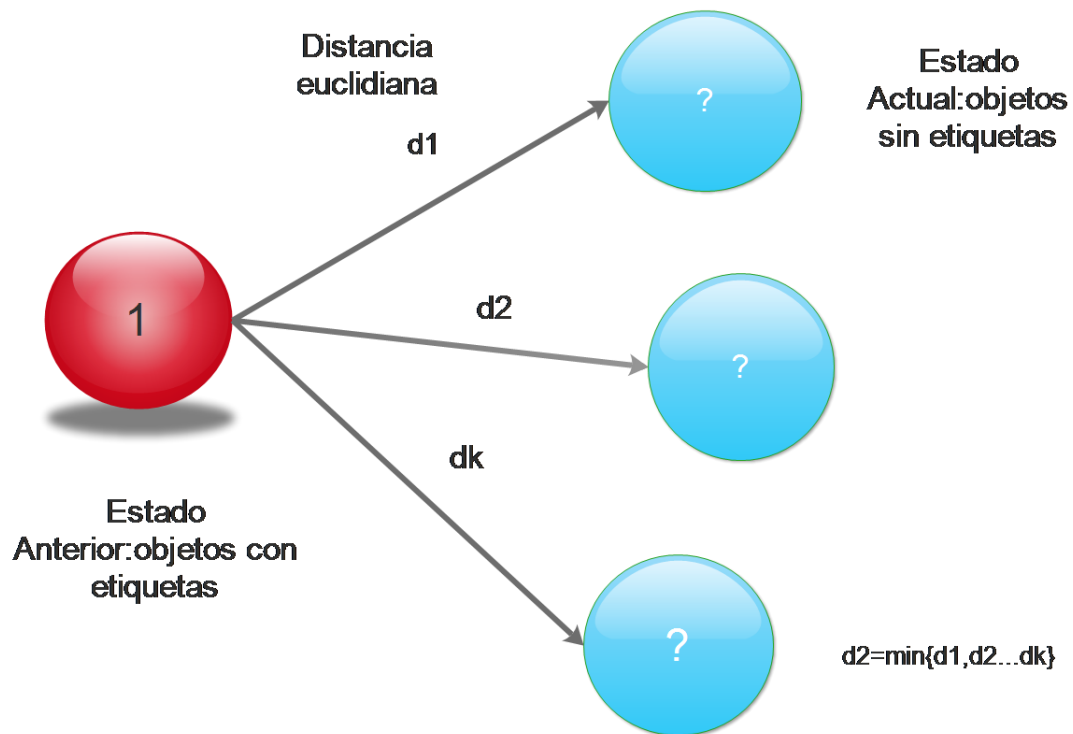


Figura 11: Criterio de mínima distancia

### 3.5 Resultados

Para calcular la rapidez de la partícula, se utiliza las posiciones en el *frame* t y en el *frame* t+1 y el tiempo que transcurrido entre estos *frames*, tal como se mencionó en la sesión 2.11.1, en la ecuación 24 .

De manera muy similar se calcula el coeficiente de correlación entre 8 puntos de la trayectoria, esto permite realizar una estimación de como es el comportamiento de los corpúsculos. El coeficiente de correlación se puede expresar mediante la siguiente ecuación:

$$r = \frac{\sum(x_i - \langle x \rangle)(y_i - \langle y \rangle)}{N\sigma_x\sigma_y}$$

**Ecuación 25**

El numerador es el producto de las desviaciones de los valores X e Y respecto de sus valores medios. En el denominador tenemos las desviaciones cuadráticas de X y de Y.

Para obtener el coeficiente de correlación se calcula primero el valor medio  $\langle x \rangle$  de la serie de datos X, y el valor medio  $\langle y \rangle$  de Y. Aquí no se calcula las desviaciones cuadráticas medias sino que se una expresión equivalente a la dada anteriormente para el coeficiente de correlación.

Calculo de parámetros morfológicos: En esta etapa, la información de cada contorno, como etiqueta, área y centro de masa, son pasadas a los algoritmos que realizan el análisis de partículas. Aquí, se calcula el área, volumen, perímetro, redondez y esfericidad. a partir de una elipse equivalente tal y como se mencionó en la sesión anterior. El área es calculada a partir de la siguiente expresión:

$$A = \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} g(i,j)$$

**Ecuación 26**

La ecuación tal, expresa el número de pixeles que contiene un contorno de una imagen binaria  $g(i,j)$

El perímetro  $P$  lo constituirá el número de pixeles exteriores al objeto y la compactibilidad viene dada por la expresión:

$$C = \frac{P^2}{A}$$

**Ecuación 27**

A partir de estos cálculos es obtenidos los diversos parámetros tales como volumen, perímetro, redondez y esfericidad, utilizando las ecuaciones 8, 9,10, 14, respectivamente, descritas en la sesión 1.3.

Las capturas realizadas para el experimento están basadas en 3 condiciones de ambientes, en escenas con iluminación a contraluz, así mismo como escenarios en iluminación ambiente, de partículas en movimiento, desde unas micras hasta los centímetros. Bajo estas tres condiciones los algoritmos son probados, a continuación se describen los pasos seguidos para las pruebas:

### **3.6 montaje y captura de escenas mediante el microscopio óptico**

Inicialmente se realiza el montaje de los diversos medios que contienen el material particulado, este se deposita en un porta objeto de vidrio para realizar la captura.

En la figura 11 se muestran algunas partículas orgánicas en movimiento, Esta

captura fue obtenida a partir de un microscopio óptico acoplado a una cámara(figura 8), estas escenas son de bajo contraste y baja calidad y el tipo de interacción y comportamiento de las partículas en este escenario es un poco complejo, causando algunos inconvenientes para el procesamiento de las imágenes, de lo cual se hablará con mayor detalle en el capítulo posterior. En estas escenas se aplicaron operaciones de preprocesamiento de las imágenes, tal como algunos filtros gaussianos para mejorar la calidad de la imagen, sin embargo no fueron suficientes para el método de detección de movimiento, ya que al realizar la segmentación muchos objetos no fueron detectados correctamente por tanto el seguimiento se realiza de manera incorrecta, además de las complejas interacciones entre las partículas, descartando el cálculo de morfología y cinemática de estas.

### 3.7 Montaje y captura de escenas con iluminación no controlada

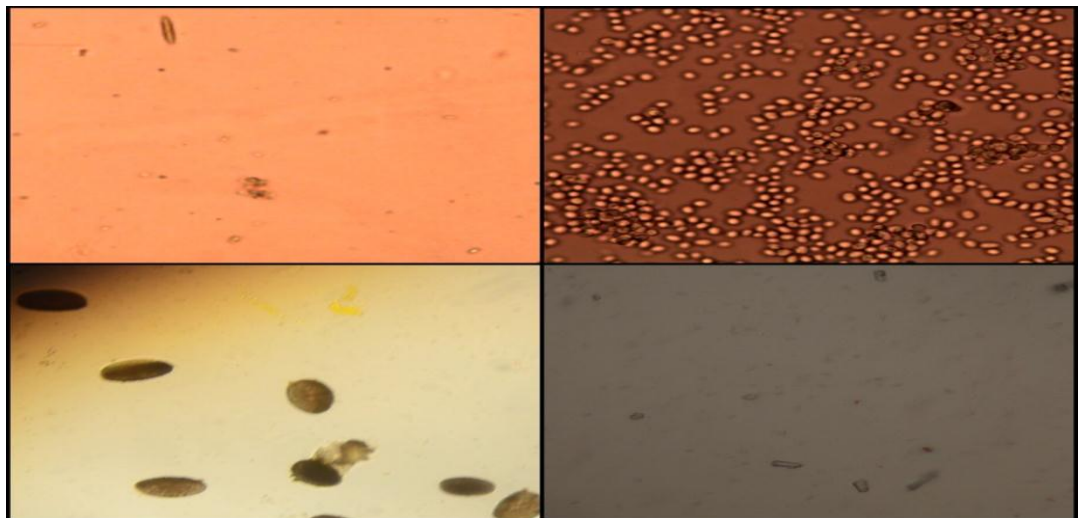


Figura 12: Partículas de origen orgánico

En este caso se tomó como muestra un grupo de partículas con movimiento propio que se desplazan sobre un plano en el cual la iluminación cambia durante el tiempo, como se mencionó anteriormente se usó una cámara de alta definición en la figura 12 se muestra corpúsculos en movimiento. Aquí, los principales

inconvenientes son los cambios de iluminación y las sombras que presentan los objetos de interés en la escena, en este caso, se aplican operaciones morfológicas (de dilatación y erosión ) después de realizar la detección de movimiento mediante mezclas gaussianas. Para este caso, no se consideró la altura en la cual está ubicada la cámara y para el proceso de calibración del sistema se utilizó el tamaño promedio de este tipo de partícula (hormigas), con la finalidad de estimar la cinemática.



Figura 13 : Partículas con movimiento propio.

### **3.8 Montaje y captura de escenas con iluminación controlada**

Por otro lado se trabajó con partículas inertes con formas irregulares. Para obtener imágenes de alto contraste se diseñó e implementó un contenedor de madera en el cual la superficie traslucida es iluminada a contraluz por medio de LED's (figura 13 ), en el cual se depositan los corpúsculos en agua donde es agitada por tubos por donde fluye el liquido con mayor presión generando el movimiento de los objetos (figura 14, arriba-izquierda), al igual que en el caso anterior se usó una cámara de alta definición como ya se discutió previamente . El resultado, son imágenes de alto contraste (figura 14), estos videos son almacenados en la memoria del computador para posteriormente realizar el análisis y seguimiento.



