

# **CÁLCULO DEL ÁREA SUPERIOR DE AGLOMERACIONES DE CRISTALES DE AZÚCAR POR PROCESAMIENTO DE IMÁGENES**

## ***CALCULATION OF THE UPPER AREA OF SUGAR CRYSTAL AGGLOMERATIONS BY IMAGE PROCESSING***

### ***Salvador Manuel Malagón Soldara***

Universidad Virtual del Estado de Guanajuato, México  
*22001757@es.uveg.edu.mx*

### ***Edgar Augusto Ruelas Santoyo***

Tecnológico Nacional de México / IT de Celaya, México  
*edgar.ruelas@itcelaya.edu.mx*

### ***Francisco Javier García Rodríguez***

Tecnológico Nacional de México / IT de Celaya, México  
*francisco.garcia@itcelaya.edu.mx*

### ***Pedro Alberto Quintana Hernández***

Tecnológico Nacional de México / IT de Celaya, México  
*pedro@iqcelaya.itc.mx*

### ***Josafat García Hernández***

Tecnológico Nacional de México / IT de Celaya, México  
*18031571@itcelaya.edu.mx*

### ***Janet Alejandra Loma Galindo***

Tecnológico Nacional de México / IT de Celaya, México  
*18030749@itcelaya.edu.mx*

**Recepción:** 7/junio/2024

**Aceptación:** 10/julio/2024

## **Resumen**

En el siguiente trabajo se realizó un sistema digital en Python para identificar y dimensionar áreas de cristales de azúcar. En particular, aglomeraciones amorfas provocadas por la unión de varios cristales. Dichos cristales se encontraban en un proceso de cristalización en un cristalizador evaporador. Por lo tanto, la identificación se realizó analizando a los cristales mientras fluían en alcohol a través de una tubería de  $\frac{1}{4}$  de pulgada. Además, su captura se realizó a través de una cámara *Canon EOS Rebel T7 18 – 55 mm* instalada en un microscopio óptico y el

método de procesamiento fue mediante técnicas de procesamiento de imágenes con librería OpenCV. Donde, las imágenes se seleccionaron para analizar sólo aglomeraciones de cristales. Este tipo de configuraciones son de particular interés ya que dentro de estas rocas se encuentra un gran conjunto de cristales y es importante estimar su área. Para realizar el procesamiento primero se realizó un filtro para aclarar el frame, posteriormente se realizó un blur para quitarle rugosidad a la aglomeración y, finalmente, se realizó una búsqueda de contornos para delimitar el área que abarcaba la aglomeración en el frame. Por último, se realizó una transformación de pixeles cuadrados a nanómetros cuadrados y, con esto, se pudo obtener el área del cristal. Por último, se realizó una media de las áreas medidas y se graficó una campana de Gauss con todas las mediciones hechas por el algoritmo.

**Palabras Clave:** Cristalización, dimensionamiento, OpenCV, Python.

### **Abstract**

*In the following work, a digital system was developed in Python to identify and size areas of sugar crystals. In particular, amorphous agglomerations caused by the union of several crystals. These crystals were in a crystallization process in an evaporating crystallizer. Therefore, identification was achieved by analyzing the crystals while they were flowing in alcohol through a ¼ inch pipe. Furthermore, their capture was performed through a Canon EOS Rebel T7 18 – 55 mm camera installed on an optical microscope and the processing method was by image processing techniques with OpenCV library. Where, the images were selected to analyze only agglomerations of crystals. This type of configurations are of particular interest because within these rocks there is a large set of crystals and it is important to estimate their volume. To realize the processing, first a filter was applied to clarify the frame, then a blur was performed to remove roughness from the agglomeration and, finally, a contour search was performed to delimit the area covered by the agglomeration in the frame. Finally, a transformation from square pixels to square nanometers was made and, with this, the area of the crystal could be obtained.*

*Finally, the measured areas were averaged, and a Gaussian bell was plotted with all the measurements made by the algorithm.*

