

Sistema para la estimación de área foliar de *Phaseolus vulgaris* L. mediante visión por computadora para instituciones educativas de bajo presupuesto.

Abstract—El consumo de frijol representa el 36% de la ingesta diaria de proteína para los mexicanos, además de proporcionar diferentes vitaminas y minerales, esto gracias a su amplia disponibilidad en todo el territorio mexicano y a su bajo costo en comparación con otros alimentos. En México se cultivan más de 50 variedades de frijol, alrededor de medio millón de productores se ven involucrados en su cultivo y el valor anual de la producción de frijol es de alrededor de 13 mil millones de pesos. Debido a la importancia del frijol, diversas instituciones de enseñanza e investigación agronómica se encuentran realizando hibridaciones con el fin de obtener variedades con una mayor producción, resistencia a climas hostiles, plagas y enfermedades. Una parte vital de estas investigaciones es la cuantificación del área foliar de las plantas ya que ésta se relaciona directamente con el crecimiento vegetal, la capacidad de realizar fotosíntesis y por ende de alimentarse, la sensibilidad al riego y al suministro de nutrientes, sin embargo, los equipos disponibles en el mercado para realizar la determinación de área foliar son costosos, lo que obstaculiza su uso por parte de instituciones con bajo presupuesto. Debido a esto las alternativas de bajo coste son una alternativa sumamente atractiva pues permiten acelerar los procesos de investigación sin necesidad de una gran inversión. Es por esto que se presenta un sistema para la estimación de área foliar de *Phaseolus vulgaris* L. de bajo costo el cual auxilie con las labores de investigación.

Index Terms—Estimación de área foliar, *Phaseolus vulgaris* L., hibridación, área foliar, visión por computadora, investigación, alimentación, software.

Abstract—The consumption of beans represents 36% of the daily protein intake for Mexicans, in addition to providing various vitamins and minerals. This is thanks to its wide availability throughout Mexican territory and its low cost compared to other foods. In Mexico, more than 50 varieties of beans are cultivated, with around half a million producers involved in their cultivation, and the annual value of bean production is around 13 billion pesos. Due to the importance of beans, various agronomic teaching and research institutions are conducting hybridizations to obtain varieties with higher production, resistance to hostile climates, pests, and diseases. A vital part of these investigations is the quantification of leaf area of the plants, as it is directly related to vegetative growth, the ability to photosynthesize, and therefore to feed, sensitivity to irrigation and nutrient supply. However, the equipment available in the market for determining leaf area is expensive, which hinders its use by institutions with limited budgets. Therefore, low-cost alternatives are a highly attractive option as they allow for speeding up research processes without the need for a large investment. This is why a low-cost system for estimating the leaf area of *Phaseolus vulgaris* L. is presented, which assists in the research work of institutions with limited budgets

Index Terms—Leaf area estimation, *Phaseolus vulgaris* L., hybridization, leaf area, computer vision, research, nutrition,

software.

I. INTRODUCCIÓN

LAS determinaciones de área foliar son muy usadas en la investigación agrícola, para su cuantificación existen equipos automáticos, pero costosos y de escasa disponibilidad [8].

El área foliar es una variable importante en la mayoría de los estudios agrícolas y fisiológicos involucrados en el crecimiento vegetal, captación de luz, eficiencia fotosintética, respiración, transpiración, y respuesta al riego y a la fertilización. La determinación del área foliar se realiza generalmente mediante métodos directos, en los cuales las hojas tomadas de las plantas en los experimentos se analizan con la ayuda de un medidor de área electrónico integrado. Éste, además de ser un método destructivo, se restringe a la disponibilidad del equipo [5].

El área foliar es una variable fundamental para el estudio y crecimiento de cultivos. Además, es la base para estimar los requerimientos hídricos, nutricionales, eficiencia bioenergética y para determinar el potencial de daños fitosanitarios. Existe una estrecha relación entre el área foliar y la intercepción de la radiación solar, asociada con la fotosíntesis y con los procesos transpirativos; aspectos fuertemente vinculados con la acumulación de la biomasa y la productividad. Por lo tanto, el área foliar es una variable para cuantificar el crecimiento y rendimiento agronómico de los cultivos [7].