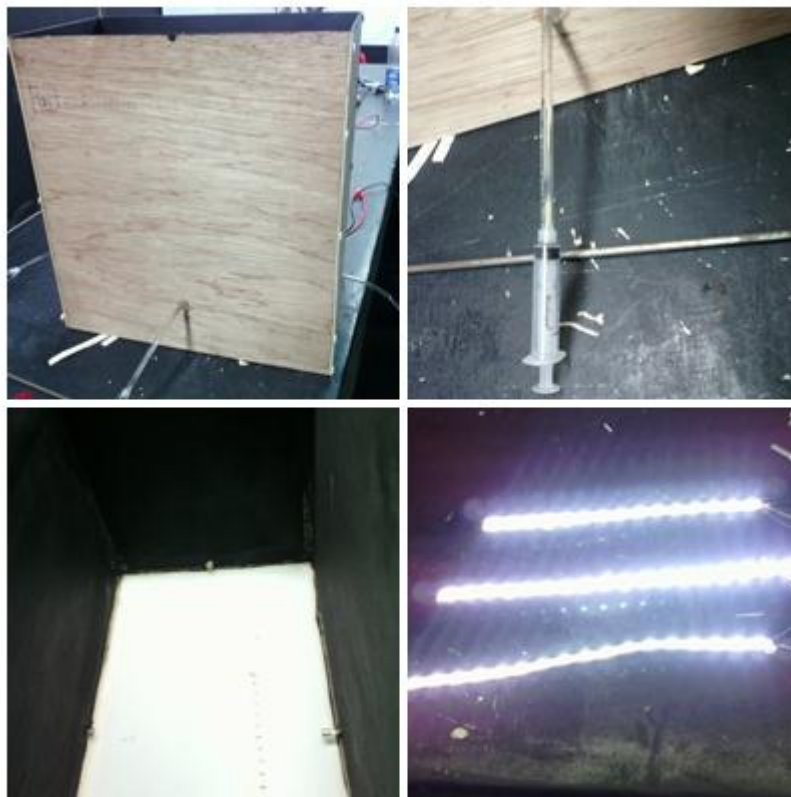
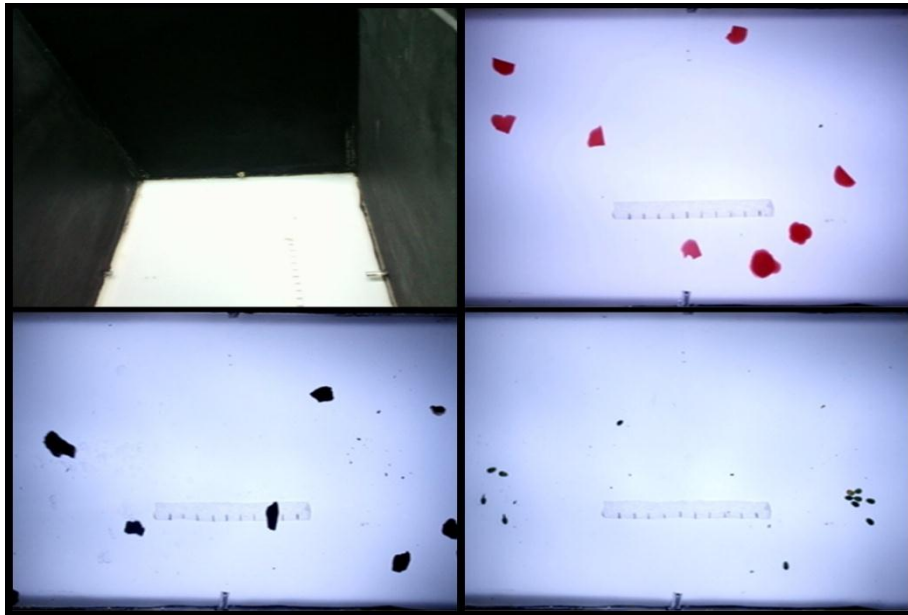


Figura 14: ambiente estructurado de iluminación

En las partículas de la figura 14 (arriba-derecha, abajo izquierda y abajo derecha) se utilizan los siguientes métodos: Detección de movimiento ,seguimiento de objetos de interés, trazado de trayectorias ,calculo de rapidez y coeficiente de correlación y calculo individual de parámetros morfológicos.

La detección de movimiento y cuyos resultados son exitosos, el uso de operaciones morfológicas no es necesario, dada la calidad de las imágenes y el alto contraste, que permite obtener contornos iguales a los de las imágenes originales, además las interacciones entre las partículas, permiten configurar el *tracking* de manera que las etiquetas puedan mantenerse sin inconvenientes (salvo en algunos casos).



**Figura 15: Imágenes de alto contraste. Arriba-izquierda, contenedor. Arriba-derecha, partículas inertes en movimiento. Abajo-izquierda, partículas inertes en movimiento. Abajo-derecha, partículas inertes en movimiento**

Para el caso de las partículas pequeñas con forma regular (figura 14, abajo-derecha) no se conto con éxito puesto que existe una tendencia a unirse entre estas. Se realizaron pruebas con partículas que poseen propiedades de alta porosidad y con poca densidad, para los cuales hay una fuerza de atracción que mantiene unidas a estas (figura14, abajo-izquierda), este comportamiento es complejo para los algoritmos de seguimiento. Por tal razón no se contó con buenos resultados para el análisis y seguimiento de este tipo de materiales.

En esta etapa del procesamiento, se realiza una calibración del sistema, utilizando una reglilla la cual tiene una distancia de un centímetro (figura 15), y contando la cantidad de pixeles en una dirección que hay en este valor, con la finalidad de realizar una conversión de unidades al sistema internacional de medidas, la altura de la cámara no se contó, ni el campo de visión de esta, ya que con la reglilla se realiza la conversión a pixeles y viceversa .

La reglilla tiene 1cm, este valor es equivalente a 37 pixeles, a partir de lo cual se puede realizar las conversiones pertinentes.



**Figura 16:** reglilla de 1cm

## 4. Resultados y Análisis

### 4.1 Adquisición de vídeo adquirido para el análisis

Los algoritmos desarrollados, pueden adquirir vídeos desde una cámara conectada a una computadora, o desde un archivo de vídeo almacenado en el disco duro de este. El tamaño de las imágenes que conforman el vídeo, pueden tener cualquier dimensión, pero los algoritmos deben ser calibrados de acuerdo al campo de visión de la cámara y el *frame rate* de esta, si se desea realizar contar con precisión con el análisis de partículas.

Para la prueba y calibración del programa, se utilizaron vídeos grabados en ambientes estructurados, es decir, escenarios iluminados controladamente; aislados del ruido que pueden afectar su precisión, como también se pusieron en prueba vídeos en ambientes no estructurados, bajo iluminación cambiante o iluminación no controlada.

### 4.2 Iluminación

El análisis y seguimiento de partículas se realizó en ambientes controlados de iluminación, como también bajo iluminación no controlada. Para el primer caso, se utilizó iluminación a contraluz, como ya se había descrito en el capítulo 2, la fuente de luz está ubicada debajo los objetos de interés, esta ubicación permite obtener un elevado contraste distinguiendo fácilmente las partículas del fondo con mayor nitidez, este procedimiento es fundamental, pues facilita el funcionamiento de los algoritmos de detección. El montaje de este tipo de iluminación se logró utilizando luz LED debajo de una superficie blanca translúcida (ver figura 13)

Por otro lado el análisis también se realizó bajo iluminación no controlada; es

decir, bajo luz natural. Aquí los principales inconvenientes que dificultan un correcto funcionamiento de los algoritmos; son los cambios de iluminación y la direccionalidad de la fuente de luz, lo que genera sombras y que los objetos se confundan con parte del fondo.

### **4.3 Detección de movimiento**

Los algoritmos de detección de movimiento se diseñaron de tal manera que permiten elegir el entorno de acuerdo a la iluminación. Para el caso de la iluminación controlada, estos reciben inicialmente el fondo y posteriormente realizan la separación del primer plano del fondo.

La detección de movimiento se realizó mediante la técnica MOG, como ya se mencionó en el capítulo anterior, este método se basa en un enfoque probabilístico y estadístico asumiendo que los objetos que forman parte del fondo se ven por mucho más tiempo que los del primer plano y además sus colores pueden ser modelados por una distribución gaussiana[10]. La historia de actualización esta en un rango de 100 y 200 y para las gaussianas se usaron valores se entre 5 y 7 mezclas gaussianas, como también 10, aunque, utiliza un alto costo computacional y no es conveniente para un óptimo procesamiento.

#### **4.3.1 Detección de movimiento en escenas con luz no controlada**

Al realizar la detección de movimiento para imágenes en iluminación no controlada (figura 12), el principal inconveniente es la segmentación incorrecta, esto es debido a que los niveles de gris de los píxeles que conforman la región en movimiento son similares a los del fondo, la diferencia tiende a ser nula. Esto conlleva a generar regiones no conexas de las zonas negras (figura 17) y como resultado se tiene una alteración en la medición del tamaño y forma de los corpúsculos. En la tabla 1 se muestra el error relativo para una secuencia de

*frames* de una escena tal como en la figura 12. Como se detalla en las tablas en algunos *frames* existe un número mayor de objetos detectados que los objetos reales en la escena.

Para solucionar este problema, se aplican operaciones morfológicas, en la figura 18, se observa el resultado de este algoritmo. Se puede detallar que los objetos de interés conforman regiones conexas (regiones negras). El problema de la aplicación de estas operaciones de dilatación y erosión, es el aumento de área en las regiones segmentadas y esto tiene consecuencias nefastas en los resultados del análisis de tamaño y morfología de las partículas. Por otro lado el estudio de la cinemática es exitoso, lo cual se hablará más adelante con mayor detalle.

En la tabla 2 se muestra el error relativo una vez se han aplicado operaciones morfológicas en varios videos en el escenario de la figura 12, como se muestra, se ha calculado, el error relativo y el porcentaje de error es mínimo (por debajo de 0,04) si se compara con los datos de la tabla 1, cuyo error relativo está por encima de 0,1. Por consiguiente, se evidencia una mejor detección y corrección de la segmentación. El número de objetos detectados respecto del número de objetos reales en la escena varía ligeramente en la tabla 2, esto se puede evidenciar en la imagen segmentada como se muestra en la figura 18.