**Keywords:** *Crystallization, measurement, OpenCV, Python.*

## **1. Introducción**

La cristalización es un área que ha ganado un lugar importante en el ámbito científico pues, hay sistemas que requieren controles meticulosos debido a cuestiones de higiene, entre otras normativas de calidad. Donde, este tipo de procesos de higiene consisten en una depuración por medio del uso de cristalizadores que eliminan las impurezas de los cristales. Para procesarlos, dichos cristales son introducidos en un cristizador evaporador donde comienzan a adherirse y a aumentar de tamaño. En este sentido, debido a este aumento de tamaño es necesaria la introducción de un dimensionador para monitorear en todo momento el tamaño de los cristales. Sin embargo, existe la dificultad de que las mediciones se deben realizar mientras los cristales fluyen en un medio líquido a través de la tubería del cristizador.

En este sentido, existen algunos trabajos que han explorado el dimensionamiento de partículas por medio de procesamiento de imágenes. Por ejemplo, [Quintana et al., 2018] se encargaron de caracterizar el crecimiento de cristales de azúcar por medio de fotografías. Para el proceso de cristalización, utilizaron un cristizador evaporador y, principalmente, caracterizaron al cristal ortorrómbico visible. Para ello, durante el experimento se tomaba una fotografía y luego se exportaba a la computadora para su procesamiento. El dimensionamiento en las muestras obtenidas se aplicó por medio de una medición manual de píxeles en el software Gimp, donde, se vectorizaban las imágenes y finalmente se estimaba el volumen de los cristales. Los resultados mostraron imágenes con buena calidad, principalmente, debido a la ausencia de ruido. Sin embargo, las imágenes que detectaba su algoritmo eran estáticas y, por lo tanto, no podían obtener una medición automática mientras el cristizador se encontraba trabajando.

Por otro lado, [Zarco et al., 2021] realizaron una caracterización del área del azúcar por medio de procesamiento automático de imágenes. Es decir, a diferencia del

trabajo anterior, ya se podía realizar el dimensionamiento del cristal ortorrómbico por medio de una computadora. De nuevo se usaba un cristalizador evaporador y la manguera era intervenida para realizar un video de los cristales. Sin embargo, el proceso de detección automático de cristales sólo contabilizaba a los cristales ortorrómbicos con un tamaño visible. Por lo tanto, a este estudio le faltó analizar a las aglomeraciones provocadas por el proceso de cristalización.

Por otro lado, existen trabajos que mencionan los filtros necesarios para detectar un cristal de azúcar por medio de procesamiento de imágenes. Por ejemplo, [Tadeo et al., 2010] se encargaron de dar seguimiento a la cristalización del azúcar. El enfoque dado iba principalmente a delimitar las distintas fases de este proceso. El procesamiento de imágenes utilizado estaba formado por un preprocesamiento, una binarización, operaciones morfológicas y, posteriormente, un análisis usando wavelets. En sus resultados lograron monitorear y clasificar las fases usando redes neuronales. Lamentablemente, no se presentaron datos estadísticos para poder analizar una muestra grande dentro de un cristalizador.

Como las imágenes son en dos dimensiones, existen otro tipo de trabajos que sustentan una transformación de  $2D$  a  $3D$ . Por ejemplo, [Quintana et al., 2005] lograron delimitar el factor de forma del área superficial de ciertos cristales de azúcar con base en distintos perfiles de enfriamiento y ciertas trayectorias de agitación. Para realizarlo, tomaron las distintas caras, por medio de trigonometría pudieron realizar el dimensionamiento de las figuras sencillas que formaban el cristal completo. Donde, como resultado lograron determinar una diferencia entre el modelo postulado y el modelo esférico con una proporción de 1.212 veces su tamaño. No obstante, a pesar de que este trabajo es una transformación de  $2D$  a  $3D$ , no menciona en ningún momento el procesamiento de imágenes, pero sienta la base para poder hacer una transformación de área a volumen. Además, este trabajo también se enfocó únicamente en cristales ortorrómbicos.

