

Software de Control para Brazo Manipulador empleado en la recolección de la cereza del café

RESUMEN: En el escrito se presenta el desarrollo de una propuesta de diseño de un algoritmo de control para un brazo manipulador que tendrá como tarea realizar la cosecha de los granos de café que se encuentren en condiciones de ser cosechados. La problemática se detectó en la zona cafetalera que se encuentra en la región de influencia del municipio de Teziutlán. El trabajo consiste en el desarrollo de un algoritmo computacional, el cual permite el reconocimiento a través de una red neuronal de los granos de café que se encuentren en condiciones de ser recolectados, así como realicé el cálculo de los ángulos que han de adoptar los actuadores que conforman el tren motriz del sistema mecánico. Para lograr esto es necesario el desarrollo y entrenamiento de una red neuronal de las de nominadas convolucionales que permita distinguir entre los frutos, los granos que se encuentran en maduración y las cerezas del café, de igual forma el programa tendrá la capacidad de determinar la distancia a la que se encuentra el fruto, para esta sección de código se toma de base el reconocimiento de patrones ArUco y mediante esta se logra determinar la citada distancia; finalmente con la información recabada se calculan los ángulos que deberán asumir las partes móviles. La relevancia del trabajo radica en impacto con los cafecultores de la región que debido a que el cultivo de café a dejado de ser atractivo debido a los altos costos de producción, por lo que se planea el desarrollo del proyecto esperando que al implementarse se logre abatir los costos y que los sembradíos se vean incrementados beneficiando económicamente a los productores y personas relacionadas con el cultivo de café

PALABRAS CLAVE: Redes neuronales convolucionales, marcadores ArUco, Brazo manipulador, Cosecha de café.



Colaboración

Alfredo Carrasco Aráoz; Mario Andrés Paredes Valverde; Luis Manuel García Martínez; Binisa Noemi Rivas Carrasco, Instituto Tecnológico de Teziutlan

Fecha de recepción: 16 de septiembre de 2024

Fecha de aceptación: 11 de octubre de 2024

ABSTRACT: The paper presents the development of a design proposal for a control algorithm for a manipulator arm that will have the task of harvesting coffee beans that are ready to be harvested. The problem was detected in the coffee-growing area located in the region of influence of the municipality of Teziutlán. The work consists of the development of a computational algorithm, which allows the recognition through a neural network of the coffee beans that are ready to be harvested, as well as the calculation of the angles that the actuators must adopt. that make up the drive train of the mechanical system. To achieve this, it is necessary to develop and train a convolutional neural network that allows us to distinguish between fruits, ripening beans and coffee cherries. In the same way, the program will have the ability to determine the distance where the fruit is located, for this section of code the ArUco pattern recognition is used as a basis and through this it is possible to determine the aforementioned distance; Finally, with the information collected, the angles that the moving parts must assume are calculated. The relevance of the work lies in its impact on coffee growers in the region, since coffee cultivation is no longer attractive due to the high production costs, so the development of the project is planned, hoping that when implemented it will be able to reduce costs and that crops are increased, economically benefiting producers and people related to coffee cultivation.

KEYWORDS: Convolutional Neural Networks, ArUco Markers, Robotic Arm, Coffee Harvesting.

INTRODUCCIÓN

México heredero de una gran tradición en el cultivo de café, lo ha llevado a posicionarse en los primeros lugares a nivel mundial en la producción del aromático grano donde se sitúan países como Brasil, Colombia, Vietnam por citar algunos. En México la producción anual alcanzada en los últimos años es de alrededor de 3600,000 sacos de café (60 Kg por saco) por año, esta cantidad en años anteriores fue superada, la principal razón que mermo la producción de exportación fue que el precio del grano cayó, lo que lo vuelve poco atractivo su cultivo a los productores [1] [2].

En la República Mexicana estados como Veracruz, Oaxaca, Chiapas, Guerrero y Puebla lideran en el cultivo del café. Particularmente el estado de Puebla, ocupa el tercer lugar en la producción de semillas de café, donde destaca la Sierra Nororiental, como una de las zonas de mayor relevancia en el cultivo ya que contribuye con más de 18,500 toneladas del citado grano, las cuales, son exportadas a diversas latitudes, debido a su calidad, misma que cumple con los estándares impuestos por el mercado internacional [3].

En el año de 2019 la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) anuncio que los municipios que cuentan con la mayor producción de café en la sierra nororiental pertenecen a zona de influencia en la región de Teziutlán donde pertenecen: Hueyapan, Hueytamalco, Teziutlán Tlatlauquitepec, Venustiano Carranza y Zacapoaxtla, quienes tienen un aporte importante con más de 10,000 toneladas anuales [4] [5].

El estado de Puebla contribuye de manera importante en la producción de café en la república mexicana ya que cuenta con 70, 438.4 hectáreas en donde se cultivan y se recolectan 128,995.35 toneladas del grano aromático, con las que alcanza el tercer lugar en la producción nacional y el cuarto en superficie cultivable. [4].

Con los datos del Sistema Nacional de Información para el Desarrollo Rural Sustentable (SIAP) [4] la producción anual de café en el estado de Puebla alcanzó un valor comercial de 889.4 millones de pesos esta misma dependencia indica que son 54 municipios quienes forman el padrón de productores del aromático, de los cuales Cuetzalan del Progreso, Hueyapan, Hueytamalco, Teziutlán, Tlatlauquitepec y Zacapoaxtla, forman la zona de influencia en la región de Teziutlán; de igual forma al ser un municipio que se encuentra en colindancia con el estado de Veracruz se tiene acceso a otros cafetales cercanos como lo es, el cafetalero Xanát Café, que se encuentra ubicado en la comunidad Las Truchas, municipio de Altotonga, en el estado de Veracruz.