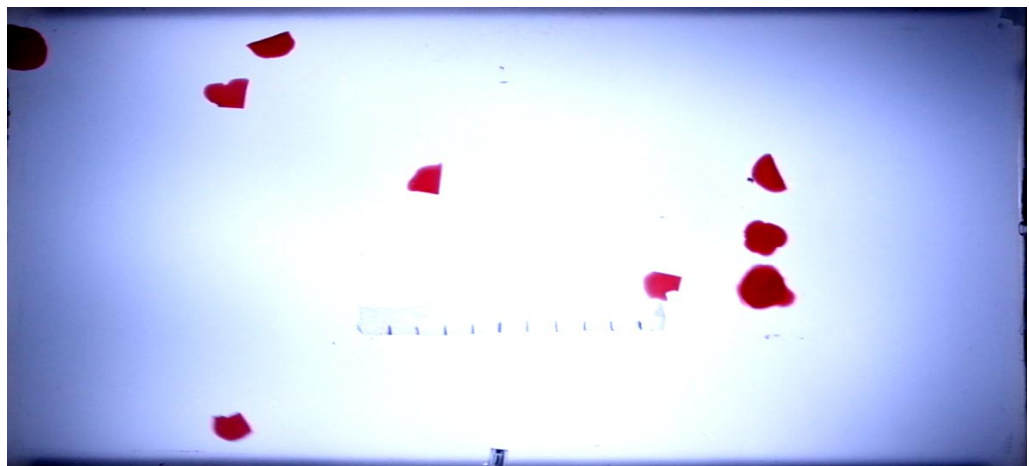


Figura 17: Escena iluminada a contraluz

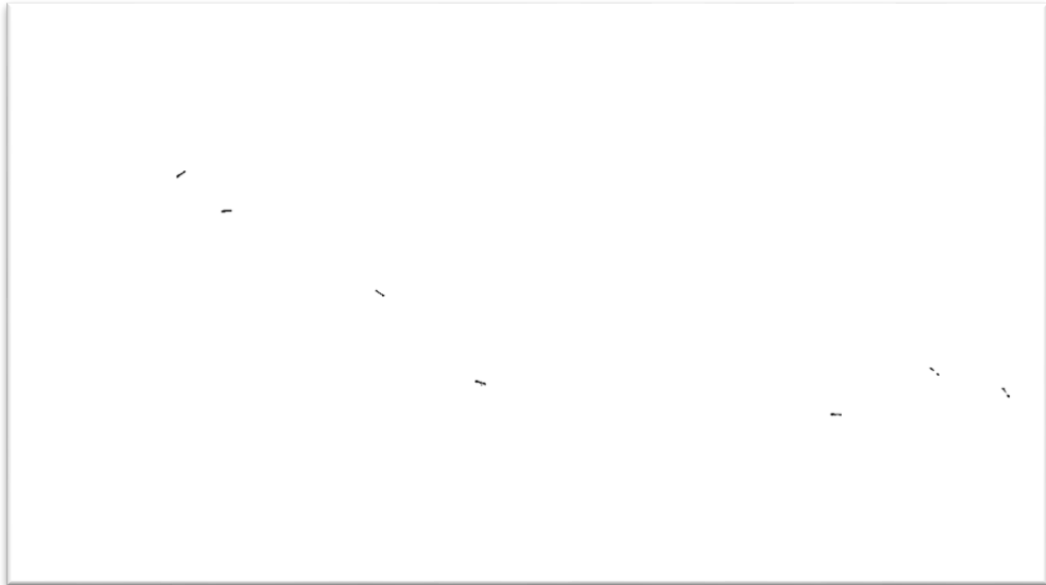


Figura 18: Segmentación inadecuada

Vídeo	Número de objetos reales	Promedio de objetos detectados en cada video	Error relativo
1	3	4,0	0,33
2	3	4,0	0,40
3	3	3,8	0,27
4	3	4,0	0,33
5	3	3,6	0,20
6	3	4,6	4,60

Tabla 1: Número de objetos en relación al número de objetos detectados, sin aplicar operaciones morfológicas



Figura 19: Aplicación de operaciones morfológica

Vídeo	Número de real de objetos	Promedio de objetos detectados en cada Vídeo	Error relativo	Porcentaje de error
1	3	3,04	0,01	1,43
2	4	4	0,00	0
3	7	7,09	0,01	1,37
4	9	9	0,00	0
5	11	10,63	0,03	3,32
6	13	12,55	0,03	3,47

Tabla 2: Número de objetos en relación al número de objetos detectados, una vez se han aplicado operaciones morfológicas

#### 4.3.2 Detección de movimiento en escenas con luz controlada

Por otro lado, cuando se trabaja en condiciones controladas de iluminación, la detección de movimiento se realiza de forma más fácil, los algoritmos entregan una buena segmentación. A continuación se muestran los resultados obtenidos con iluminación constante. Para este caso se utilizaron partículas con forma



irregular flotando en agua depositadas en una caja cuya superficie está iluminada a contraluz por LED's, con el fin de obtener un alto contraste.

La tabla 3 muestra la detección de objetos y el error relativo entre el número real de objetos y los objetos detectados por los algoritmos de segmentación en escenas tales como en la figura 20. En estas escenas no es dispendioso el uso de operaciones morfológicas, como lo muestra la tabla, el error relativo es del inferior a 0,03. Lo cual evidencia que la detección es exitosa bajo condiciones controladas de iluminación. En algunas situaciones se detecta objetos que no corresponden a objetos de interés, estas detecciones son consideradas como ruido, de lo cual se hablará más adelante.

En la figura 20 se muestra un conjunto de partículas irregulares que se mueven de manera aleatoria, bajo la influencia de la fuerza de arrastre del fluido (agua). Inicialmente el algoritmo

Vídeo	Número real de objetos	Objetos detectados	Error relativo
1	9	9,24	0,03
2	9	8,97	0,01
3	9	9,25	0,03
4	9	9,00	0,00
5	9	9,21	0,02
6	9	9,00	0,00

**Tabla 3: número de objetos reales en relación al número de objetos detectados, sin aplicación de operaciones morfológicas**

MOG necesita modelar un fondo (figura 19), el cual es pasado a este, para posteriormente realizar la segmentación como se muestra en a figura 21. El resultado es una imagen binaria (píxeles negros tienen un valor de 0 y píxeles blancos tienen un valor 1) la cual se caracteriza por no tener pérdidas de información. Es decir todos los elementos de la imagen tienen regiones conexas.

Esto es importante, pues para garantizar la precisión en las medidas para el análisis es indispensable contar con una buena segmentación, en la que los contornos y el área de las partículas, no sean alterados, además que no es necesario la aplicación de operaciones morfológicas que puedan comprometer la forma y el tamaño, a diferencia de lo que se observó para iluminación no controlada.



**Figura 20: Fondo de la escena**



**Figura 21: Movimiento aleatorio de partículas**



Figura 22 Imagen segmentada.

Un elemento detectado por los algoritmos es el movimiento del fluido, que para el interés de este trabajo se considera como ruido, en la figura 22, se puede observar. Este se encuentra en los bordes de la escena, para eliminar esto se utilizó una máscara. Para posteriormente realizar el tracking y las mediciones sin que haya asignaciones incorrectas de etiquetas y seguimiento de objetos no deseados. Sin embargo algunos de estos elementos que no corresponden a partículas siguen sin ser filtrados, para lo cual se excluirán más adelante por el algoritmo de tracking con un criterio de área.

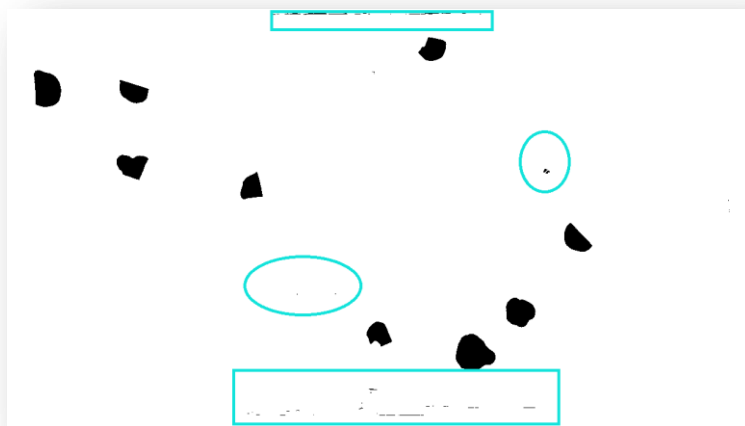


Figura 23: Ruido debido al movimiento del fluido.

### 4.3.3 Detección de movimiento de escenas obtenidas mediante el microscopio óptico.

Dado que las imágenes obtenidas mediante el microscopio óptico tienen mucho ruido debido a la baja calidad de las imágenes y al medio en el que éstas se encuentran, no se obtuvo el éxito deseado para la segmentación y posterior seguimiento de objetos de interés, en la figura 23 se observan corpúsculos con forma regular la segmentación no es la adecuada, pues se observa que no se generan regiones conexas en algunos de los contornos presentes en la imagen.

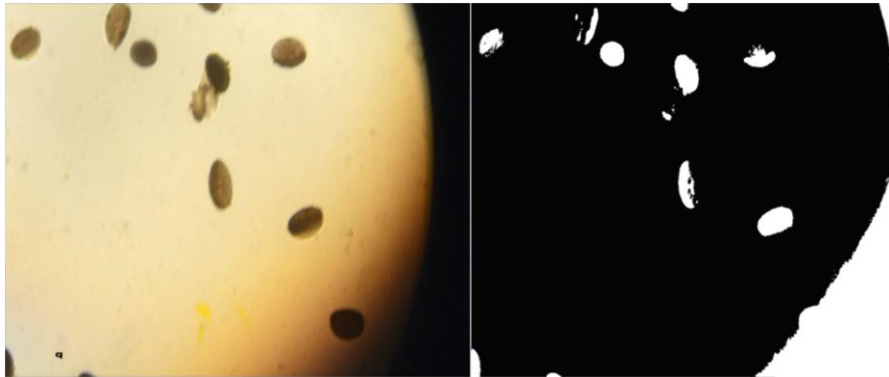


Figura 24: Lado izquierdo imagen original. Lado derecho imagen segmentada.

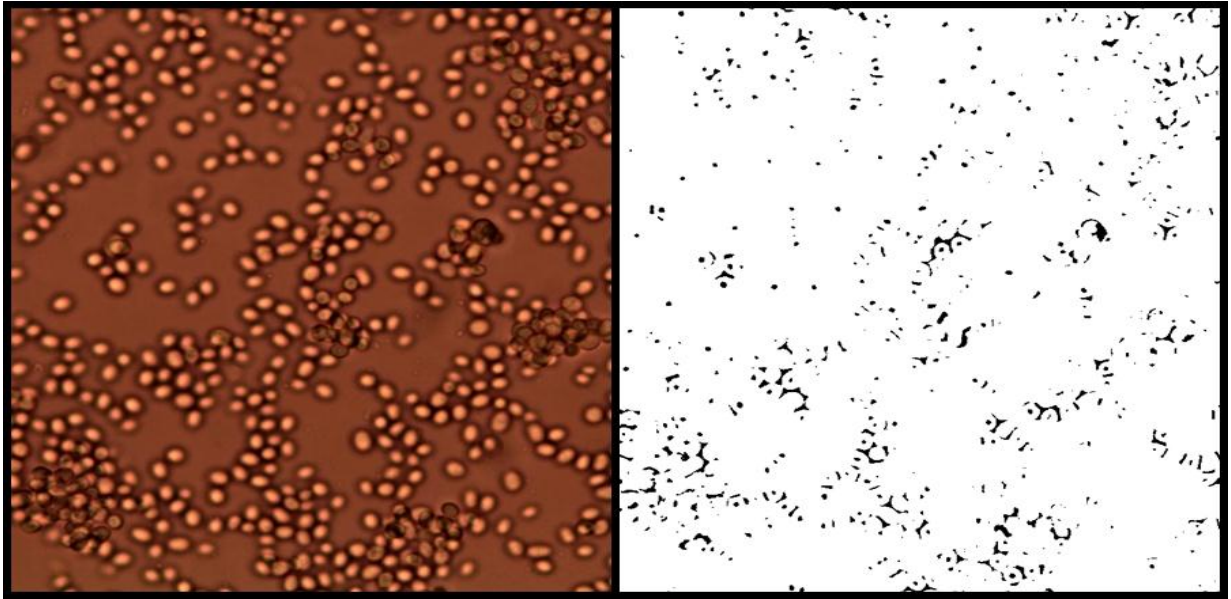
En la figura 23 (lado izquierdo) se observa la detección de movimiento de la figura 21(lado derecho), algunos contornos se caracterizan por ser regiones conexas, mientras otras se separan en varios contornos dado que algunas partes pueden confundirse con el fondo o no son detectados cuando esta cerca a la región oscura del lado izquierdo de la figura 23(derecha), esto es indeseable para la realización del *tracking*. En la figura 24 (izquierda) se observa que permanecen unidas, éstas presentan un movimiento browniano, este tipo de comportamientos es imposible estudiarlo mediante los algoritmos de visión artificial, debido a su compleja interacción, en la figura 24 (derecha) se observa la imagen segmentada, la detección de movimiento en este caso no es la adecuada convirtiéndose en un obstáculo para el seguimiento de cada objeto de interés.