Por otro lado, existen otros trabajos donde se analizan técnicas de dimensionamiento de partículas por procesamiento de imágenes. Por ejemplo, [Madrid et al., 2013] realizaron una revisión con lo relacionado al dimensionamiento de objetos usando herramientas del procesamiento de imágenes. Para lograrlo,

pusieron en práctica múltiples herramientas matemáticas tales como: el gradiente, derivadas, matrices, entre otras operaciones. Este trabajo sienta una base para el tratamiento de los bordes y la iluminación en el dimensionamiento de partículas. Por otro lado, [Ferreira et al., 2011] usaron el análisis de imágenes para poder determinar la rugosidad de los materiales. Usaron imágenes obtenidas de distintos microscopios, extrajeron las características de las texturas y entrenaron una red neuronal para poder determinar la rugosidad. Por lo tanto, este trabajo podría servir para poder detectar aglomeraciones de cristales de azúcar en su proceso de cristalización.

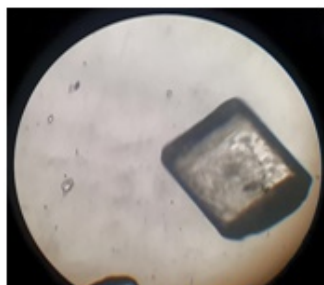
En adición, existen otros trabajos que se enfocan en el proceso de cristalización. Por ejemplo, [Fernández et al., 2006] lograron realizar mejoras en la calidad de la producción del azúcar al realizar un modelo capaz de predecir el tamaño de un cristal bajo condiciones industriales. Se realizó usando el método de regresión múltiple, calculando las constantes de cristalización, y la distribución de los tamaños de salida. Sin embargo, el trabajo es estadístico en su mayoría, y no involucra el procesamiento de imágenes. Por otro lado, [Zambrano et al., 2011] analizaron la superficie de ciertos cristales de azúcar como una estructura organizada y, con base en eso, mejoraron los índices de calidad. En este sentido, se utilizaron procesos no destructivos para el análisis, como la microscopía de fuerza atómica o la microscopía óptica diferencial. De entre lo descubierto, se determinó que la velocidad de la cristalización era inversamente proporcional al tamaño del cristal. Desafortunadamente, sus resultados sólo se vieron reflejados cuando se usaba la técnica de microscopía de fuerza atómica.

Dentro del presente trabajo se analizaron las aglomeraciones de cristales que se pueden observar en el proceso de cristalización del azúcar. Para ello, se intervino el conducto de un cristizador evaporador y, con ayuda de un microscopio óptico se tomaron fotografías a los cristales. Dichas fotografías fueron realizadas por medio de una cámara *Canon EOS Rebel T7 18 – 55 mm* y fueron procesadas por medio de OpenCV. Para realizar el procesamiento primero se realizó un filtro para aclarar el frame, posteriormente se realizó un blur para quitarle rugosidad a la aglomeración y, finalmente, se realizó una búsqueda de contornos para delimitar el

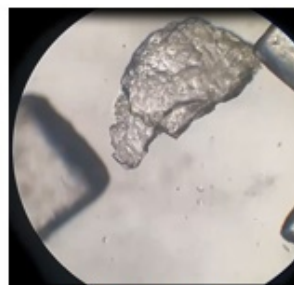
área que abarcaba la aglomeración en el frame. Por último, se realizó una transformación de píxeles cuadrados a nanómetros cuadrados y, con esto, se pudo obtener el área de la aglomeración de cristales.

