

UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA DE SISTEMAS Y COMPUTACIÓN



**Sistema inteligente para apoyar en la identificación de deficiencias
nutricionales del cultivo de café**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE
INGENIERO DE SISTEMAS Y COMPUTACIÓN**

AUTOR

Isis Paola Lopez Sotelo

ASESOR

Oscar Alex Serquen Yparraguirre

<https://orcid.org/0000-0001-9968-493X>

Chiclayo, 2023

**Sistema inteligente para apoyar en la identificación de deficiencias
nutricionales del cultivo de café**

PRESENTADA POR
Isis Paola Lopez Sotelo

A la Facultad de Ingeniería de la
Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo
para optar el título de

INGENIERO DE SISTEMAS Y COMPUTACIÓN

APROBADA POR

Consuelo Ivonne Del Castillo Castro
PRESIDENTE

Huiler Juanito Mera Montenegro
SECRETARIO

Oscar Alex Serquen Yparraguirre
VOCAL

Dedicatoria

A Dios por guiarme por el camino correcto y darme las fuerzas para poder cumplir mis objetivos.

A mis padres Máximo y Guadalupe por su amor, comprensión y por todas las cosas que me han enseñado para crecer como persona y culminar esta etapa.

Agradecimientos

A toda mi familia por el apoyo brindado.

A mi asesor de tesis, por haber compartido sus conocimientos que me orientaron para culminar la investigación.

A todas las personas involucradas en el desarrollo de esta investigación, al especialista en agronomía y productores de café.

INFORME DE ORIGINALIDAD

11 %

INDICE DE SIMILITUD

10 %

FUENTES DE INTERNET

2 %

PUBLICACIONES

2 %

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1docplayer.es

Fuente de Internet

1 %**2**tesis.usat.edu.pe

Fuente de Internet

1 %**3**id.scribd.com

Fuente de Internet

1 %**4**vitela.javerianacali.edu.co

Fuente de Internet

1 %**5**www.fceqyn.unam.edu.ar

Fuente de Internet

1 %**6**journal.iberamia.org

Fuente de Internet

1 %**7**

Submitted to Harrison High School

Trabajo del estudiante

1 %**8**www.neolectum.com

Fuente de Internet

<1 %**9**bibing.us.es

Fuente de Internet

<1 %

Índice

Resumen	6
Abstract	7
Introducción.....	8
Revisión de literatura.....	10
Materiales y métodos	13
Resultados y discusión	14
Conclusiones	24
Recomendaciones	25
Referencias.....	26
Anexos	27

Resumen

El cultivo de café es uno de los más importantes en el Perú y en la región Cajamarca, así mismo de esta actividad dependen muchas familias que producen café, siendo los agricultores pequeños con parcelas entre 3 y 5 hectáreas, quienes enfrentan a diferentes desafíos entre los cuales destacan la escasa capacidad técnica para identificar deficiencias nutricionales que afectan el cultivo, siendo de vital importancia ya que la detección adecuada repercute en la calidad del producto final. Esta investigación tiene como objetivo principal el desarrollo de un sistema inteligente para apoyar en la identificación de deficiencias nutricionales en hojas de café basado en reconocimiento de imágenes, fue alcanzado mediante objetivos específicos como, identificar las características de las deficiencias nutricionales, determinar el modelo de red neuronal que permita realizar la identificación, desarrollar una aplicación móvil híbrida y validar el funcionamiento del sistema inteligente. Las metodologías empleadas para el desarrollo fueron CommonKADS y RUP. Se concluye la investigación con un prototipo para ser ejecutado en dispositivos móviles y con las pruebas de funcionalidad por especialistas en agronomía. Como resultados finales podemos indicar que la presente investigación hace un aporte a la agricultura y apoya al sector cafetalero, a través de la ingeniería y la inteligencia artificial.

Palabras clave: Cultivo de café, sistema inteligente, redes neuronales, inteligencia artificial.