En la tabla 4 se muestran los resultados de la detección.

Vídeo	Número de objetos reales	Número de objetos detectados	Error relativo
1	11	45	3,1
2	11	57	4,2
3	11	60	4,5
4	10	61	5,1
5	10	73	6,3
6	10	67	5,7

**Tabla 4: detección de movimiento en escenas obtenidas mediante el microscopio óptico en relación al número real de objetos en la escena**

Como se muestra en esta tabla, el número de objetos detectados es considerablemente mayor al número de objetos reales en la escena, así mismo el error relativo es mayor a 3. Lo que significa que la segmentación falla (generando contornos que no existen en la escena, o dividiendo las partículas en pequeños trozos) debido al bajo contraste de las escenas y la pobre iluminación que ofrece el microscopio óptico.



**Figura 25: Izquierda: Imagen sin procesamiento. Derecha: Segmentación del movimiento browniano**

Otro tipo de partículas con movimiento propio que se estudió en este trabajo, se muestra en la figura 25 (Izquierda) se observan corpúsculos que son arrastrados por el medio presente (agua), al igual que existen elementos que se mueven a través de este medio. Uno de los principales inconvenientes de este experimento es el bajo contraste y además que los elementos son confundidos, convirtiéndose en parte del fondo para los algoritmos de detección de movimiento, adicionalmente cuando los objetos salen del foco de la lente del microscopio óptico, en la imagen segmentada (figura 25, derecha), estos objetos inmediatamente desaparecen. Por otro lado, los algoritmos de detección de movimiento, se enfrentan al ruido presente en la imagen, como ya se ha mencionado es difícil filtrar este tipo de ruidos sin afectar la información que se desea extraer de los objetos de interés

Como se muestra en la figura 25, de 5 objetos en movimiento son detectados 1, lo cual es un resultado insuficiente y este experimento se descarto para realizar cualquier tipo de análisis

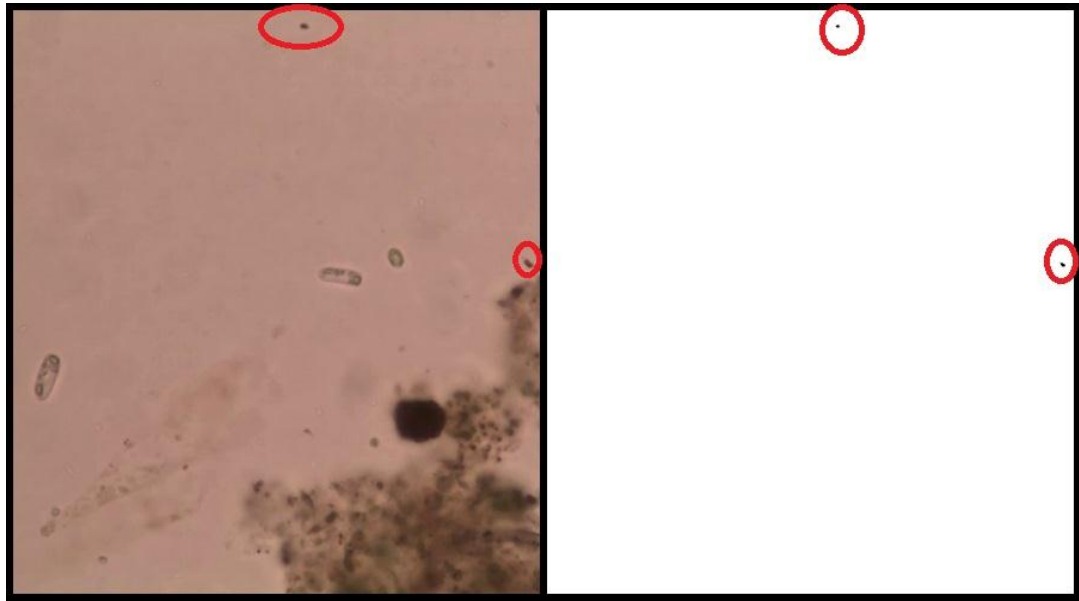


Figura 26 Izquierda: imagen sin procesamiento. Derecha: Segmentación respectiva.

En conclusión, las imágenes obtenidas mediante el microscopio óptico de baja resolución, no son adecuadas para utilizar algoritmos de detección de movimiento ni mucho menos realizar algún tipo de análisis.

#### 4.4 Seguimiento de partículas.

El *tracking* o seguimiento de objetos de interés. Es una de las tareas más complejas en la visión artificial, debido a las interacciones de las partículas u objetos de interés, como colisiones, oclusión y agrupamiento.

Para este trabajo se considero; El agrupamiento y separación de partículas en movimiento, así como colisiones En la figura tal se observan partículas agrupadas.



Figura 27: Lado izquierdo: Escena iluminación no controlada. Lado derecho: Escena con iluminación controlada

El seguimiento o *tracking* de partículas, se realizó bajo dos condiciones de iluminación: controlada y no controlada. En la figura 26 (izquierda) muestra partículas con forma regular en un ambiente no estructurado, es decir iluminación variable. La figura 24 (derecha) muestra partículas con forma irregular en un ambiente estructurado, diseñado para tener una iluminación constante de alto contraste.

#### 4.4.1 seguimiento de partículas regulares en iluminación no controlada.

Para este experimento se utilizaron partículas con forma regular con movimiento propio en un ambiente no estructura (figura 27). Estas llegan a la escena e inmediatamente son seguidas por el algoritmo de *tracking* que asigna una etiqueta de acuerdo al orden de entrada, así mismo, almacenando sus características en un vector.





**Figura 28: Seguimiento de partículas en condiciones de iluminación no controlada.**

Un elemento importante para obtener un óptimo seguimiento de los objetos de interés, es una adecuada segmentación, en la que se generen regiones conexas (de los objetos de interés), si ocurre que el contorno se separa por una segmentación no adecuada, los algoritmos detectan esto como si fuese la entrada de una nueva partícula o la separación, asignando una nueva etiqueta a una de las dos regiones que se ha separado (ver figura 28 arriba).

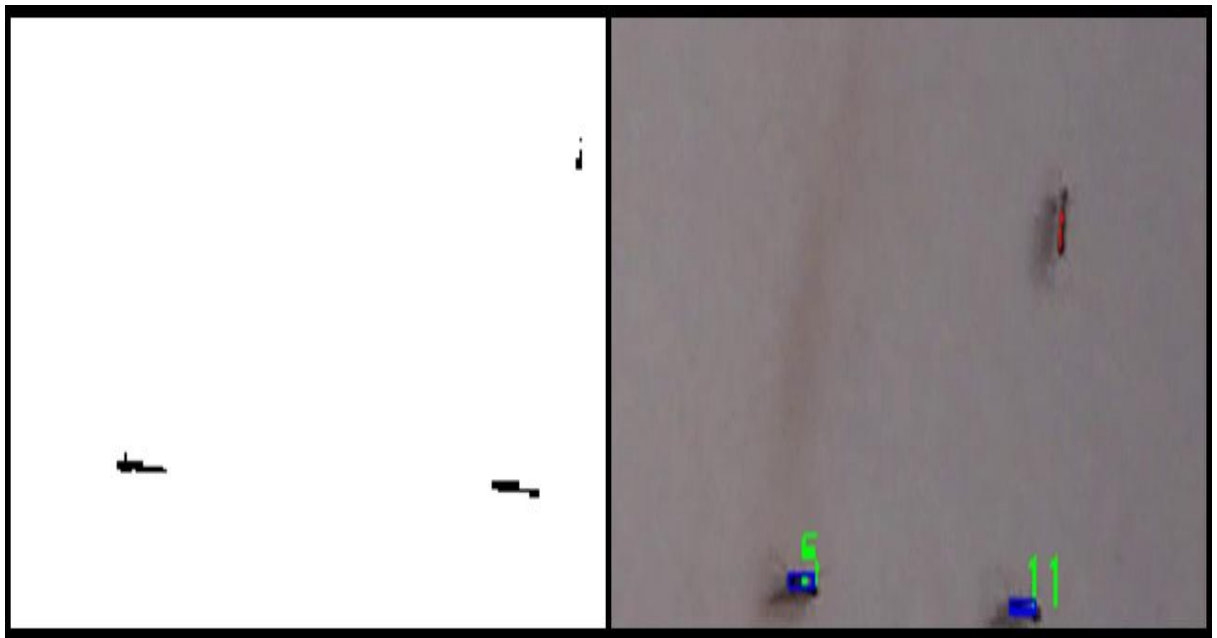


Figura 29: Izquierda: segmentación incompleta. : *Tracking* incorrecto debido a la mala segmentación



Figura 30: Izquierda: Segmentación aplicando operaciones morfológicas. Derecha: *Tracking* correcto.