La estimación rápida, objetiva y confiable del área foliar es esencial en numerosos estudios de fisiología vegetal; sin embargo, ésta se realiza usualmente mediante métodos destructivos o depende de la disponibilidad de medidores electrónicos integrados, costosos y sofisticados [1].

Los métodos para medir el área foliar incluyen el uso de papel milimétrico, gravimetría, planimetría manual y fotoeléctrica, registro de largo y ancho o mediante la combinación de dos o más de estos procedimientos y análisis con regresión lineal para obtener modelos empíricos, que facilitan e incluso permiten estimar el área foliar de manera no destructiva y con exactitud, pero la estimación es errónea cuando la variación en el tamaño y forma de la hoja es amplia. Además, los métodos convencionales son laboriosos y tardados, pues miden por separado cada hoja [11].

El frijol pertenece a la familia Fabacea, subfamilia Papilion-aideae, tribu Phaseolae y especie *Phaseolus vulgaris* L. Por su alto contenido proteico (20 – 25%) es, entre las leguminosas,

el tercer cultivo más importante en el mundo, después de la soya y el cacahuete. Como la mayoría de las leguminosas, sus proteínas son deficientes en aminoácidos azufrados como la metionina y cisteína, sin embargo, una ingesta regular del frijol favorece en la disminución de los niveles de colesterol y reduce los riesgos de padecer cáncer. Particularmente en México, el frijol es la leguminosa de mayor consumo humano y representa el 36% de la ingesta diaria de proteínas [10].

En México, el grano del frijol por su alto contenido de proteína es básico para la alimentación de su población; ocupa el segundo lugar en importancia nacional después del maíz. El frijol es una leguminosa que constituye una fuente de proteínas de hidratos de carbono natural: además es abundante en vitamina B como: niacina, ácido fólico y tiamina, también proporciona hierro, zinc, fósforo, potasio, magnesio y calcio. Existen múltiples variedades de frijol que se caracterizan por su tamaño, color, forma y tipo de crecimiento [9].

El frijol se encuentra en todas las regiones agrícolas del país, existen diversas clases de frijol como lo son negros, amarillos, blancos, morados, bayos, pintos y moteados. Más de 570 mil productores en el país participan de manera directa en su cultivo, genera más de 382 mil empleos permanentes y el valor anual de la producción es de alrededor de 13 mil millones de pesos [3].

El frijol es importante para el suelo porque las bacterias de sus raíces fijan el nitrógeno del aire, lo que proporciona compuestos nitrogenados a las raíces del maíz. Las leguminosas se asocian con bacterias del suelo llamadas rizobias, que pueden fijar el nitrógeno atmosférico y hacer solubles los iones de elementos como los fosfatos de calcio y hierro. Esto permite que las plantas puedan aprovechar esos nutrientes. El frijol también funciona como abono verde, ya que su follaje mejora el suelo, evita la erosión hídrica, conserva la humedad y previene la invasión de plagas [6].

La pobreza en las escuelas rurales mexicanas se caracteriza por una falta de recursos didácticos, pedagógicos y falta de conocimiento sobre el manejo de la tecnología. La falta de recursos didácticos y ambientes de aprendizaje adecuados limita la calidad de la enseñanza [2].

En 2016, la subsecretaría de Educación Media Superior de México creó 2 mil 825 centros de bachillerato agropecuarios en comunidades rurales con menos de 2 mil 500 habitantes, alcanzando una matrícula de 104 mil alumnos, de dicha matrícula el 15.3% de los alumnos son hablantes de una lengua indígena [4].

II. METODOLOGÍA

El uso de un modelo de análisis cuantitativo basado en el procesamiento de imágenes digitales mediante visión por computadora permitió desarrollar un método automatizado y preciso (con un margen de error mínimo) para medir el área foliar de una hoja de frijol, donde se usó como referencia de escala una línea negra, a continuación, se detallan las etapas que conforman el proceso del modelo.