La región de Teziutlán se encuentra situada en la sierra nororiental del Estado de Puebla, el clima cálido y húmedo característico de bosque mesófilo [6], la orografía predominante de estos bosques es agreste e irregular al contar con terrenos con esta singularidad muchos cafetales se encuentran plantados en altitudes comprendidas entre los 800 y 2400 metros sobre el nivel medio del mar, poblaciones como Teziutlán, Cuetzalan y Xicotepec son idóneas para el cultivo del café llamado de altura el cual cumple con la calidad para ser un producto de exportación.

En entrevista con el señor Aquilino Santillán López propietario del cafetalero Xanát Café donde se realizará el proyecto; la entrevista fue realizada para co-

nocer las actividades y forma de cultivo del café, en ella comento que la recolección del grano en las condiciones climáticas donde se encuentran los cafetales (lluvioso y húmedo) en ocasiones se tornan peligrosas las actividades de la recolección de del furto del café acarreado con esto que los recolectores puedan sufrir lesiones de consideración [7].

Para dar solución a la problemática se propone realizar un dron recolector el cual tenga la capacidad de realizar la recolección de los granos de café que se encuentran en condiciones de ser cosechados. Para lograr este objetivo es preciso dividir el proyecto en dos partes la primera el diseño de la aeronave de recolección que tendrá la tarea de llevar los granos de café hacia un punto de acopio y la segunda en la que cae el interés de este trabajo, que consiste en el diseño de un brazo manipulador que pueda retirar los granos de la planta sin causar daño a los que aún no tengan que ser cosechados, así como el software de control de este.

Por lo tanto, el presente trabajo presenta los resultados del diseño del algoritmo de control que se utilizará para guiar al brazo manipulador para que realice la tarea de recolección de la cereza de café (como se le llama comúnmente en el argot de los cafecultores), en este punto se aborda la metodología empleada para la identificación del fruto que se encuentre en condiciones de ser recolectado así como la extracción de las coordenadas donde se encuentra el grano de café, para que posteriormente se genere la trayectoria que guiará al manipulador.

Para lograr el cometido de la identificación y clasificación de las imágenes captadas por la cámara se hace uso de algoritmos utilizados por la visión artificial la cual se apoya en las redes neuronales artificiales en este caso se emplearán las denominadas redes neuronales convolucionales mismas que han demostrado tener mayor eficacia en los clasificadores utilizados en el reconocimiento de patrones, así como en la segmentación de imágenes [8] [9] [10] [11] [12] [13].

Finalmente es menester mencionar que el empleo de los drones en la agricultura a últimas fechas se han convertido en una herramienta de uso común en la agricultura en tareas tan diversas como: agricultura de precisión donde recolectan datos que permiten tomar decisiones sobre el rumbo de la cosecha; la dispersión de agroquímicos y en la inspección del estado de las plantas [14] [15] [16] [17]

MATERIAL Y MÉTODOS

La propuesta consiste en desarrollar una aeronave no tripulada, que de manera autónoma realice la recolección del grano para su beneficio, para llevar a cabo esta tarea, se deberá dotar al dron con un brazo manipulador pensado en emular el movimiento del brazo

humano, así como un actuador que permita desprender la cereza de café de forma adecuada para evitar daños permanentes en la planta de café.

Tras tres iteraciones se llegó a un prototipo que cumpliera con los criterios de diseño que se establecieron con antelación, con base en lo siguiente:

- Existen 2 eslabones que integran el brazo manipulador, el eslabón primero "Hombro" tiene 90° de libertad de movimiento en "Y" y el eslabón "Brazo" tiene 180° de movimiento en "Y", este segundo es el que va a recibir al actuador final que recolectará los frutos.
- Se diseñó la base teniendo en cuenta el equilibrio con respecto del centro de gravedad del robot, lo cual permitió que el brazo se mantenga en su posición equilibrada durante su ejecución.
- La cámara se ubica en la parte superior del hombro del brazo dejando totalmente libre al brazo manipulador.
- El peso del manipulador es menor que al propuesto de 800 gramos propuesto como límite, siendo un factor importante al tomar en cuenta debido a la máxima carga útil con la que cuenta el dron.

La Tabla 1 muestra la ponderación establecida para los parámetros de selección, el dispositivo debería de cumplir con: una funcionalidad que le permitiera cumplir con la tarea para la cual sería diseñado, el peso es otro factor importante a tener en cuenta ya que el brazo deberá de ir adosado a una maquina voladora y como es sabido cuanto mayor sea el peso a levantar el consumo energético se incrementa, de igual forma es importante tener un mecanismo confiable para que el porcentaje de falla sea el menor posible, finalmente el tamaño y la forma son considerados para lograr una propuesta acorde al tamaño de la máquina que lo transportará.

Tabla 1. Ponderación establecida para la selección de la iteración de diseño.

Característica	Ponderación
Funcionalidad - 30%	27 %
Peso - 30 %	30 %
Confiabilidad - 20 %	17 %
Forma - 10 %	10 %
Tamaño - 10 %	10 %

Fuente: Elaboración propia 2024.

Al realizar la suma de las ponderaciones de los criterios de diseño se obtiene el 94 % porcentaje que permite concluir que el mecanismo diseñado tendrá un desempeño adecuado.