Abstract

The cultivation of coffee is one of the most important in Peru and in the Cajamarca region, likewise many families that produce coffee depend on this activity, being small farmers with plots between 3 and 5 hectares, who face different challenges between which highlight the limited technical capacity to identify nutritional deficiencies that affect the crop, being of vital importance since the adequate detection affects the quality of the final product. The main objective of this research is the development of an intelligent system to support the identification of nutritional deficiencies in coffee leaves based on image recognition, it was achieved through specific objectives such as identifying the characteristics of nutritional deficiencies, determining the network model neural network that allows identification, develop a hybrid mobile application and validate the operation of the intelligent system. The methodologies used for the development were CommonKADS and RUP. The investigation is concluded with a prototype to be executed in mobile devices and with the functionality tests by specialists in agronomy. As final results we can indicate that this research makes a contribution to agriculture and supports the coffee sector, through engineering and artificial intelligence..

Keywords: Coffee cultivation, intelligent system, neural networks, artificial intelligence.

Introducción

En la actualidad el café, es un producto de alta demanda en el mercado internacional, debido a que el consumo sigue creciendo año a año.

En el mundo, el Perú es uno de los principales productores de café, llegando a exportar a 44 países destinos. Según información de la Junta Nacional del Café [1] el cultivo se produce en 350.000 hectáreas de cafetales, en 210 distritos rurales ubicados en 10 departamentos. Si bien el país está siendo reconocido por el aporte a la producción en el mundo, es vendido de manera industrial como café común, cuya característica principal es la baja calidad.

En el país, [2] detalla que la región Cajamarca es una de las regiones con mayor número de productores cafetaleros y producción de café, ubicándose en el tercer lugar después de Junín y San Martín. Entre sus principales provincias productoras se encuentran: San Ignacio (12.6%), Jaén (7.3%), Cutervo (0.6%), San Miguel (0.2%) y Chota (0.1%) de producción nacional.

Situándonos en la realidad actual de nuestro país, la producción de café está en manos de pequeños productores con parcelas pequeñas, administradas con insuficiente tecnología, [1] indica que la tercera parte de los empleados agrícolas se sitúan en esta actividad, la mayor parte de las 223 000 familias que producen café en el Perú son agricultores pequeños con parcelas de entre 3 y 5 hectáreas. De la misma forma [2] menciona que los caficultores manejan sus cultivos con tecnología bastante precaria, y escasamente el 20% es socio de una cooperativa.

A esa realidad se suman problemas que afectan al sector cafetalero mencionados por el Plan Nacional de acción del Café [3], como la deficiente capacidad técnica de los productores, las limitaciones en el uso de las tecnologías, el restringido acceso a la asistencia técnica, la elevada incidencia y severidad de las plagas y la deforestación en fincas cafetaleras; estas son señaladas como las causas principales de los bajos niveles de producción, productividad y sostenibilidad ambiental del café.

Dentro de la problemática mencionada en el párrafo anterior, lo principal es el incremento de las plagas y enfermedades que atacan las plantaciones. Algunos expertos afirman que uno de los factores para que el cultivo sea atacado por plagas es la deficiencia nutricional que presentan los mismos, en [4] indica que la deficiencia de nutrientes en el café generan desniveles nutricionales que ocasionan deterioro de la salud de la planta, lo cual, la predispone a que sea atacada por plagas y enfermedades, afectando su producción y la economía del mismo caficultor.

En [5] indica que los síntomas visuales que presenta la planta son la primera herramienta disponible para conocer el estado nutricional de la misma. Es sabido que actualmente, la mayoría de productores de café utiliza el método empírico y visual para identificar deficiencias nutricionales en sus plantaciones por los síntomas que estas presentan, o en ocasiones busca ayuda de un profesional para poder determinar si hay deficiencia de nutrientes u otras afecciones que pudiera estar afectando al cultivo, sin embargo, estos métodos pueden carecer de precisión o incluso se podría cometer errores subjetivos en el diagnóstico debido a que se pierde sensibilidad al realizar análisis consecutivos; así también el cansancio ocular por parte del productor como del experto, puede traer consigo no identificar correctamente el nutriente faltante.