A. Implementación

Desarrollar un sistema embebido capaz de medir el área foliar con la combinación de hardware y potenciada por

software. La implementación se dió mediante un sistema de referencia con una línea negra de longitud conocida, la cual facilita la determinación de la escala para la medición precisa del área foliar bajo diferentes condiciones de uso (posición de la cámara, altura de la cámara, iluminación, etcétera).

B. Componentes técnicos

Cámara integrada de un teléfono celular, dispositivo para colocar las hojas a medir.

C. Implementación del software

a. Se desarrolló una interfaz gráfica (GUI) utilizando la biblioteca Tkinter (Biblioteca gráfica) para gestionar la interacción del usuario con respecto a la captura de imágenes y muestra de resultados.

b. Pandas para la gestión de datos.

c. El software se programó en Python, integrando las bibliotecas: Pillow, OpenCV, Numpy y xlswriter para el procesamiento de las imágenes, su visualización y guardado de datos (generación de informes).

D. Gestión inicial

a. Se inicializó el entorno de trabajo creando una estructura de carpetas las cuales sirven para guardar las imágenes capturadas, así como un archivo de Excel para registrar los resultados.

b. Se configuró la cámara integrada de un teléfono celular conectado al computador mediante 'cv2.VideoCapture', ajustando el índice para acceder al dispositivo correcto, así como la interfaz gráfica para su posterior uso.

E. Captura de imágenes

La cámara integrada captura imágenes en tiempo real proporcionando una transmisión continua de datos. En la interfaz, el software dibuja una línea divisoria que separa el área de trabajo de la hoja de frijol u objeto plano del cual se desee medir su área de la sección utilizada para la referencia de longitud.

F. Detección y medición

a. La medición de la longitud de referencia se da cuando el software aplica una transformación morfológica para mejorar la detección de una línea de referencia del mundo real (para esta metodología: 1 centímetro de longitud) que será utilizada para calcular la relación de píxeles por la unidad de medida.

b. Cálculo del área (foliar) acontece cuando se extraen los contornos de la sección de la hoja a través de un umbral, donde se obtiene el área que luego es convertida en unidades de medida reales para calcular su relación de píxeles previamente obtenida.

G. Almacenamiento del informe de sesión

Los resultados obtenidos como el área foliar y la longitud de referencia se almacenan en varios archivos.png y una tabla de datos Excel, donde se incluye el nombre, la fecha, la hora y ruta de cada imagen para su referencia.

H. Visualización de informes y resultados.

El software proporciona un apartado de visualización por carpetas y consulta de los datos guardados. Permite abrir el Excel y las imágenes guardadas para una evaluación detallada con el fin de verificar resultados y ofrecer una base de datos organizada para un futuro análisis y/o consulta.



Ilustración 1: Interfaz gráfica.

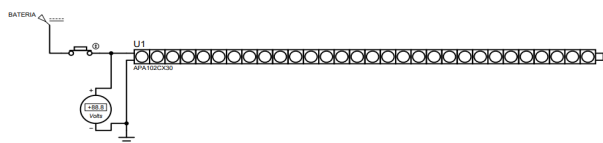


Ilustración 2: Esquématico eléctrico de la caja negra.