El diseño se caracteriza por tener los motores que le dan la movilidad concentrados en la parte superior lo más cerca del centro de masa del dron en lo que se interpretaría como el hombro del brazo Figura 1.

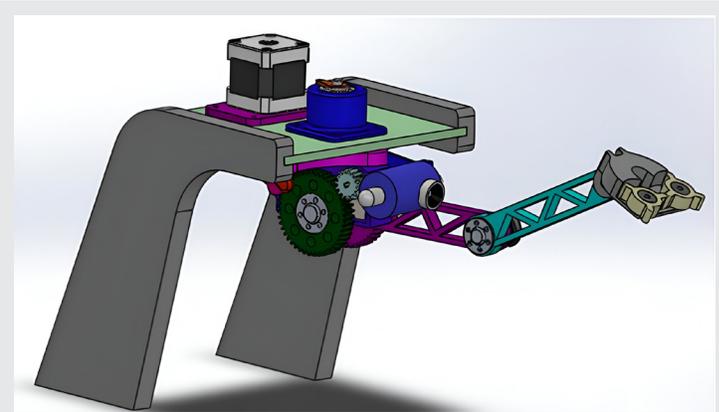


Figura 1. Iteración final del diseño del brazo manipulador, la imagen muestra el brazo montado en una base que ocupa el lugar del dron donde se montará.

Fuente: Elaboración propia 2024.

De igual forma se muestra que el brazo se montará en una base provisional para realizar pruebas, para simular el movimiento del dron sobre el eje vertical se aprovisionó con un motor que brindará la movilidad necesaria, la Figura 2 muestra la construcción del prototipo funcional a escala el cual fue construido con materia PLA utilizando técnicas de manufactura aditiva.



Figura 2. Ensamble de las partes del brazo en la base de pruebas.

Fuente: Elaboración propia 2024.

Para poder generar el software de control que guiará al sistema, es menester fijar un punto de partida para el diseño del algoritmo de control como primer punto es necesario mencionar que el proyecto debido a su complejidad se divide en dos partes para su desarrollo: I primera control del brazo manipulador, segunda, control de vuelo en este trabajo se presentan los resultados de la primera parte del proyecto.

A partir del empleo de técnicas de visión artificial se realiza el control de las articulaciones del brazo mecánico, ya que han demostrado que su aplicación industrial, tanto que hoy en día es una de las herramientas más utilizadas para el control de la calidad [18].

Como se mencionó el sistema emplea la visión artificial como base para el reconocimiento de los frutos esto se realiza propiamente dicho mediante el empleo de algoritmos de clasificación fundamentados en las redes neuronales ya sean densas o convolucionales ya que estas son ampliamente utilizadas en la segmentación y clasificación de imágenes [19] [20] [21] [22] [23] [24].

Antes de pasar a la descripción de la solución es necesario mencionar los principales requerimientos que definen el programa de cómputo:

- La interfaz tendrá dos formas de trabajo la forma manual y la forma autónoma.
- El sistema podrá determinar las coordenadas donde se encuentre el fruto en la pantalla.
- El software podrá determinar la distancia entre la cereza y el brazo manipulador.
- El algoritmo determinara los ángulos de los elementos que forman el brazo manipulador.

Para el análisis de la imagen se emplea la librería de Open CV versión 4.10.0.84 compatible con la versión 3.12 de Python, así como para el diseño del modelo se utiliza la librería Tensor Flow y el entrenamiento se hizo utilizando el proyecto Google Colaborativo que permite el entrenamiento en la nube utilizando los recursos de Google.

Dentro de las actividades desarrolladas en la ejecución del proyecto una de la destacadas es la conformación del conjunto de datos (data set) necesarios para el entrenamiento del modelo convolucional que servirá de base para el clasificador, por el que decanta debido a que por su estructura ofrece mejores resultados en tareas de clasificación; para lograr conjuntar las imágenes necesarias se realizó una visita al cafetalero Xanat y a otros dos cafetaleros (cuyos nombres se reservan a petición de los dueños de los cafetales) como resultado se obtuvieron alrededor de 700 imágenes Figura 3 las cuales fueron limpiadas, etiquetadas, separadas en tres clases y finalmente divididas en tres grupos: imágenes de entrenamiento, imágenes de validación e imágenes de prueba.

El paso siguiente es diseñar el modelo de la red neuronal convolucional a utilizar para este caso se propone una red compuesta por dos capas convolucionales y dos capas densas.



Figura 3. Imagen de los granos de café en su estado nativo
Fuente: Elaboración propia.

Antes de proceder con el entrenamiento es necesario normalizar las imágenes, así como incrementar el número de las mismas con la herramienta de "preprocessing" la cual viene incluida en la librería de Keras, en la Figura 4 se muestra el fragmento de código que se empleó.

En el código mostrado muestra cómo se normalizan los píxeles de la imagen a valores comprendidos entre 0 y 1, al dividirlos entre 255 que es el valor máximo que puede tener un pixel, y de igual manera se reescalan las imágenes, para que tengan el tamaño del tensor de entrada de la red.

```
#preparamos las imagenes imagenes de entrenamiento
entrenamiento_datagen = tf.keras.preprocessing.image.ImageDataGenerator(
    rescale=1. / 255,
    shear_range=0.2,
    zoom_range=0.2,
    horizontal_flip=True)

test_datagen = tf.keras.preprocessing.image.ImageDataGenerator(rescale=1. / 255)

entrenamiento_generador = entrenamiento_datagen.flow_from_directory(
    data_entrenamiento,
    target_size=(altura, longitud),
    batch_size=batch_size,
    class_mode='categorical')

validacion_generador = test_datagen.flow_from_directory(
    data_validacion,
    target_size=(altura, longitud),
    batch_size=batch_size,
    class_mode='categorical')
```

Figura 4. Segmento de código utilizado para preparar las imágenes para el entrenamiento del clasificador.
Fuente: Elaboración propia.