## 2. Marco teórico

El proceso de elaboración de azúcar cuenta con una serie de pasos donde es necesario cuidar variables como la presión, la temperatura y el tiempo, con la finalidad de formar cristales de calidad, los cuales tienen dos características primordiales: tamaño y forma. Por lo tanto, es importante analizar dicho tamaño y forma por medio de procesamiento de imágenes. Sin embargo, como primer paso importante, la computadora necesita saber cómo se puede presentar un cristal en las diferentes tomas. En este sentido, es importante conocer que los cristales de azúcar siempre tienen una forma ortorrómbica [Bahín, 2023]. Sin embargo, los cristales que se observaron en el experimento tenían tres configuraciones visibles: ortorrombos con un tamaño distinguible para la cámara, ortorrombos como pequeñas partículas no visualmente distinguibles y aglomeraciones de ortorrombos (Figura 1). En específico, este estudio se enfocó en la detección y medición de las aglomeraciones observadas. Donde, este tipo de configuraciones son de particular interés ya que dentro de estas rocas se encuentra un gran conjunto de cristales y, por lo tanto, su tamaño influye de gran manera en el cálculo de un área promedio. Además, estas mediciones son problemáticas para trabajarse de manera manual, ya que suelen ser sumamente tardadas. Sin embargo, precisamente en estos problemas las computadoras representan una gran ayuda.



a) Cristal ortorrómbico



b) Aglomeración



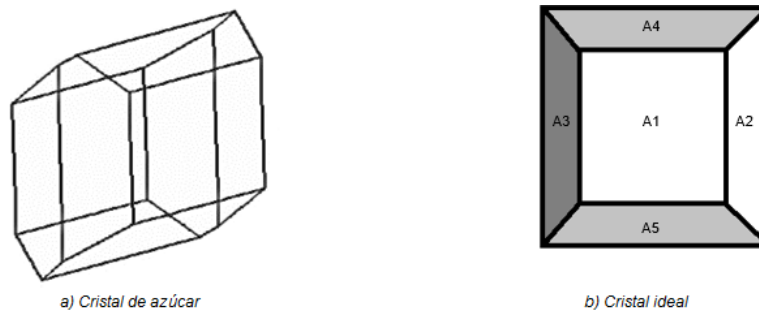
c) Cristales pequeños

*Fuente: elaboración propia.*

Figura 1 Tipos de configuraciones en los cristales de azúcar visualizados.

Debido a que los cristales de azúcar se presentan de manera monoclinica con un aspecto geométrico ortorrómbico, tienen una forma similar a la mostrada la figura 2a. Con esto en cuenta, se puede esperar ante una toma que el cristal aparecerá como se muestra en la figura 2b. De esta manera, es mucho más fácil realizar el cálculo del área de las caras del cristal, donde será necesario sumar el valor de las diez caras que lo componen, tal como se representa en la ecuación 1.

$$A_C = 2(A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5) \quad (1)$$



Fuente: [Combs, 2000].

Figura 2 Forma ortorrómbica de los cristales de azúcar.

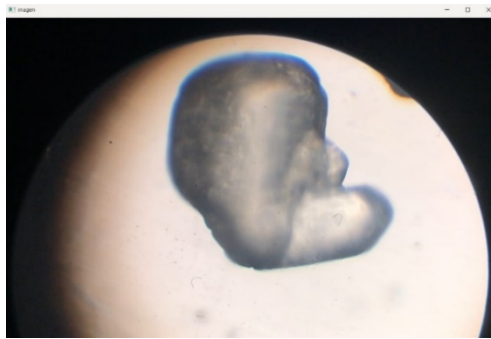
El cálculo del área es importante, ya que diferentes investigadores estiman el volumen del cristal a partir del área calculada. No obstante, el área se puede calcular de manera absoluta, pero al tratarse de imágenes, el volumen debe ser estimado de manera subjetiva. Para el cálculo del volumen del cristal, es conveniente separarlo en zonas, siendo un paralelepípedo la zona principal, acompañada de los cuatro bordes piramidales. Como muestra de una interpretación de volumen, en el trabajo de [Quintana *et al.*, 2005] se determinó el factor de forma, donde se estima que el volumen de un cristal queda expresado por la ecuación 2. Donde  $V_C$  es el volumen del cristal,  $A_C$  área del cristal y  $K_A$  factor de forma con un valor de 1.212.