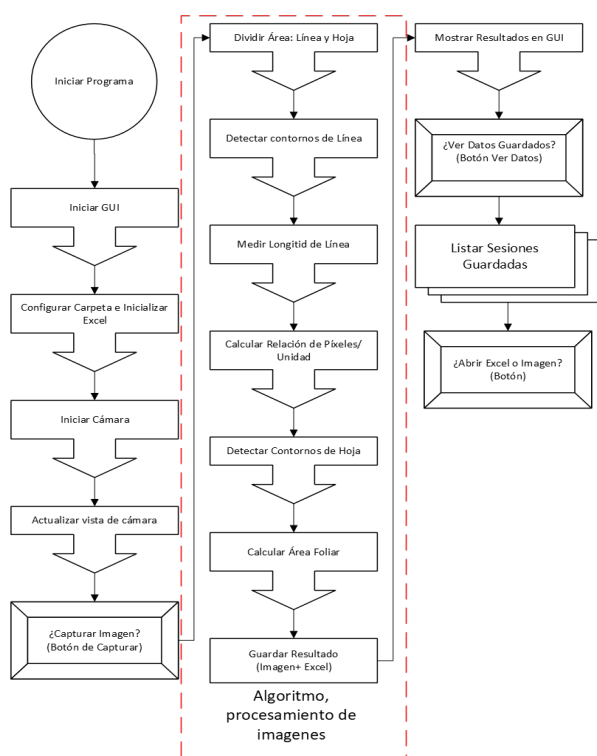


Ilustración 3: Diagrama de bloques del sistema embebido.

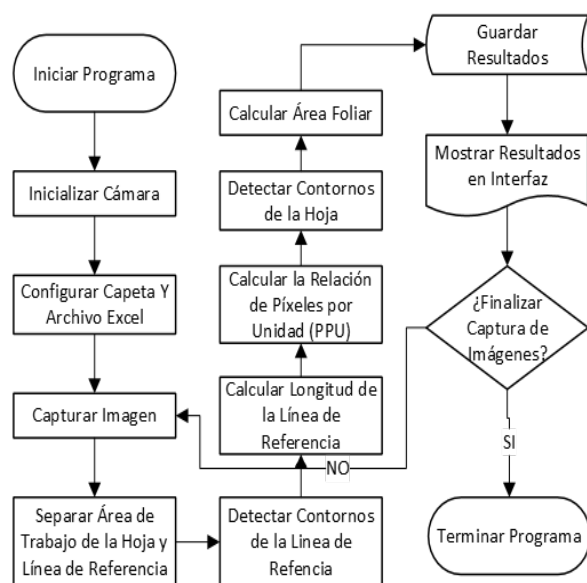


Ilustración 4: Diagrama de flujo del programa.

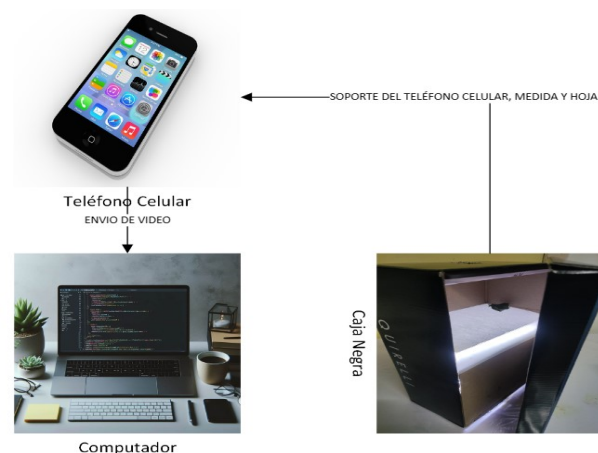


Ilustración 5: Relación entre los componentes de hardware (sistema embebido).

Pseudo código del programa en Python

1. Importar Módulos Necesarios

o Importa bibliotecas: Tkinter (interfaz gráfica), OpenCV (cv2), xlswriter, PIL y otras.

2. Definir Funciones

o `cargar_imagen(imagen)`: Extrae la región de interés de la imagen.

o `medir_longitud_linea(imagen)`: Detecta y calcula la longitud de la línea en la imagen.

o `calcular_area_hoja(imagen, PIXELS_PER_UNIT)`: Calcula el área

de la hoja usandola proporción de píxeles por unidad.

3. Definir Clase Principal (LeafAreaCameraApp)

o Inicialización (___init___)

- Configura la ventana principal, inicializa la cámara, botones y variables para datos de sesión.

o update_camera()

- Captura la imagen de la cámara, la procesa en tiempo real, y superpone información.

o Funciones de Detección de Contornos

- detectar_contornos_hoja(imagen): Devuelve los contornos de la hoja en la imagen dada.

- detectar_contornos_linea(imagen): Encuentra los contornos de la línea.

o ajustar_medida()

- Permite al usuario definir una medida de referencia.

o process_image()

- Captura y procesa una imagen para calcular longitud y área, luego guarda la imagen con la información superpuesta.

o Gestión de Datos Guardados

- save_excel(): Exporta los datos recopilados a un archivo Excel.