Antes de describir las características de la red neuronal que se utilizará es necesario mencionar la secuencia que llevara la información durante su procesamiento: como primer paso se captura la imagen por la cámara, la imagen introduce a la red neuronal del tipo convolucional la cual fungirá como clasificador, tras salir del clasificador si el fruto no es apto

para la cosecha la información se guarda en un archivo separado por comas; si el fruto se encuentra maduro se determina la distancia del fruto con respecto a la cámara y la posición del fruto en la imagen, con las coordenadas de la posición se calculan los ángulos que han de guardar los elementos que conforman el brazo manipulador las ordenes se mandan a los actuadores mediante el uso de comunicación serial la Figura 5 muestra el diagrama de flujo del algoritmo de control.

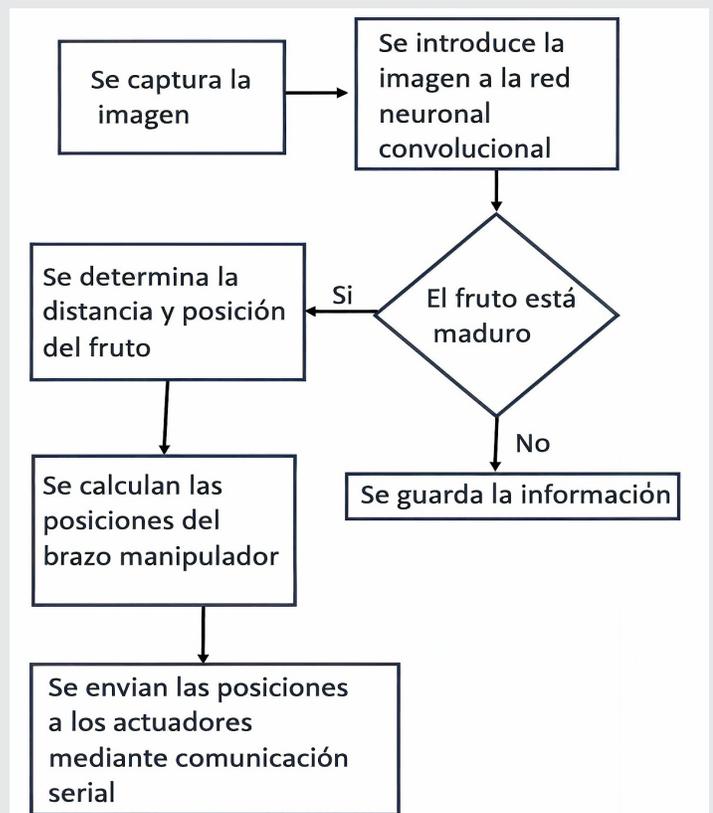


Figura 5. Diagrama de flujo del algoritmo de control del brazo manipulador.
Fuente: Elaboración propia 2024.

La topología utilizada para la red que dará origen al clasificador Figura 6 como se mencionó consta de dos capas convolucionales, la primera cuenta con 32 filtros y la segunda con 64 filtros; en las dos se utiliza la técnica del “maxpooling” con un factor de 2 lo que indica una reducción de la información, para mejorar el entrenamiento se propone un “Dropout” de 0.5 es decir se des habilitan la mitad de las neuronas aleatoriamente, las capas densas están formadas por una capa “Flaten” de entrada seguida de una formada por 256 neuronas con la función de activación “relu”, finalizando con una capa densa de 3 neuronas que corresponden a las tres clases de salida del clasificador esta capa utiliza la función de activación “softmax” que ha de mostrado ser más eficiente en las tareas de clasificación, cabe mencionar que este proceso se realizó utilizando los recursos de Google colaborativo.

```

'''creamos el modelo convolucional conformado por dos capas de filtros
la primera con 32 y la segunda con 64,'''
modeloCNN = tf.keras.models.Sequential([
    tf.keras.layers.Conv2D(32, (3,3), activation='relu',
        input_shape=(150, 150, 3)),
    tf.keras.layers.MaxPooling2D(2, 2),

    tf.keras.layers.Conv2D(64, (3,3), activation='relu'),
    tf.keras.layers.MaxPooling2D(2, 2),

    tf.keras.layers.Dropout(0.5),
    tf.keras.layers.Flatten(),
    tf.keras.layers.Dense(256, activation='relu'),
    tf.keras.layers.Dense(3, activation='softmax')
])
  
```

Figura 6. Segmento de código utilizado para configurar la topología de la red neuronal.
Fuente: Elaboración propia 2024.

Para el entrenamiento del modelo se utilizó dentro del entorno de Google Colaborativo un entorno T4 GPU que permite el procesamiento en paralelo lo que reduce el tiempo de entrenamiento, ya que al programarse 100 décadas con 300 pasos por década la demora en el entrenamiento de más de 8 horas y con esta técnica se redujo a algo más de dos horas; tras la cual se consiguió una red con una efectividad del 99% en el entrenamiento.

Logrando tener una red que pueda clasificar el estado de madurez del fruto del café, el siguiente paso fue programar un algoritmo que entregara las coordenadas de los granos que se cosecharan, para esto se usaron técnicas de visión artificial como: segmentación de imagen, localización de contornos por citar algunas. La Figura 7 muestra los datos de localización de los granos maduros dentro de un cumulo de frutos verdes, en la imagen se muestra las coordenadas de las cerezas que se encuentran en condición de ser cosechadas.