$$V_C = \frac{\pi}{6} \left( \sqrt{\frac{A_C}{\pi K_A}} \right)^3 \quad (2)$$

### 3. Métodos

Se tomaron muestras de video donde se aprecian cristales de azúcar de distintas formas y tamaños, siendo presentes los cristales ortorrómbicos grandes, cristales

ortorrómbicos pequeños y aglomeraciones de cristales. Los cristales fluyeron a través de un circuito hidráulico cerrado, el cual transportaba el azúcar a través de un medio líquido formado por alcohol etílico. El circuito estaba compuesto por una bomba unida a un visor, de manera que se permite direccionar el flujo al mismo tiempo que es posible tomar la muestra visual con un microscopio y una cámara digital. El metraje obtenido fue sometido a un proceso de selección donde se buscaron fragmentos de video donde existiera la presencia de los cristales a estudiar, es decir, las aglomeraciones. Además, el fotograma debía presentar una calidad de imagen apropiada y una velocidad de flujo que permitiera un buen enfoque. En la figura 3 se presenta una captura obtenida del metraje, donde es posible observar la presencia de una aglomeración amorfa de cristales.



*Fuente: elaboración propia.*

Figura 3 Muestra tomada de los cristales de azúcar en forma de aglomeración.

Normalmente el procesamiento imágenes está formado por cinco procesos, los cuales son: la captura, el acondicionamiento, la segmentación, la manipulación y el resultado (Figura 4).



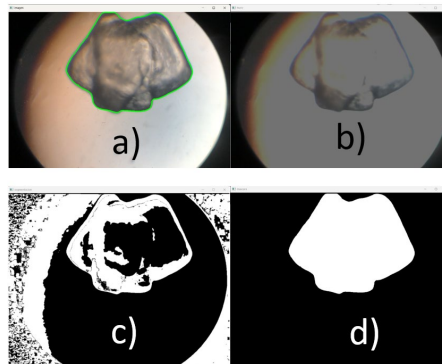
*Fuente: elaboración propia.*

Figura 4 Procesos utilizados para construir el algoritmo de procesamiento de imágenes.

Este algoritmo es usado para formas indefinidas como lo son las aglomeraciones. En él, se comienza por un procedimiento de videocaptura (Figura 5a).

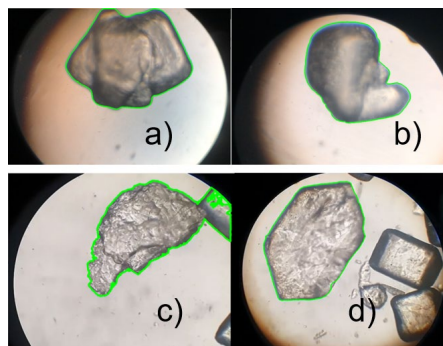


Posteriormente, en el acondicionamiento se trunca la imagen por medio de una umbralización para borrar imperfecciones y puntos con mayor luz (Figura 5b). Este proceso genera un fotograma auxiliar para simplificar sus futuros procesamientos. En adición, dentro de la segmentación se realiza una máscara para poder encontrar el color de los cristales y se puede aislar de los demás elementos. Dentro de este paso, una vez aislada la imagen se binarizará como se observa en la figura 5c. De esta manera, sólo se quedan las sombras de los cristales y se puede proceder a una manipulación. Dentro de este procesamiento se realiza un `findContours` para guardar un vector con el contorno (Figura 5d). Posteriormente, cabe destacar que en la figura 6a se encuentra el cristal 1, en la figura 6b se encuentra el cristal 2, en la figura 6c se encuentra el cristal 6 y en la figura 6d se encuentra el cristal 4.



*Fuente: elaboración propia.*

Figura 5 Procesos del algoritmo ejecutados sobre el cristal 1.



*Fuente: elaboración propia.*

Figura 6 Contorno detectado para medir el área en los cuatro cristales muestra.

Para encontrar los contornos disponibles en el instante de estudio, se usó la función Canny, la cual basa su funcionamiento en la reducción de ruido de la imagen.