- listar_carpetas(): Devuelve las carpetas de sesiones anteriores.

- mostrar_datos_guardados(): Configura una ventana para ver datos guardados.

- cargar_sesion(session): Carga los datos de una sesión.

- actualizar_datos_guardados(): Actualiza la vista de datos.

o Abrir Archivos

- open_excel(): Abre el archivo Excel de

una sesión.

- open_image(image_path): Abre una imagen específica.

4. Ejecutar la Aplicación

o Crear una instancia de LeafAreaCameraApp y ejecutar el bucle principal de Tkinter.

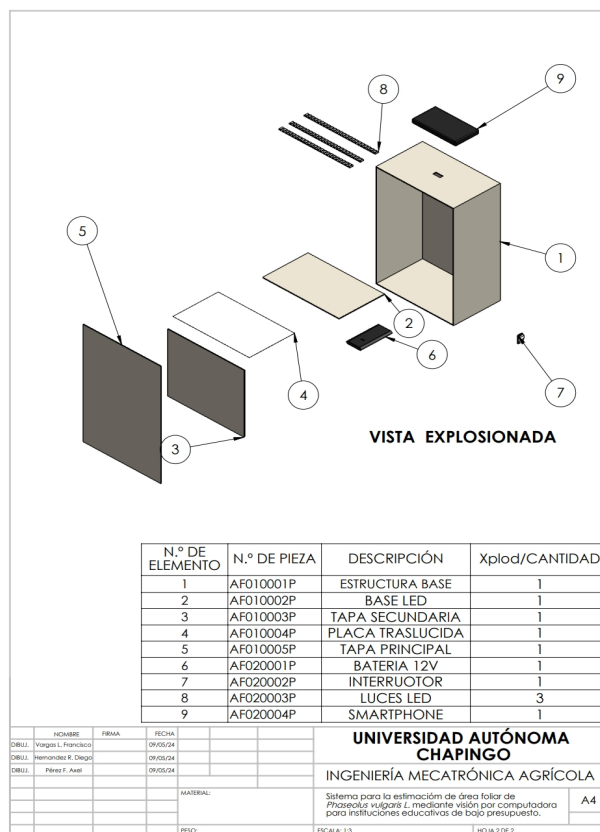


Ilustración 6: Diseño en SolidWorks del prototipo.

El sistema embebido (Ilustración 5) mediante la cámara del teléfono celular captura imágenes, los expone en la interfaz gráfica con una división clara (Ilustración 7), de lado izquierdo el área de trabajo (la hoja) y de lado derecho, la referencia (medida real) lineal (en magenta) con la cual el software determinara la escala de trabajo y de manera rápida el área (en rojo) de la hoja preliminar con el fin de tener una certeza visual de que el software si detecta la hoja y línea respectivamente. Al capturar la imagen, por defecto determina la longitud de la línea detectada a 1 centímetro, pero puede cambiarse de manera manual a cualquier otra magnitud, posteriormente se procesa el área real de la hoja y muestra en la parte inferior de la interfaz las magnitudes del largo de la referencia, así como el área real de la hoja. La imagen capturada se guarda en una carpeta anexando los datos característicos de la imagen (Ilustración 12), así como en el archivo Excel; estos pueden ser consultados para futuras referencias (Ilustración 1).

III. RESULTADOS

Las pruebas realizadas y los resultados obtenidos se realizaron utilizando hojas de *Phaseolus vulgaris* L. de distintos tamaños y en distintas etapas fenológicas.

Prueba 1: La hoja 1 se midió con el método tradicional con una hoja milimétrica, comparado con el software de visión por computadora, el error es de 11 milímetros cuadrados.