Para realizar las pruebas se utilizaron imágenes que fueron capturadas cámara en mano en los terrenos de cultivo de café, y se efectuaron bajo un ambiente controlado dentro de las instalaciones donde se está construyendo el prototipo; ya que aún no se cuenta con el dron para realizar pruebas de campo.



Figura 7. Resultados del reconocimiento de los frutos por medio de la red neuronal y la localización de los mismos en la imagen.
Fuente: Elaboración propia 2024.

RESULTADOS

Una vez terminada la programación se desarrolla una interfaz de usuario cabe aclarar que el sistema propiamente no requiere de una ya que al ser montado el programa en una computadora de una sola tarjeta en una aeronave dotada de autonomía no la precisa así que esta se desarrolló solo para realizar las pruebas.

La Figura 8 muestra los resultados del entrenamiento y validación de la red utilizada para la clasificación de los frutos esta muestra como la exactitud (accuracy) mejora con el paso de las épocas en particular se puede observar que en la época 43 alcanza el máximo (99.99%) en el entrenamiento alcanza una exactitud del 84% en la validación, esta métrica se obtiene como ya es sabido realizando la razón entre el número de predicciones acertadas y el número de predicciones totales.

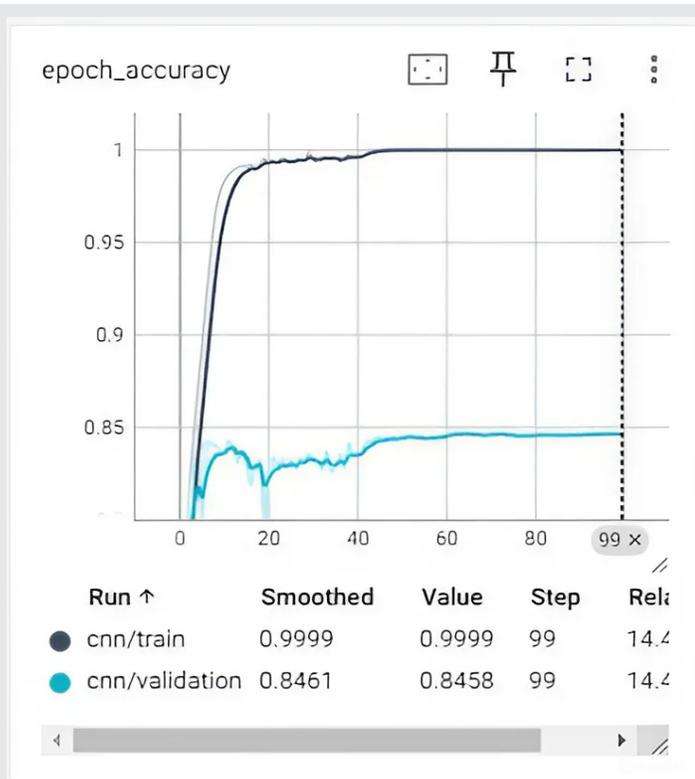


Figura 8. Desarrollo de la exactitud durante el entrenamiento del modelo.

Fuente: Elaboración propia 2024.

De igual forma la Figura 9 muestra como la pérdida disminuye durante el entrenamiento.

En la Figura 10 se muestra como la red es capaz de identificar a los frutos que se encuentran en condiciones de ser recolectados (en color rojo) así como sus coordenadas en los segmentos en los que se dividió la imagen; el grano de café tiene en el segmento 4 las coordenadas (414, 270) mientras que en el segmento 6 cuenta con el par ordenado (436, 281) es preciso indicar que las coordenadas se toman con respecto al origen de la imagen en el extremo supe-

rior izquierdo y están dadas en píxeles. Las coordenadas mostradas corresponden a la máxima superficie encontrada de color área de contorno localizado esto permitirá jerarquizar los contornos localizados y a partir de esta información tomar la decisión de cuan grano recolectar ya que como se puede notar los granos tienden a crecer en racimo como lo muestra la Figura 11 de igual forma se aprecia que en el segmento 4.

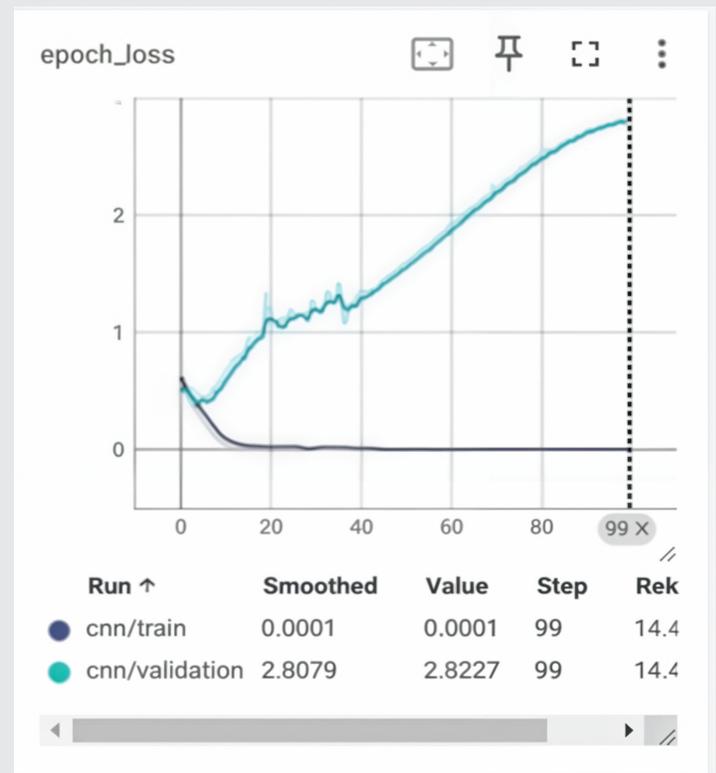


Figura 9. Decremento de la pérdida durante el entrenamiento del modelo.