Posteriormente, se usó el gradiente, para después ser filtrada con un kernel de Sobel en las direcciones  $(x, y)$ . Por último, mediante un umbral de histéresis se decide si un contorno detectado puede entrar realmente en dicha categoría. Donde, la categoría de cristales utilizada por este trabajo es solamente las aglomeraciones formadas por cristales ortorrómbicos.

### 3. Resultados

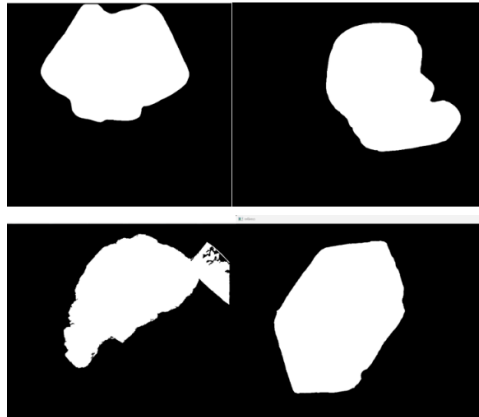
A continuación, se utilizaron los 4 cristales de la figura 6 para obtener el área de cada uno por procesamiento imágenes. Para el cristal 1 se obtuvo un área de 248697.5 *pixeles*, para el cristal 2 se obtuvo un área de 179,919.0 *pixeles*, para el cristal 3 se obtuvo un área de 117,108.0 *pixeles* y para el cristal 4 se obtuvo un área de 178,128.0 *pixeles*. Posteriormente, se debe de realizar la transformación de *pixeles* a nanómetros. Para ello, el área de visión del microscopio es de 1.5 mm (1,500,000 nm) y los fotogramas tiene un tamaño de 700x700 *pixeles*. Es decir, el círculo claro que se muestra en la fotografía tiene un diámetro 1.5 mm, lo cual resulta en una relación de 2142.86 nanómetros por *pixel*. Con esto en cuenta, la ecuación 3 describe la transformación de *pixeles* a nanómetros para el lente en específico utilizado por el microscopio. Donde  $A_{cn}$  es el área del cristal en nanómetros y  $A_{cp}$  el área del cristal en *pixeles*

$$A_{cn} = \frac{A_{cp} * 1500000}{700} \quad (3)$$

Por lo tanto, el área del cristal 1 sería 532,923,214.28  $nm^2$ , el área del cristal 2 sería 385,540,714.71  $nm^2$ , el área del cristal 3 sería 250,945,714.28  $nm^2$  y el área del cristal 4 sería 381,702,857.14  $nm^2$ .

Por otro lado, para poder comprobar estos resultados, se puede utilizar otro método para poder encontrar el área del cristal. Por ejemplo, en la foto binarizada se pueden contar el número de *pixeles* en color blanco. De esta manera, se creó un programa de comprobación que se aplicó sobre las fotografías de la figura 7. Dentro del programa de conteo de *pixeles* blancos, el cristal 1 se obtuvo un área de 327,684 *pixeles*, para el cristal 2 se obtuvo un área de 305,714 *pixeles*, para el cristal