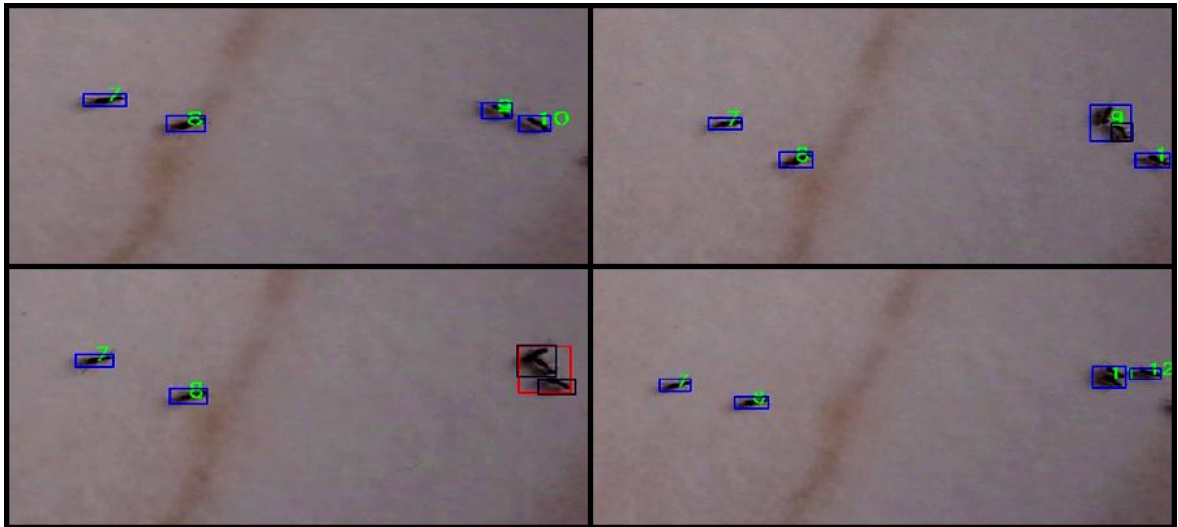
Después de tener la adecuada segmentación se realiza un filtrado de la escena en la que eliminan objetos que fueron detectados como movimiento. Este filtro se realiza mediante sus áreas. Para este caso, se trabajó objetos que tenían áreas en

píxeles entre los 10 y 500 fuera de este rango no se consideraron como partículas de interés, este valor puede adaptarse de acuerdo al tipo de vídeo y el tamaño de los objetos de interés. En el vídeo una vez se realiza la segmentación de la imagen, el único movimiento detectado por los algoritmos, son los corpúsculos.

La segmentación junto con las operaciones morfológicas pertinentes, generan regiones conexas, en las que el *tracking* no produce nuevas etiquetas o malas asignaciones de estas por separación de contornos tal como se muestra en la figura. 29.

La interacción entre las partículas no permite realizar un seguimiento correcto, pues cuando estos se unen y se separan, se generan nuevas etiquetas haciendo una asignación de forma aleatoria, tal como se muestra en la figura 30 (Arriba-izquierda), las partículas son seguidas correctamente, en este experimento las hormigas entran y salen de la escena desde varias direcciones, en la imagen, han salido del cuadro los objetos numerados con 1 y 2, así como ingresan nuevos objetos a la escena los cuales se les asigna un rotulo de acuerdo al orden de entrada. En la figura 28 (Arriba-derecha), se aprecian varios objetos que colisionan, esta unión no permite el correcto funcionamiento de los algoritmos de seguimiento. En la figura 30 (Abajo-derecha) se observa que los objetos se han separado y la etiquetas 9 y 10 ahora son 11 y 12.

En la tabla, se muestra la relación entre número de objetos seguidos y el número de objetos reales en la escena. Aquí, las partículas han colisionado en algunas escenas, generando más etiquetas o en otros casos, un número menor de etiquetas, debido a las interacciones.



**Figura 31:** Arriba-izquierda: Seguimiento de objetos de interés en el frame n. Arriba-derecha: Interacción de objetos de interés. Abajo-izquierda: Pérdida de etiquetas en el frame n+1. Abajo-derecha: Asignación de etiquetas de manera aleatoria después de la separación de las partículas.

En esta situación se resolvió este inconveniente de solapamiento y agrupamiento, interviniendo la imagen binaria, separando los objetos de interés en la segmentación (ver sesión anterior), es decir, cuando dos o más contornos se unen generando un área mayor al promedio de las áreas respecto a estas regiones regulares. Los algoritmos pueden separar estas uniones tal como se muestra en la figura 31, aquí se observa cómo, a partir de dos contornos unidos se separan dividiendo el contorno en dos unidades. Como se ve, esta información es manipulada por el algoritmo de manera que en ese instante de agrupamiento los valores del tamaño y forma van a cambiar considerablemente, pero por otro lado no es relevante, pues el interés en este procedimiento es no perder la etiqueta asignada por el algoritmo y mantener la información de la cinemática de la partícula.

En tabla 5 se muestra los objetos seguidos y el error relativo

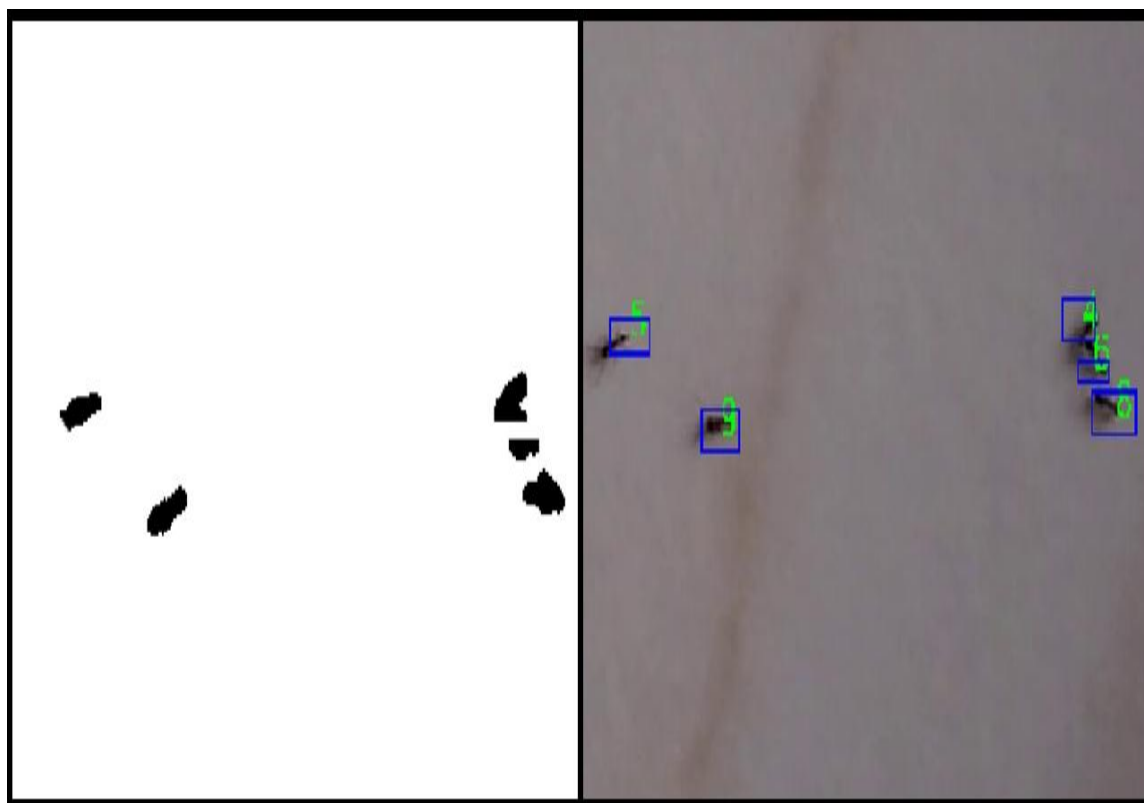


Figura 32: Izquierda: Separación de contornos, derecha: Asignación de etiquetas correctamente

Vídeo	Número real de objetos	Número de etiquetas generadas	error relativo
1	3	3	0,00
2	5	5	0,00
3	8	8	0,00
4	13	12	0,07
5	10	15	0,50
6	12	12	0,00

Tabla 5: relación entre el número de objetos seguidos y número de etiquetas generadas en la escena.

Como se observa en la tabla anterior, el número de etiquetas generadas es igual al número de objetos reales en la escena, salvo en los videos 4 y 5 se ve una pequeña diferencia, esto significa que la detección y conteo una vez realizado el seguimiento es optima. Hay que destacar que el número de objetos detectados en

la tabla 4 son los objetos que serán seguidos y por consiguiente etiquetados tal como se muestra en la tabla 5.

#### **4.4.2 seguimiento de partículas irregulares en condiciones de iluminación controlada.**

Se realizó el seguimiento a partículas irregulares, las cuales como ya se había mencionado, flotan en agua y este medio es perturbado por una fuerza que genera un arrastre.

Este seguimiento tuvo un resultado exitoso cuando la aceleración de las partículas es relativamente pequeña. De manera que no hay asignación de etiquetas de manera incorrecta.

Los principales inconvenientes que impiden el correcto funcionamiento de los algoritmos de seguimiento son:

- cambios grandes de posición por unidad de tiempo.
- colisiones y/o unión de las partículas

Cuando una partícula presenta grandes cambios en su velocidad, el algoritmo de seguimiento no funciona correctamente asignando nuevas etiquetas o de manera aleatoria a esta, debido a que la técnica de *tracking* usa un criterio de mínima distancia como se mencionó anteriormente. Cuando hay un cambio en la velocidad relativamente grande, (respecto del movimiento de partículas que se mueven con velocidades similares entre estas) se genera un cambio considerable en la distancia que recorre el objeto de un *frame* a otro, esto es interpretado por el sistema como un nuevo objeto, puesto que no cumple con la distancia promedio a la que cada objeto se moverá de *frame* a *frame*, como es mostrado en la figura tal, por tanto este criterio falla y no es conveniente para partículas con aceleración grandes una respecto de la otra. Una solución a este problema es realizar *tracking* mediante el filtro de Kalman, que es una técnica que predice el movimiento de la

partícula. Pero por costos computacionales no se implementó en el desarrollo del algoritmo y del presente trabajo. de manera que se consideró un seguimiento de partículas irregulares con diferentes tamaños y con aceleraciones pequeñas respecto de un grupo en la escena, En la tabla 6 se muestra el número de objetos seguidos con respecto al número de objetos reales en la escena, como lo muestran los valores, el error relativo es mayor a uno, lo que indica que los valores del seguimiento esta alejados de los valores reales y se evidencia en la cantidad mayor de etiquetas generadas respecto al número real de objetos.