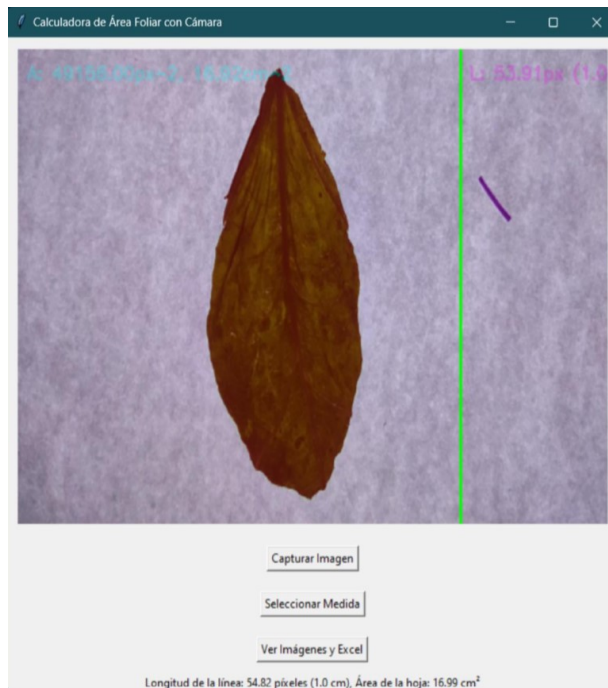


Ilustración 7: Interfaz del software con el resultado obtenido.

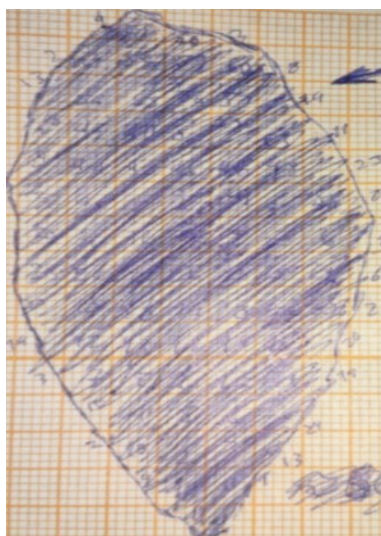


Ilustración 8: Medición realizada mediante la forma tradicional.

El área total de la sombra de la hoja sobre el papel milimétrico es de aproximadamente 1688 milímetros cuadrados (mm^2), por lo tanto se puede afirmar que existe un margen de error de 11 mm^2 (0.65%) con respecto al resultado ofrecido por el software.

Prueba 2: En la hoja 2, se puede apreciar el cambio en las condiciones de iluminación y la altura del punto de vista de la cámara, siendo el sistema adaptable a diversas condiciones del entorno.

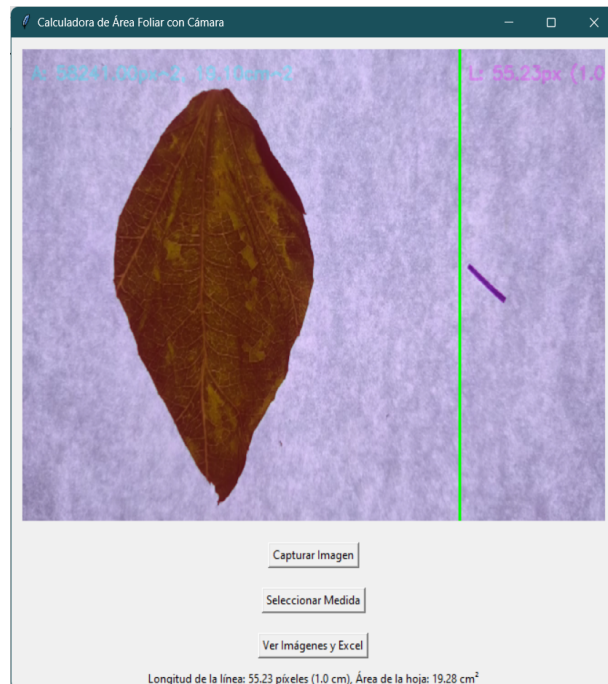


Ilustración 9: Resultado obtenido al variar la iluminación y altura de captura.

Prueba 3: La hoja 3, al principio se le puede apreciar de manera completa, posteriormente para fines demostrativos, se le hizo un agujero con el fin de mostrar que el área real siempre será correcta con respecto al área de referencia y por último, se muestra la imagen con los datos de caracterización necesarios para su posterior consulta.