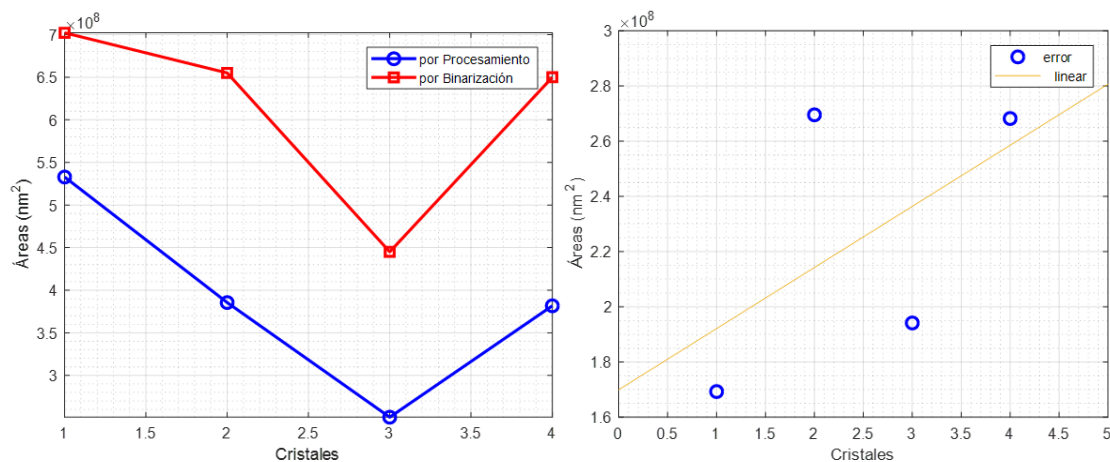
3 se obtuvo un área de 207,703 *pixeles* y para el cristal 4 se obtuvo un área de 303,306 *pixeles*. Por lo tanto, el área del cristal 1 sería 702,180,000  $nm^2$ , el área del cristal 2 sería 655 101,428.57  $nm^2$ , el área del cristal 3 sería 445,077,857.14  $nm^2$  y el área del cristal 4 sería 649,941,428.57  $nm^2$ .



Fuente: elaboración propia.

Figura 7 Binarización ejecutada sobre los cuatro cristales muestra.

Por último, en la figura 8a se comparan las áreas de ambos métodos. En forma de cuadrados se representan las áreas por binarización y en forma de círculos se representan las áreas por el procesamiento de imágenes. Donde se puede observar que la diferencia entre ambas se conserva constante, lo cual se debe a las cerraduras y aperturas que se realizan durante el procesamiento.



a) Área de los cristales.

b) Error de mínimos cuadrados.

Fuente: elaboración propia.

Figura 8 Gráfica con la comparación de las áreas de ambos métodos.

Además, para validar el experimento se puede observar que la diferencia entre la altura del método de binarización está en un rango de distancia sobre el punto por procesamiento. Dicho en otras palabras, el error conserva una tendencia provocada por el cambio de método, lo cual permite realizar una gráfica de tendencia representada por la figura 8b.

#### **4. Discusión**

El presente trabajo realizó una medición del área superficial de aglomeraciones de cristales fluyendo a través de un medio líquido. Donde, las mediciones se realizaron por medio de la medición de píxeles en fotografía. Dentro de esta medición, una primera dificultad fue el transformar los píxeles a nanómetros para poder tener las áreas en unidades métricas. En cuanto a los resultados de las áreas, se tuvieron valores muy cercanos a la realidad, los cuales, se pudieron constatar con cuatro aglomeraciones diferentes. No obstante, una limitación dentro de este estudio es el enfoque de la cámara digital. A diferencia de los dispositivos dimensionadores que trabajan con láseres o rayos x, la cámara realiza un enfoque automático que puede introducir errores dentro de las mediciones. Es decir, con los diferentes enfoques que puede realizar la cámara, una aglomeración puede estar representada con más o con menos píxeles debido a la apertura dinámica de los lentes de la cámara. Por último, otra acción que puede introducir error es el enfoque del lente del microscopio por medio del movimiento de la platina del microscopio. En otras palabras, el acercar o el alejar los objetos para realizar un enfoque, se puede traducir una variación en la medición de las áreas.