Vídeo	número real de objetos	número de etiquetas	error relativo
1	9	25	1,78
2	9	45	4,00
3	9	11	0,22
4	9	42	3,67
5	9	10	0,11
6	9	21	1,33

Tabla 6: Número real de objetos respecto al número de objetos seguidos

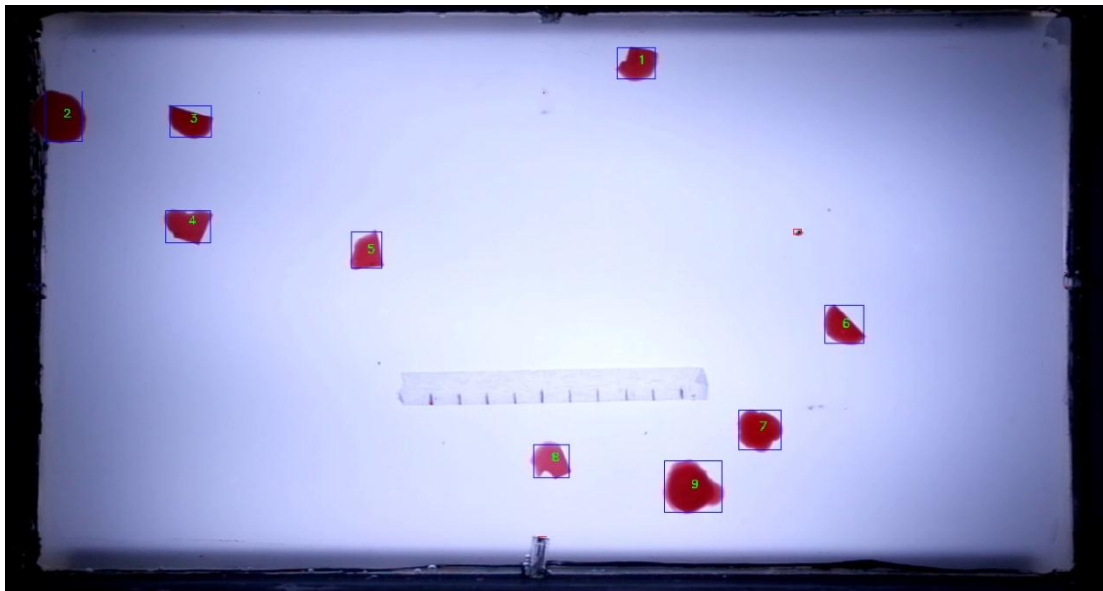


Figura 33: Seguimiento de partículas en condiciones controladas de iluminación.

Las interacciones de las partículas como colisiones y agrupamiento, impiden realizar el *tracking* correctamente, este problema es solucionado cortando los contornos en la segmentación cuando estos se unen (figura 31). Para este caso los algoritmos inicialmente almacenan en un vector el área de cada objeto, posteriormente se hace una comparación considerando las posibles combinaciones entre las partículas, así, es posible separar y determinar el número de partículas que han interactuado en cada *frame*, separando los contornos de acuerdo a la unión y posible combinación ( figura 33), de esta manera, es posible mantener las etiquetas de cada objeto de interés, pero la información de los contornos cortados es manipulada de manera que en ese *frame* la información de este no será de utilidad.

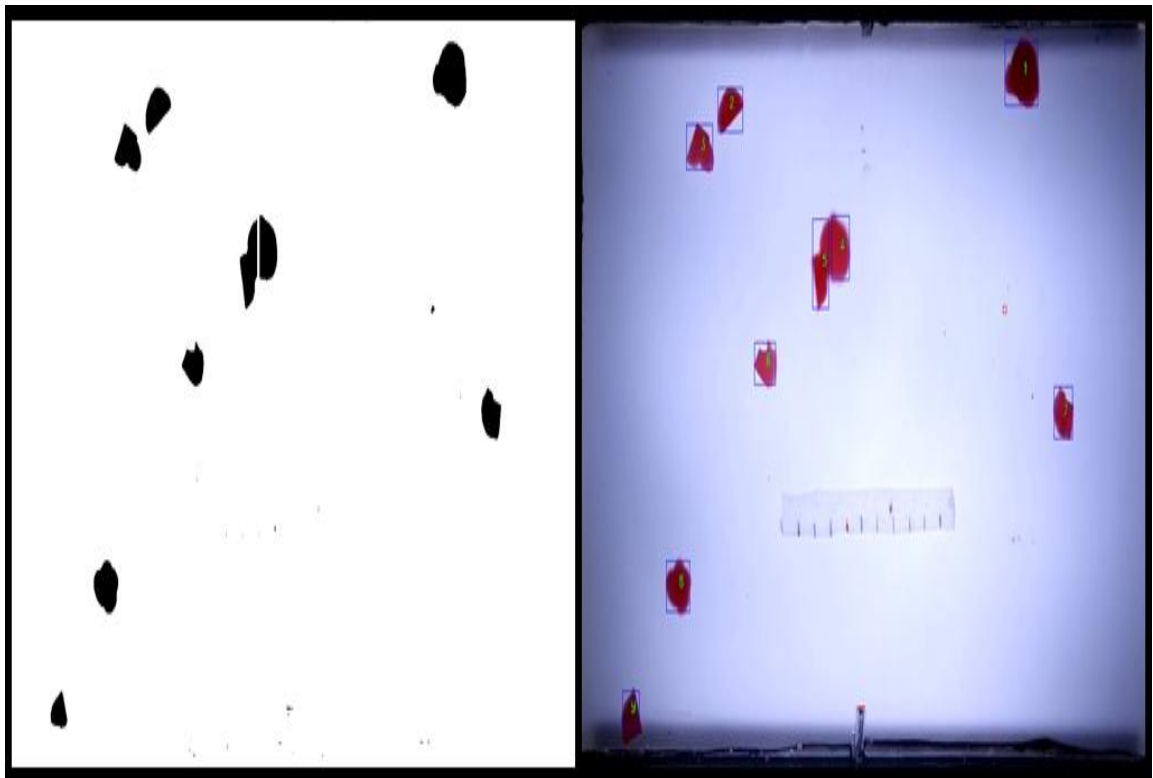


Figura 34: izquierda: separación de contornos, derecha: *tracking* correcto.

El algoritmo de *tracking* permite configurar la opción para el filtrado de objetos con



determinadas áreas. En estas escenas, las partículas con áreas en píxeles entre 500 y 5000 fueron seguidas, contornos que no cumplieron con este criterio fueron rechazados por el algoritmo de *tracking*, el movimiento o la agitación del fluido es uno de los casos en que el algoritmo lo rechaza y lo considera como ruido. Por tanto en algunas situaciones no importa si en la etapa de detección de movimiento no se filtran ruidos u objetos no correspondientes a los de interés, estos serán descartados en la etapa de seguimiento. Este filtrado permite trabajar con diversos tamaños de partículas y rechazar objetos no deseados para la realización del análisis, ya que cada objeto es individualizado para su caracterización.

#### **4.6 Tipos de partículas**

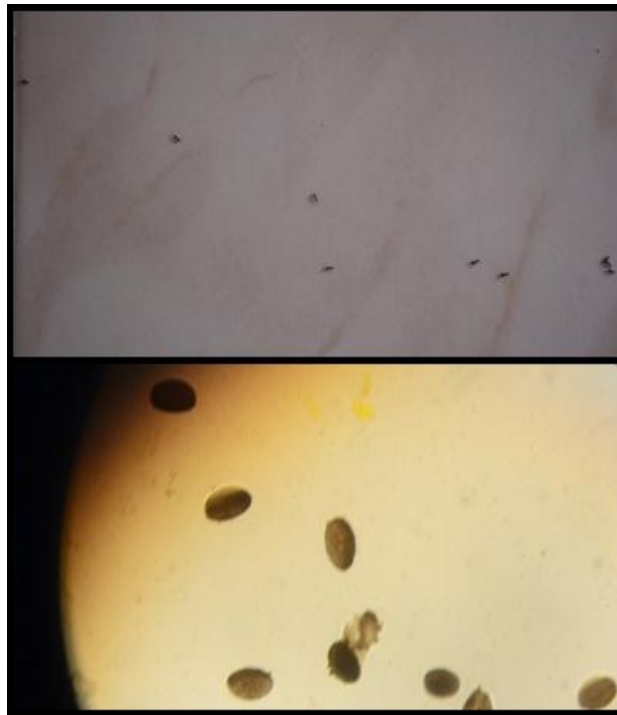
En el desarrollo de este trabajo se utilizaron diversas partículas con formas regulares e irregulares en diversos medios e iluminaciones, con el fin de comprobar los algoritmos y sus limitaciones. En algunas situaciones el factor que impide a los algoritmos funcionar correctamente son básicamente; las interacciones entre partículas la calidad de las imágenes. A continuación se describen algunos tipos de partículas que se usaron como prueba.

##### **4.6.1 Partículas con forma regular.**

Se usaron partículas orgánicas como hormigas, levadura, espermatozoides, esporas y semillas (figuras 35, figura 36 y figura 37 respectivamente) con características morfológicas similares entre ellas.

El estudio del movimiento browniano de la levadura, es difícil para los algoritmos que detectan movimiento, debido a las interacciones de las partículas y a su tendencia a formar cúmulos. Las esporas fueron objeto de estudio, dada la baja calidad de las imágenes, no resulto fiable para el análisis, solucionando esto, se tendría un análisis completo del tamaño y morfología de estas.

En la figura 32, se observa un grupo de Hormigas cuyas trayectorias están marcadas por un color, el cual es función de la velocidad que esta lleve. Se puede detallar, que la velocidad de los insectos tiene un patrón en común, solo en algunos puntos cambian su rapidez individual. Este análisis del movimiento puede describir el comportamiento de estas, con su habita y su interacción con este.



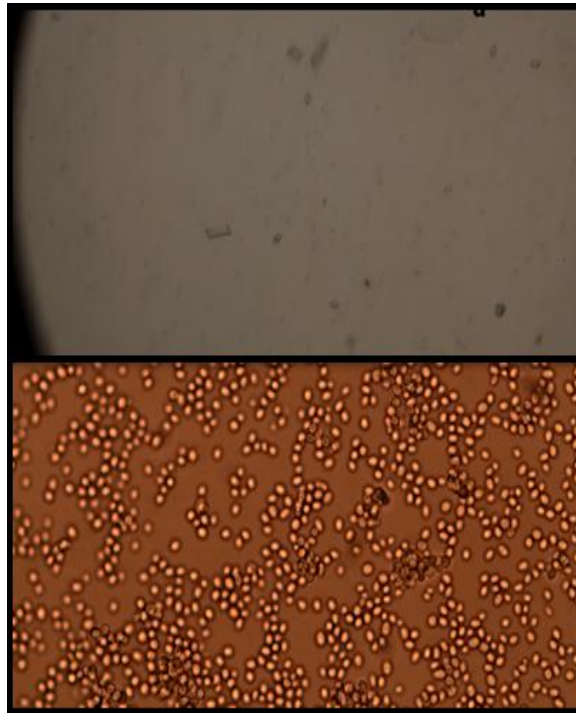


Figura 35: Arriba: Hormigas y espermatozoides, respectivamente . Abajo: esporas y levadura, respectivamente