Fuente: Elaboración propia 2024.

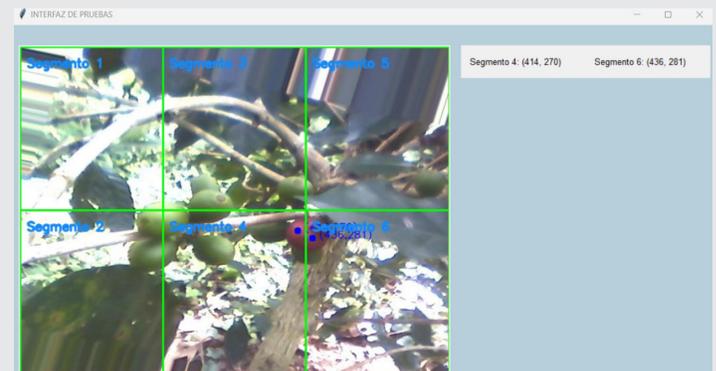


Figura 10. Muestra los frutos maduros y sus respectivas coordenadas en la imagen.

Fuente: Elaboración propia 2024.

Con esta información se decide que la cereza antes mencionada es la primera en ser recolectada por el manipulador. Al ser retirado el fruto seleccionado se realiza nuevamente la revisión de los tamaños de las áreas para elegir al siguiente grano a ser cosechado.



Figura 11. Muestra las coordenadas de las áreas de color de mayor tamaño en el segmento (segmento 4).
Fuente: Elaboración propia 2024.

Tras obtener las coordenadas y el área del contorno mayor se procede a determinar la distancia a la que se encuentran los frutos con respecto al brazo manipulador, para esto se agrega al programa un algoritmo que permite estimar dicha posición, el que se basa en la detección de patrones ArUco [25] [26], con esta técnica es posible tener un patrón y así compara el área que ocupe un grano a la distancia correspondiente esto se logra gracias a una regresión que se calculó a partir de una serie de áreas y distancias que se tabularon para obtener la correlación que permite su cálculo:

$$Dc = 464.787A_{max}^2 - 0.418 \quad Ec(1)$$

Donde:

Dc = Distancia de la cereza

A_{max} = Área máxima.

La Figura 12 muestra la distancia del fruto a la cámara, así como el grano que se encuentra en condiciones de ser cosechado.

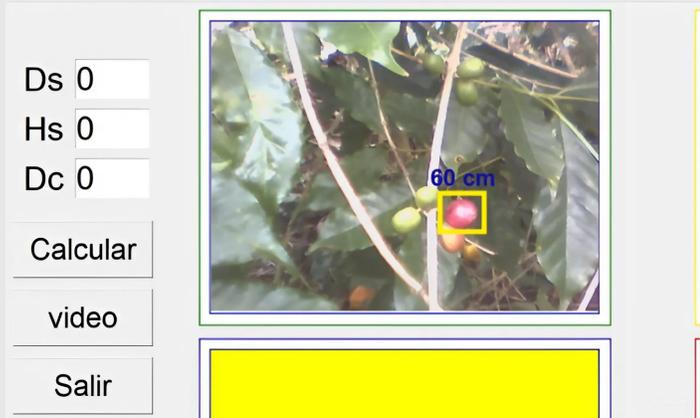


Figura 12. Muestra el grano para ser cosechado y la distancia a la que se encuentra de la cámara que se utilizó para las pruebas .
Fuente: Elaboración propia 2024.

Con las coordenadas y la distancia obtenidas y mediante un planteamiento trigonométrico se llega las

ecuaciones que permiten calcular los ángulos correspondientes de las articulaciones del brazo manipulador:

$$\delta = \pi rad + \theta - \varphi \quad Ec(2)$$

$$\alpha = \pi - 2\varphi \quad Ec(3)$$

Donde:

δ = Ángulo de la articulación del hombro.

α = Ángulo de la articulación del codo.

φ = Ángulo formado entre el punto de origen y el punto A.

θ = Ángulo formado por la horizontal y la hipotenusa b.

La Figura 13 muestra los triángulos imaginarios que se plantearon para el análisis trigonométrico que permitió determinar los ángulos a los que deberán moverse los actuadores para lograr llevar al actuador a la posición final para que realice la colecta de la cereza.

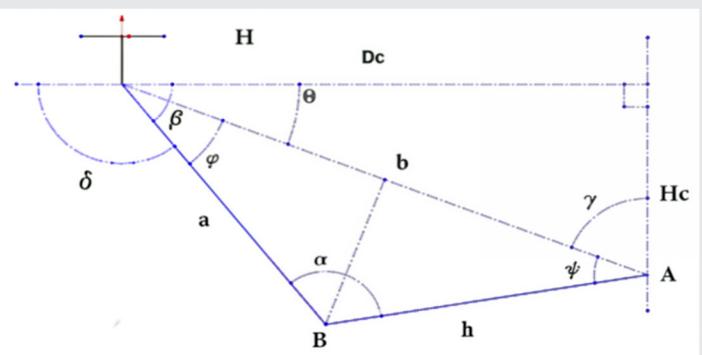


Figura 13. Muestra los elementos del brazo robótico (a, h) y los triángulos imaginarios utilizados para determinar los ángulos para la posición del manipulador.
Fuente: Elaboración propia 2024.