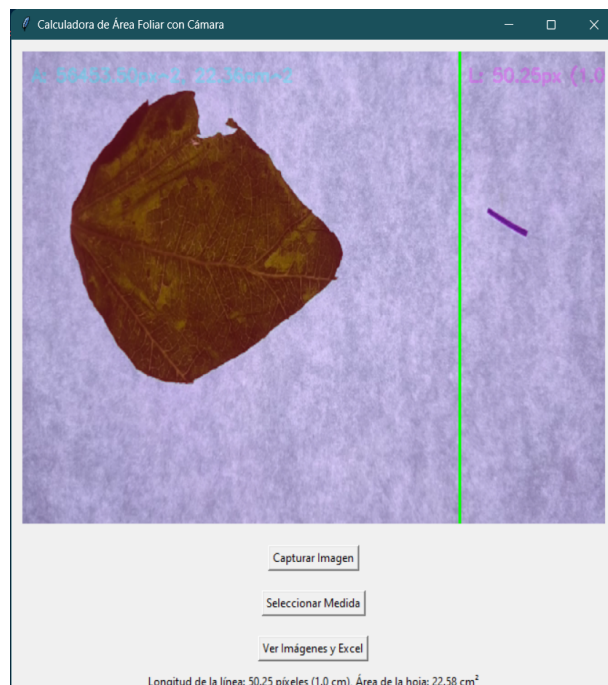


Ilustración 10: Hoja completa.



Ilustración 11: Hoja agujerada.

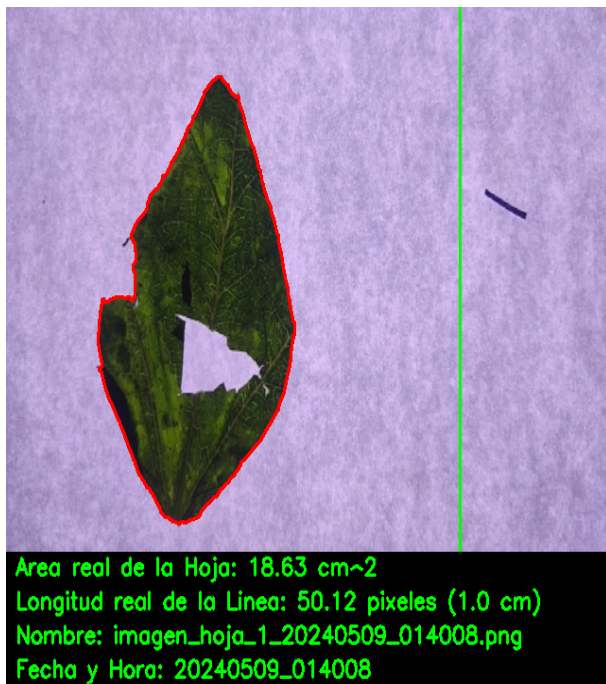


Ilustración 12: Imagen caracterizada para consulta en la base de datos.

IV. CONCLUSIÓN

Dado que el frijol esta presente en la vida cotidiana del mexicano, su importancia en la investigación para el desarrollo de mejoras a la planta cobra relevancia y dado que el acceso a la tecnología de 'precisión' en México es caro; a través de un sistema embebido y mediante el uso de la visión por computadora se pretende resolver de manera rápida y económica el aspecto de la medición foliar del frijol. La medición con el

software desarrollado es aceptable, variando con un margen de error pequeño comparado con el método de medición manual de estimación de áreas con hojas milimétricas, con un error aproximado menor al 1%. Suficiente para ciertos trabajos de investigación académica donde se prime la rapidez de la captura y/o procesamiento de datos. Si bien el software tiene un margen de error aceptable para ciertas aplicaciones, también tiene el potencial de ser usado para medir otras hojas de diversas plantas, así como superficies planas en general.