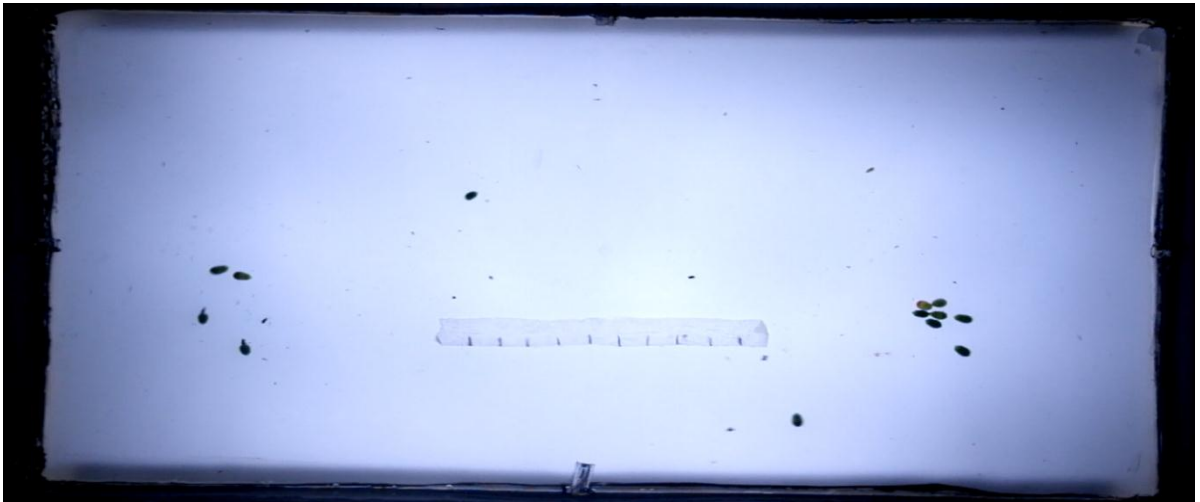


Figura 36: semillas

#### 4.6.2 Partículas con forma irregular

También se utilizaron partículas inertes con formas irregulares con el fin de simular

aplicaciones industriales. Se usaron partículas con alta flotabilidad en un medio perturbado, estas partículas son de diversos materiales, como: cera de parafina, pedazos de madera. En la figura 38 se observan sistemas de partículas de este tipo.

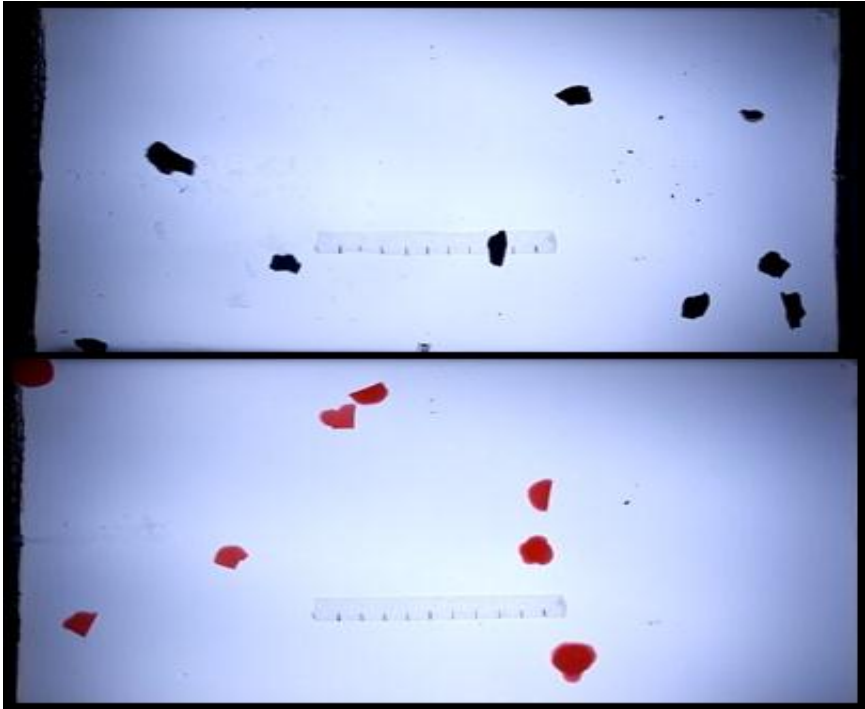


Figura 37: trozos de madera y cera de parafina respectivamente.

## **4.5 Análisis de partículas.**

El análisis de partículas tiene como objetivo estimar:

- Tamaño.
- Morfología.
- Cinemática.

El tamaño y forma de las partículas son estimadas mediante valores de acuerdo a lo discutido en el capítulo 1, estos valores son exportados en un archivo de texto o desplegados en una pantalla (tabla). La trayectoria de cada partícula es pintada con un color que se relaciona con su etiqueta, así como su velocidad, de esto se hablará con más detalle a continuación

### **4.5.1 Tamaño, forma y cinemática de partículas en condiciones de iluminación no controlada**

Para realizar un estimativo de los parámetros de las partículas se debe calibrar el sistema a partir de la relación distancia píxel. El sistema realiza los cálculos del área, perímetro, volumen, redondez y rapidez de los corpúsculos, los cuales deben convertirse a valores del sistema internacional de medidas debido a que los valores son arrojados inicialmente en valores de píxel por los algoritmos.

Debido a que se realizan operaciones morfológicas sobre los objetos de interés es alterado el resultado del tamaño y forma de las partículas de manera que este resultado es erróneo. Por tanto el algoritmo no es preciso para la medición de los parámetros de partícula bajo estas condiciones. Estos son muy útiles para conocer y estimar la cinemática de las partículas.

La rapidez a la que se desplaza una partícula está representada por un color, este

se degrada de acuerdo a que tan rápido cambie de posición de un *frame* a otro el corpúsculo, esta rapidez colorea la trayectoria del objeto como se puede apreciar en la figura 32.



Figura 38: trayectoria y velocidad de partículas.

En la figura 37 se observan las trayectorias que tiene cada partícula, las cuales están marcadas por diferentes colores, cada color representa un rango de rapidez al cual se desplaza un objeto. En esta figura, el color verde está indicando que los objetos se mueven lentamente y la distancia de punto a punto es corta, es decir la velocidad es baja en comparación a otros puntos con otros colores tales como el azul. Sobre la misma línea. En la tabla se muestra el rango de rapidez de un objeto y su color correspondiente.

Rango de velocidad en cm/s	Color en RGB	Color
1<velocidad<2		GreenYellow
2<velocidad<3		Lime
3<velocidad<4		LawnGreen
4<velocidad<5		Chartreuse
5<velocidad<5,5		MediumSlateBlue

Rango de velocidad en cm/s	Color en RGB	Color
5,5<velocidad<6		RoyalBlue
6<velocidad<6,5		Blue
6,5<velocidad<7		MediumBlue
7<velocidad<7,5		DarkBlue
7,5<velocidad<8		MediumVioletRed
8<velocidad<9		PaleVioletRed
9<velocidad<10		DeepPink
10<velocidad<11		LightSalmon
11<velocidad<12		Coral
12<velocidad<13		OrangeRed
13<velocidad<14		Crimson
14<velocidad<15		DarkRed
Velocidad>15		Red

**Tabla 7: Rango de velocidades y su respectivo color sobre la línea de trayectoria.**

La curvatura de la trayectoria del objeto (figura 33), que al igual que la velocidad es coloreada de acuerdo al valor del coeficiente de correlación lineal en 5 puntos de la línea. En la tabla se muestra el rango del coeficiente de correlación lineal y su color correspondiente. Este coeficiente de correlación lineal indica grado de dependencia entre las variables X e Y.

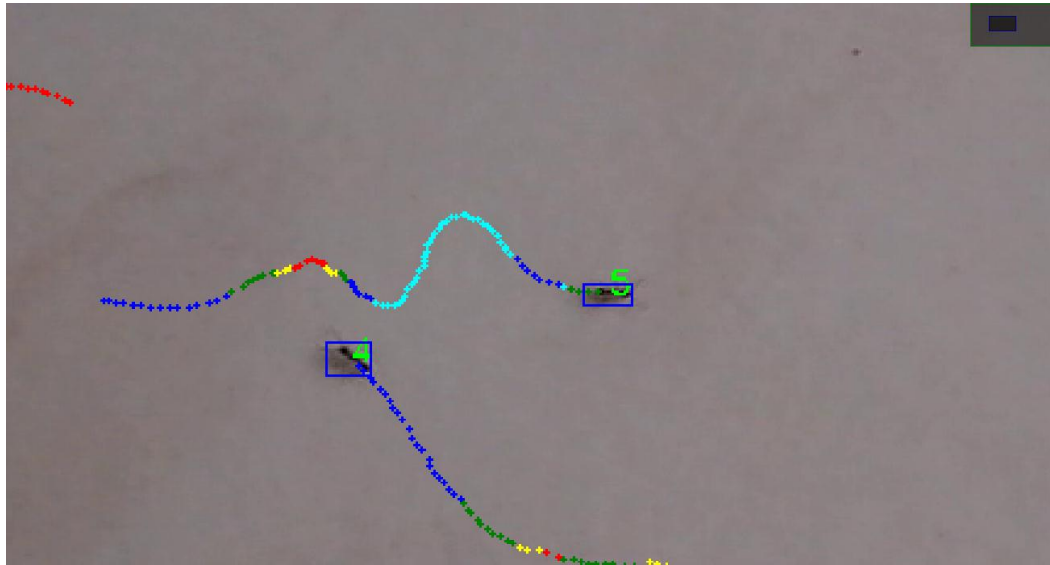


Figura 39: curvatura de la trayectoria

Rango de coeficiente de correlacion	Color en RGB	Color
$0,0 < C.C < 0,2$		Aqua
$0,2 < C.C < 0,4$		Green
$0,4 < C.C < 0,6$		Blue
$0,6 < C.C < 0,8$		Yellow
$0,8 < C.C < 1$		Red

Tabla 8: Rango de coeficiente de correlación de los puntos de la trayectoria y su respectivo color.

#### 4.5.2 Tamaño, forma y cinemática de partículas en condiciones de iluminación controlada.

En este caso, el alto contraste que se tiene, permite obtener una óptima segmentación sin que haya una pérdida de información, de manera que las áreas de los objetos no son afectadas. Los parámetros tales como el área, volumen, radio mínimo y máximo (de una elipse), perímetro del contorno, redondez y esfericidad y el radio equivalente (de una esfera), son calculados por el algoritmo de individualmente.



En las siguientes tablas (7,8,9,10) se aprecia algunos parámetros del análisis de partículas realizado por los algoritmos en 4 vídeos en el montaje de la figura 34, donde hay 9 partículas a las cuales se les han calculado valores promedio de área, volumen, perímetro, redondez y radio equivalente, aquí los valores están dados en pixeles y para realizar la conversión al sistema internacional se debe utilizar la reglilla descrita en el capítulo 3.