Finalmente, la Figura 14 muestra la interfaz de salida donde puede apreciarse la imagen de entrada, y el brazo manipulador alcanzando la posición calculada, la parte inferior muestra los ángulos calculados que definen la posición del sistema, de igual forma muestra las distancias medidas para el cálculo antes descrito.

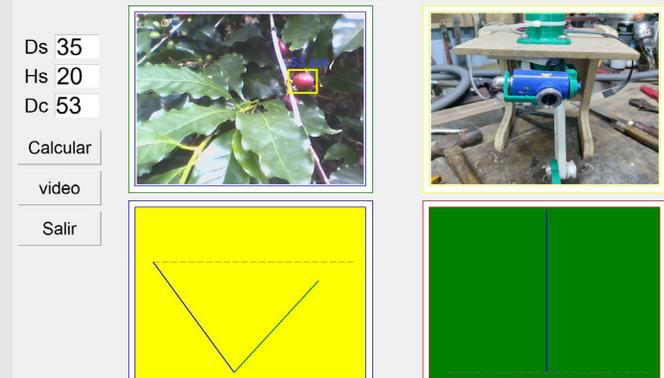


Figura 14. Interfaz diseñada para observar el funcionamiento del sistema (Fuente: Elaboración propia 2024).
Fuente: Elaboración propia 2024.

En la actualidad como ya se mencionó los drones en el campo de cultivo, cada día, son mas vistos realizando tareas agrícolas sobre todo en la llamada agricultura de precisión donde recaban información sobre el estado que guardan las cosechas [17], en la literatura consultada hasta el momento se hace referencia al proyecto denominado FEROX financiado por la comunidad europea el que consiste en ayudar a los recolectores a mejorar la eficacia en la recolección, los drones recaban datos con los cuales generan modelos 3D de las áreas de recolección para optimizar las tareas de colecta [27]. Finalmente, en la comparativa con otros trabajos que tengan relación con el presentado se tiene el proyecto desarrollado por el Tecnológico Nacional de México, en su campus del Instituto Tecnológico Superior de Guasave Sinaloa quienes desarrollaron un dron para la polinización del cultivo de fresa ya que este cultivo se enfrenta a la falta de polinizadores naturales a consecuencia de los cambios del entorno que se han venido suscitando por el cambio climático [28]. Si bien a la fecha de la redacción no se encontró un dron dedicado a la cosecha de frutos si se observó que la aplicación de la tecnología de máquinas voladoras a tareas agrícolas es cada día mayor.

CONCLUSIONES

Durante el desarrollo del proyecto quedó de manifiesto que el empleo de una red neuronal convolucional cumple efectivamente con la tarea de clasificación, de igual forma el empleo de la técnica de reconocimiento de patrones ArUco permite alcanzar los objetivos de poder determinar la distancia de la cereza del café con la cámara.

Esta tarea es de suma importancia que se desarrolle de manera adecuada ya que de ella depende la proximidad de la aeronave, que portará el manipulador y que al tener errores llevaría al colapso de todo el sistema.

Al concluir el desarrollo de prototipo e integrarlo al dron se espera favorecer a los cafecultores de la región de influencia del Instituto Tecnológico Superior de Teziutlán y así contribuir a la tecnificación del agro que es uno de los ejes del plan de desarrollo del estado de Puebla, de igual forma se espera que la contribución haga más rentable el cultivo del citado aromático al reducir los costos de producción lo que favorezca en el incremento de las áreas de cultivo.

De manera concluyente se puede afirmar que los objetivos planteados para el reconocimiento de los granos de café y la generación de los ángulos de control del brazo se alcanzaron dejando entrever la viabilidad del proyecto.

Trabajo futuro

Como trabajo futuro se tiene planeado el desarrollo de un dron que tenga la capacidad de portar al brazo mecánico más una carga de granos de café, aunado a

esto la máquina gozará de autonomía para controlar el vuelo y reconocer el área de cosecha.

Finalmente se trabajará en paralelo con en el diseño del actuador final que será el encargado de retirar el fruto de la planta, tarea que debe realizarse de la forma adecuada para no causar daño a la planta.

BIBLIOGRAFÍA

[1] G. Leguizamón Sotero, M. L. Salgado Siclan y M. Rubí Arriaga, «Aspectos sociodemográficos, económicos, agronómicos y culturales de los cafecultores del municipio de Sultepec, Estado de México, México,» *Acta Agrícola y Pecuaria*, n° 9, pp. 1-13, 2023.

[2] C. R. Rivera Rojo, «Competitividad del café mexicano en el comercio internacional: un análisis comparativo con Brasil, Colombia y Perú (2000 – 2019),» *CIELO*, vol. XXXVII, n° 94, pp. 181-199, 2022.

[3] Statista, 2021. [En línea]. Available: <https://es.statista.com/estadisticas/600243/ranking-de-los-principales-productores-de-cafe-a-nivel-mundial/>. [Último acceso: 18 julio 2024].

[4] M. G. de , «SAGARPA,» [En línea]. Available: <https://www.gob.mx/agricultura/puebla/articulos/puebla-alcanza-el-3er-lugar-a-nivel-nacional-del-valor-de-produccion-de-cafe?idiom=es>. [Último acceso: 12 junio 2024].