V. REFERENCIAS

- [1] Casierra-Posada, Fánor, Peña Z., Germán Ricardo, Peña-Olmos, Jaime E.. (2008). ESTIMACIÓN INDIRECTA DEL ÁREA FOLIAR EN *Fragaria vesca* L., *Physalis peruviana* L., *Acca sellowiana* (Berg.) Burret, *Rubus glaucus* L., *Passiflora mollissima* (Kunth) L. H. Bailey Y *Ficus carica* L.. Revista U.D.C.A Actualidad Divulgación Científica, 11(1), 95-102. Retrieved May 08, 2024, from <http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sciarttextpid=S0123-42262008000100012&lng=es>.
- [2] García, R., Villacrés, F. (2018). Crisis de la escuela rural, una realidad silenciada y su lucha para seguir adelante.
- [3] Gobierno de México. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2022, 26 de octubre). La importancia de la producción de frijol en México. Recuperado de <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/la-importancia-de-la-produccion-de-frijol-en-mexico?idiom=es>
- [4] Gobierno de México, Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal. (2017, 30 de junio). Escuelas rurales: El concepto educativo de José Vasconcelos para unificar culturalmente al país. Recuperado de [\[https://www.gob.mx/inafed/articulos/escuelas-rurales-el-concepto-educativo-de-jose-vasconcelos-para-unificar-culturalmente-al-pais\]](https://www.gob.mx/inafed/articulos/escuelas-rurales-el-concepto-educativo-de-jose-vasconcelos-para-unificar-culturalmente-al-pais).
- [5] Hernández-López, Víctor M., Vargas-Vázquez, Ma. Luisa P., Muruaga-Martínez, José S., Hernández-Delgado, Sanjuana, Mayek-Pérez, Netzahualcóyotl. (2013). Origen, domesticación y diversificación del frijol común: Avances y perspectivas. Revista fitotecnica mexicana, 36(2), 95-104. Recuperado en 07 de mayo de 2024, de <http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sciarttextpid=S0187-73802013000200002&lng=es>.
- [6] Matías-Ramos, Moisés, Hidalgo-Moreno, Claudia Isabel, Fuentes-Ponce, Mariela, Delgadillo-Martínez, Julián, Etchevers, Jorge Dionisio. (2023). Potencial de especies de leguminosas mejoradoras de la fertilidad del suelo en regiones tropicales. Revista mexicana de ciencias agrícolas, 14(4), 531-541. Epub 04 de agosto de 2023. <https://doi.org/10.29312/remexca.v14i4.3152>
- [7] Mendoza-Pérez, Cándido, Ramírez-Ayala, Carlos, Ojeda-Bustamante, Waldo, Flores-Magdaleno, Héctor. (2017). Estimación de índice de área foliar y rendimiento de chile poblano cultivado en invernadero. Ingeniería agrícola y biosistemas, 9(1), 37-50. Epub 28 de agosto de 2020. <https://doi.org/10.5154/r.inagbi.2017.04.009>
- [8] Rincón Guerrero, N., Olarte Quintero, M. A., Pérez Naranjo, J. C. (2015). Determinación del área foliar mediante

técnicas indirectas. Revista Facultad Nacional de Agronomía - Medellín, 65.

[9] Sangerman-Jarquín, Dora Ma., Acosta-Gallego, Jorge A., Schwenstesius de Rindermann, Rita, Damián Huato, Miguel Ángel, Larqué Saavedra, Bertha Sofía. (2010). Consideraciones e importancia social en torno al cultivo del frijol en el centro de México. Revista mexicana de ciencias agrícolas, 1(3), 363-380. Recuperado el 07 de mayo de 2024, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342010000300007&lng=est&lng=es.

[10] Universidad Nacional Autónoma de México. (2015, 1 de febrero). El cultivo del frijol en México. Revista de la UNAM, 16(2). Recuperado de <https://www.revista.unam.mx/vol.16/num2/art09/>

[11] Saucedo-Acosta, C. P., González-Hernández, V. A., Sánchez-Soto, B. H., Saucedo-Acosta, R. H., Ramírez-Tobías, H. M., Quintana-Quiroz, J. G. (2017). MACF-II, método automatizado para medir color y área foliar mediante imágenes digitales. Agrociencia, 51(4), 409-423.