#### **5. Conclusiones**

La implementación del sistema de medición de áreas de aglomeraciones tuvo una buena estimación tomando en cuenta las diferentes aplicaciones que puede tener. Por ejemplo, se puede utilizar dentro de los procesos de enriquecimiento y depuración del azúcar. Donde, es importante monitorear el tamaño del cristal para poderlo utilizar en los ambientes domésticos. Es decir, el azúcar debe tener un tamaño regulado para que las personas puedan dispensarla en cucharadas dentro

de sus hogares. Por lo tanto, al realizar una medición por aglomeración en nanómetros, se puede controlar que la muestra de cristales no crezca hasta tamaño no manejables en los hogares. De esta forma, el error en nanómetros obtenido dentro de este trabajo, no se vuelve importante ya que el tamaño de los gránulos en una cucharada puede variar sin que el usuario lo detecte. Por otro lado, también sería interesante la introducción de una segunda cámara dentro del experimento para poder realizar dos mediciones y, con ayuda de esto, poder establecer una mejor estimación del error. Por último, dentro del presente proyecto se plantea como trabajo futuro el análisis de aglomeraciones en línea. Es decir, poder aislar las aglomeraciones por medio de filtros de procesamiento de imágenes y así obtener su área en cuanto pasen por el lente. Si se es capaz de lograr esto, este dispositivo de medición se podría utilizar como un sistema de monitoreo en los procesos de enriquecimiento y depuración de azúcar.

## **6. Bibliografía y Referencias**

- [1] Alves M., Ferreira B. & Leta F. (2011). Evaluación de Parámetros usando Análisis de Imágenes de Rugosidad de diferentes Microscopios Ópticos y Electrónicos. Brasil: Instituto Nacional de Metrología. 22(4), 129-146.
- [2] Bahín-Deroncelé, L. J., Quesada-González, O., Cascaret-Carmenaty, D. A., Odio-González, R. A., & Cantos-Macías, M. Á. (2023). Obtención de material carbonoso de bagazo de caña de azúcar con activación salina. *Revista Cubana de Química*, 35(2), 253-273.
- [3] Baltasar-Sánchez A & Gonzales-Sistal A. (2006). Estudio de Tumores Óseos mediante imágenes digitalizadas. España: *Diposit Digital*.
- [4] Camilo-Zambrano J., Luna A., Rosero C. & Revelo-Vargas D. (2018). Evaluación Nano-Estructural de cristales de Azúcar como Mecanismo de Cualificación de la Calidad. *Colombia: Simposio de Materiales Poliméricos*.
- [5] Combs, S., (2000). Morphology of a Crystal Sugar. *Estados Unidos: Indiana University Molecular Structure Center*.
- [6] Fernández-Pérez R., Viera-Bertrán A. & Hernández-Pedreira C. (2006). Modelos para el Cálculo del tamaño de Cristales de Azúcar comercial en

- Tachos del CAI Costa Rica. Cuba: Revista Cubana de Química. 18(1), 154-155.
- [7] Jiménez Reyes J & Córdova Fraga T. (2015). Análisis de imágenes médicas usando matlab. *México: Jóvenes en la Ciencia*.
- [8] Madrid H., Cribeiro J.& Fraga J. (2013). El Cálculo en el Procesamiento de Imágenes. *México: El Cálculo y su Enseñanza*.
- [9] Quintana-Hernández P. Moncada-Abaunza D. Bolaños-Reynosa E. & Salcedo-Estrada L. (2005). Evaluación del crecimiento de cristales de Azúcar y Determinación del Factor de Forma del área Superficial. *México: Revista Mexicana de Ingeniería Química*. 4(1), 123-129.
- [10] Quintana Silva J., Cabrera Sánchez F., Téllez Morales A., & Osorio Miron A. (2018). Characterization of crystals growth in a crystallizer-evaporator through Digital image processing using the sobel filter. Mexico: ITEGAM. 103-108.
- [11] Tadeo F., Álvarez T. & González S. (2010). Seguimiento de la cristalización de azúcar mediante procesamiento de Imágenes con Wavelets. España: Universidad de Valladolid.
- [12] Zarco-Salazar, J.E., Vázquez Rojas, J.A., Aguilar-Alvarado, G., Valadez-de la Paz, N.P., Quintana-Hernández, P.A., Malagón-Soldara S.M. (2021). Dimensionamiento de cristales de azúcar a partir de procesamiento de imágenes (sizing of sugar crystals by image processing). *Pistas Educativas*, 43(140).