[5] «Cursos Baristas Café,» 5 enero 2022. [En línea]. Available: <https://cursosbaristas.com.mx/blog/cafe-de-puebla>. [Último acceso: 15 julio 2024].

[6] C. Robles A. y R. Medina I, «EL bosque mesófilo de la montaña y el cultivo del café en el municipio de Xilotepec, Puebla, México,» 8 Enero 2004. [En línea]. Available: <https://elemntos.buap.mx/directus/storage/uploads/00000009262.pdf>. [Último acceso: 15 8 2024].

[7] A. Santillán López, Interviewee, *El cultivo de café en la región de Teziutlán*. [Entrevista]. 25 11 2023.

[8] A. Voulodinos, N. Doulamis, A. Doulamis y E. Protopapadakis, «Deep Learning for Computer Vision: A Brief Review,» *Intell, Neuroscientia*, vol. 2018, pp. 1-13, 2018.

[9] S. Grusrein, O. Fuentes y E. Freudenthal, «Knowledge Transfer in Deep Convolutional Neural Nets,» *Int. J. Artif Intell Tools*, vol. 10, n° 3, p. 555, 2008.

[10] S. Loos, G. Irving, C. Szegedy y C. Kaliszyk, «Deep Network Guided Proof Search,» *Deep Network Guided Prof Search*, vol. 10, n° 46, pp. 85-105, 2008.

- [11] C. Alessandro, «Deep learning techniques applied in computer visio,» *Universita degli Studi di Padova*, 2017.
- [12] A. Krizhevsky, I. Sutskever y G. E. Himton, «ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks,» *Adv Neural Inf. Process Syst*, pp. 1-9, 2012.
- [13] P. Constante, O. Chang y I. Pruna, «Artificial Vision Techniques for Strawberry's industrial Classification,» *I.E.E.E Lat. Am Trans*, vol. 14, n° 6, pp. 2576-2581, 2016.
- [14] R. Rios Hernández , «Uso de los Drones o Vehículos Aéreos no Tripulados en la Agricultura de Precisión,» *REVISTA INGENIERÍA AGRÍCOLA*, vol. 11, n° 4, pp. 75-84, 2021.
- [15] J. E. Bayona y E. Arboleda, «Identificar el uso y funcionamiento de la tecnología de drones en el sector agropecuario de la sabana de Bogotá.,» *Biblioteca Digital Minerva*, p. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/10882/12832>, 2023.
- [16] R. D. Moreira Ramos. «Desarrollo de algoritmos de procesamiento de imágenes agrícolas obtenidas por drones para la detección de plantas faltantes en cultivos de maíz,» *B.S. Thesis.* , 2022. [Online]. Disponible en: <https://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/13229>
- [17] L. L. López Moreono, «Uso de drones como tecnología moderna para una agricultura eficiente,» *Universidad Técnica de Babahoyo, Babahoyo*, 2024.
- [18] C. D. Ortega, F. E. Moyano, C. G. R. Sbrunera y T. J. G. Tejerina, «Técnicas de Implementación de Visión,» de *XVI Concurso de Trabajos Estudiantiles (EST) - JAIIO 42 (2013)*, Rio de la Plata Argentina, 2013., 2013.
- [19] A. Voulodinos, N. Doulamis, A. Doulamis y E. Protopapadakis, «Deep Learning for Computer Vision: A Brief Review,» *Comput. Intell. Neurosci*, vol. 2018, pp. 1-13, 2018.
- [20] S. Gutstein, O. Gutstein y E. Freudenthal, «Knowledge Transfer in Deep Convolutional Neural Nets,» *Int.J. Artif. Intell. Tools*, vol. 10, n° 3, p. 555, 2008.
- [21] S. Loos, G. Irving, C. Szegedy y C. Kaliszyk, «Deep Network,» *Guided Proof Search*, vol. 46, pp. 85-105, 2017.
- [22] A. C., «Deep learning techniques applied in computer vision,» *Univesità degli Studi di Padova*, 2017.
- [23] A. Krizhevsky, I. Sutskever y G. E. Hinton, «ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks,» *Adv. Neural Inf. Process. Syst*, pp. 1-9, 2012.
- [24] P. Constante, O. Chang y I. E. E. Pruna, «Artificial Vision Techniques for Strawberry's Industrial Classification,» *IEEE Lat. Am Trans*, vol. 14, n° 6, pp. 2576-2581, 2016.
- [25] B. A. y K. S., «Feature matching and ArUco markers application in mobile eye tracking studies,» *2018 Signal Processing: Algorithms, Architectures, Arrangements, and Applications (SPA)*, Poznan, Poland, pp. 255-260, 2018.
- [26] K. E. L, P. W. E y M. R. A, «Vision-Based Spacecraft Relative Pose Estimation in Variable Lighting Conditions,» de *2022 IEEE Aerospace Conference (AERO)*, Big Sky, MT, USA., Massachusetts, 2022.
- [27] L. M. Olmos, «Tecnología Hortícola,» 2023. [En línea]. Available: <https://www.tecnologiahorticola.com/drones-autonomos-para-mejorar-la-cosecha-de-frutos-silvestres/>. [Último acceso: 10 octubre 2024].
- [28] C. E. Beltran Burboa, G. Pollorena Lopez y A. Graciano Obeso, «Efecto del vuelo de un dron sobre la polinización de cultivo de fresa en casa sombra como alternativa a la ausencia de polinizadores naturales,» *Revista Interdisciplinaria De Ingeniería Sustentable y Desarrollo Social*, vol. año 9, n° 1, pp. 1-10, 2023.