Partícula	Área	Volumen	Perímetro	Redondez	Radio Equivalente	Video
1	304,	7817,56	69,36	0,80	9,85	1
2	114	1913,77	43,21	0,77	6,037	1
3	179	3472,93	51,46	0,85	7,55	1
4	130	2822,37	47,46	0,73	6,43	1
5	112	2105,16	45,56	0,68	5,98	1
6	149	2906,78	53,46	0,66	6,89	1
7	124	2543,31	46,38	0,73	6,29	1
8	224	6137	64,04	0,69	8,45	1
9	126	2213,23	45,80	0,75	6,33	1

**Tabla 7: cálculo de parámetros de partícula**

Partícula	Área	Volumen	Perímetro	Redondez	Radio Equivalente	Vídeo
1	302	7486,31	68,77	0,80	9,80	2
2	113	1910,78	45,21	0,68	6,01	2
3	176	3232,39	52,04	0,82	7,49	2
4	133	2994,49	46,87	0,76	6,51	2
5	113	2349,17	44,97	0,70	5,99	2
6	148	2894,3	52,62	0,67	6,86	2
7	120	2704,07	46,38	0,70	6,19	2
8	222	5457,62	61,79	0,73	8,40	2
9	127	2239,72	45,21	0,78	6,37	2

**Tabla 8: cálculo de parámetros de partícula**

Partícula	Área	Volumen	Perímetro	Redondez	Radio Equivalente	Vídeo
1	303	7614,63	68,77	0,81	9,82	3
2	113	1879,43	46,64	0,65	5,99	3
3	183	3564,11	54,04	0,79	7,64	3
4	135	2862,13	48,87	0,71	6,57	3
5	110	2077,65	44,97	0,68	5,91	3
6	146	2747,15	51,21	0,70	6,83	3
7	123	2726,29	47,21	0,69	6,27	3
8	227	5581,41	61,79	0,75	8,50	3
9	123	2109,95	43,79	0,80	6,26	3

**Tabla 9: cálculo de parámetros de partícula**

Partícula	Área	Volumen	Perímetro	Redondez	Radio Equivalente	Vídeo
1	304,5	7817,56	69,35	0,79	9,85	4
2	114,5	1913,77	43,21	0,77	6,04	4
3	179	3472,93	51,45	0,85	7,58	4
4	130	2822,37	47,45	0,73	6,43	4
5	112,5	2105,16	45,55	0,68	5,98	4
6	149	2906,78	53,45	0,65	6,89	4
7	124,5	2543,31	46,38	0,73	6,29	4
8	224,5	6137	64,04	0,69	8,45	4
9	126	2213,23	45,79	0,75	6,33	4

**Tabla 10: cálculo de parámetros de partícula**

Por otro lado, bajo estas condiciones, la cinemática de las partículas describe patrones de movimiento ondulatorios, este es un fenómeno que afecta la calidad de la información obtenida referente al tamaño y morfología de las partículas, puesto que ondulan en un plano tridimensional, y los algoritmos de análisis, están diseñados para trabajar en un plano bidimensional. Este error puede detallarse en las pequeñas variaciones de vídeo a vídeo de los parámetros mencionados en la tabla. Este movimiento en 3 dimensiones se muestra en la figura 34, las partículas se mueven de manera aleatoria. Aquí se puede detallar que se forma un patrón

ondulatorio en las líneas de trayectoria, estos trayectos se pintan de acuerdo a la velocidad que lleva cada partícula.

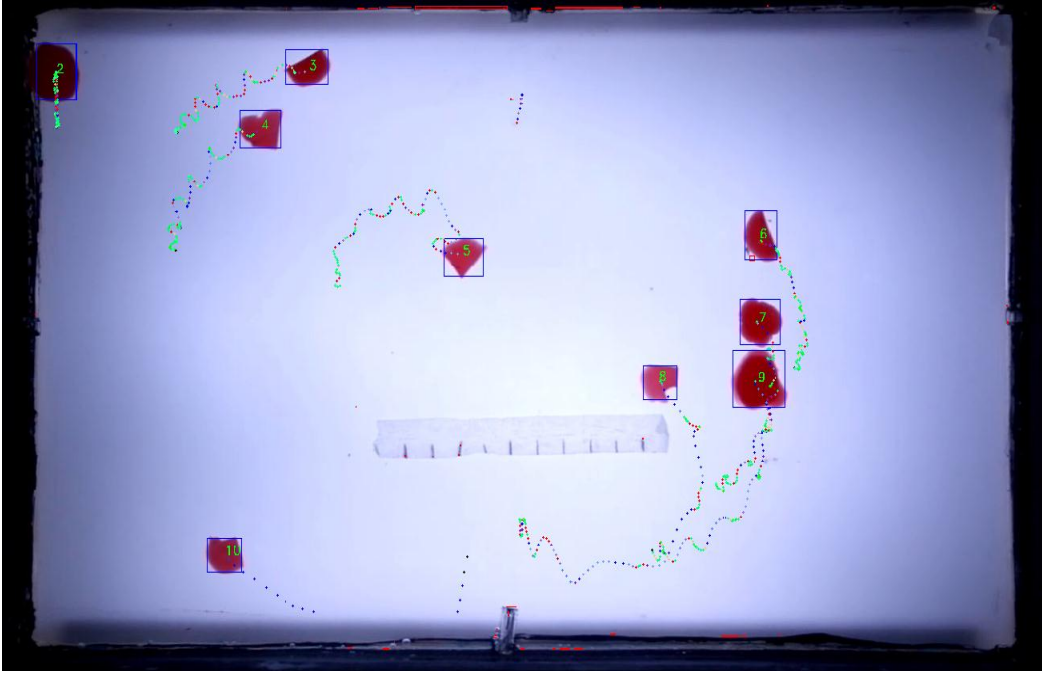


Figura 40: trayectoria y velocidad de las partículas.

## 5. Conclusiones

- Se realizó análisis y seguimiento de partículas macroscópicas, mediante algoritmos de procesamiento digital de imágenes de vídeo. Estos algoritmos se probaron bajo un ambiente de iluminación controlada e iluminación no controlada.
- Los métodos para la detección de movimiento están basados en un enfoque estadístico, que permite adaptarse a cambios de iluminación o al nivel variable en la intensidad de la fuente de luz en la escena
- El tracking de objetos de interés implementado en este trabajo, es una técnica que realiza el seguimiento a partículas utilizando pocos recursos computacionales y de forma eficiente.
- Se realizó el seguimiento de partículas en diversas condiciones de iluminación, los resultados exitosos son con imágenes de alto contraste y calidad. imágenes de baja calidad y poco contraste no son adecuadas para los algoritmos de análisis y seguimiento.
- Los algoritmos pueden realizar la caracterización del tamaño forma y cinemática de partículas en cualquier rango de tamaño y tipo de partículas macroscópicas, pero es indispensable contar con imágenes de alto contraste, escenarios con iluminación controlada y movimientos en el plano bidimensional para obtener un análisis correcto
- La iluminación es un elemento fundamental para garantizar la precisión en cuanto a las medidas de tamaño y forma y es obligatorio contar con una iluminación controlada si se desea realizar el análisis de partículas. De lo

contrario el sistema no cuenta con una precisión adecuada y solo será útil para describir la cinemática de corpúsculos.

- La información de las características y la cinemática de las partículas puede importarse de manera individual en una lista que pueda usarse en software estadísticos o tablas de datos, con el fin de realizar diversos análisis.

## Trabajos Futuros

- Para entregar un análisis cuantitativo de tamaño y forma con una mayor precisión se debe implementar un escenario adecuado que genere imágenes de alto contraste.
- Utilizar el algoritmo de Kalman para realizar seguimiento de objetos de interés con movimientos brownianos e interacciones complejas, con la finalidad de tener mayor exactitud para la asignación de etiquetas a los objetos de interés.
- El tipo de interacciones que se presenta entre las partículas es amplio y cada uno de estos requiere de un análisis específico. En este trabajo se consideraron colisiones y agrupamiento. para otro tipo de interacciones, es necesario usar un tipo de técnica predictiva, como el filtro Kalman
- Es necesario tener una relación muy precisa entre la distancia en el sistema internacional de medidas y los pixeles equivalentes para obtener una mejor precisión en el análisis de partículas.

## Lista de Referencias

- [1] C.-W. Liao, J.-H. Yu, and Y.-S. Tarng, "On-line full scan inspection of particle size and shape using digital image processing," *Particuology*, vol. 8, no. 3, pp. 286–292, 2010.
- [2] H. G. Merkus, "Relevance of Particle Size, ". In *Particle Size Measurements Fundamentals, Practice, Quality*. Springer, 2009, pp. 1-8
- [3] M. L. LAUCKS, "Aerosol Technology Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles," *Journal of Aerosol Science*, vol. 31, no. 9. pp. 1121–1122, 2000.
- [4] S .B Casas, F. P. Cortes ,S. O. Bustingorry, *Effects for particles material atmospheric pollution on acute respiratory diseases in under 5 years of age* [online], Chile: Universidad de Concepción , 2004 Disponible en: [http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0717-95532004000200004](http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0717-95532004000200004)
- [5] J. Glynn, W heinke, " Tamaño, Forma y Distribución de las Partículas". In *Ingeniería Ambiental*. Prentice Hall, 1999, pp. 143-150
- [6] V. Bucalá , *Procesamiento de sólidos* [online], Argentina: Universidad Nacional del Sur, 2013 Disponible en: <http://www.criba.edu.ar/cinetica/solidos/Capitulo2.htm>
- [7] A. Escalera," " in *Visión por computador: Fundamentos y métodos*. Madrid: Prentice Hall, 2001. 304 p. ISBN 84-205-3098-0.
- [8] R. González, R.Woods," light and the electromagnetic spectrum". In *Digital*

*image procesing*. Prentice Hall, 2002, pp.42

[9] P. Córdoba, C. Sánchez," *Segmentación de imágenes*". In Sistema de Visión Artificial para la Vigilancia de Propiedades Mediante Procesamiento Digital De Imágenes de Video y Reconocimiento de Patrones, Colombia: Universidad del Cauca. 2008, pp 48

[10] C. Stauffer and W. E. L. Grimson, "Adaptive background mixture models for real-time tracking," *Proc. 1999 IEEE Comput. Soc. Conf. Comput. Vis. Pattern Recognit. Cat No PR00149*, vol. 2, no. c, pp. 246–252, 1999.

[11] Y. Dedeoglu, "Moving Object Detection, Tracking and Classification for Smart Video Surveillance," pp. 1–100, 2004.

[12] M. Vela-Pérez, M. A. Fontelos, S. Garnier. "From individual to collective dynamics in Argentine ants (*Linepithema humile*)". *Mathematical Biosciences* 262: 56–64, 2015