Ante todo lo expuesto líneas arriba surge la siguiente interrogante ¿Cómo se podría apoyar en la identificación de deficiencias nutricionales en el cultivo de café?

Para dar respuesta a esta problemática, se definió como objetivo general crear un sistema inteligente que apoye en la identificación de deficiencias nutricionales en el cultivo de café. Para el cumplimiento de ello se plantearon como objetivos específicos en primer lugar identificar las características de deficiencias nutricionales en las hojas de café, seguido a ello determinar el modelo de red neuronal apropiado que permita identificar las deficiencias nutricionales en hojas de café, posteriormente desarrollar una aplicación híbrida apoyada por el

modelo de red neuronal que permita la identificación de la deficiencia nutricional y finalmente validar el funcionamiento del sistema inteligente.

La investigación tiene justificación en el ámbito social, en el sentido que corresponde a una necesidad de un sector de la sociedad que vienen a ser los agricultores dedicados al cultivo de café, los mismos que necesitan apoyo para identificar las deficiencias nutricionales en sus plantaciones, y por ende mejorar su producción; a eso es a donde apunta el presente trabajo de investigación.

Revisión de literatura

La realización de una investigación científica requiere de la revisión teórica de otros aportes realizados que vayan en la misma línea de la presente. Dentro de la literatura revisada encontramos a Varsallo et al. [6] indican que existía una gran necesidad de apoyar a los agricultores de café, con la detección de deficiencias nutricionales en las hojas de esta planta, que es el principal producto de exportación en el país; ya que ello afecta la producción, por lo cual es importante su identificación. Frente a esto, los autores proponen una solución para detectar automáticamente deficiencias nutricionales en micronutrientes como boro, calcio y hierro; para ello hacen uso de descriptores de forma y textura en imágenes de hojas de café para el entrenamiento del algoritmo Naïve Bayes. Los autores concluyen que la identificación de deficiencias nutricionales es una tarea complicada debido a la gran diversidad de síntomas que poseen. Es por ello que es vital desarrollar soluciones tecnológicas que podrían ayudar a los encargados de realizar el proceso; es decir los agricultores en las fincas actualmente. Por otro lado indican que las técnicas de procesamiento de imágenes junto a algoritmos de aprendizaje supervisado conducen a una adecuada identificación de deficiencias de micronutrientes. Se eligió como antecedente ya que se busca apoyar en un proceso complejo para los productores de café, utilizando la inteligencia artificial.

Por otro lado Velasco [7] expone la difícil situación a la que se enfrentaban pequeños agricultores a nivel mundial y en específico en la región El Valle del Cauca en Colombia, pues sus cultivos que eran cítricos se veían amenazados por afecciones como plagas, enfermedades y deficiencias nutricionales, para los cual existen dos métodos comunes en la detección como el análisis de laboratorio y la inspección visual humana por un experto, ambos presentando desventajas ya que involucran tiempo, generando demora en obtención de resultados y dando lugar a que se propague la afección, la repetitividad de visualización por parte del experto resta garantías, así también el costo de estos servicios que los pequeños productores no pueden cubrir. Se emplearon técnicas de aprendizaje automático y procesamiento de imágenes mediante un modelo de red neuronal convolucional, logrando obtener una aplicación móvil para la detección de plagas, enfermedades y deficiencias en cítricos a partir de imágenes. Finalmente el autor concluyó que se obtuvieron resultados satisfactorios en pruebas en campo en el diagnóstico, lo cual demuestra la efectividad en entornos reales, esto resultando muy valioso para el evaluador. De esta manera se demuestra que existe la capacidad para desarrollar herramientas tecnológicas utilizando el aprendizaje profundo en teléfonos móviles. Se tomó en consideración esta tesis ya guarda relación con la presente investigación en el apoyo que se brinda a pequeños productores de un cultivo a través de una herramienta tecnológica a su alcance pues se ejecuta en dispositivos móviles.

Para conocer un poco más acerca del cultivo de café, [1] indica que este cultivo es uno de los productos más difundidos en el mundo, y más preciados en la agricultura. Así mismo menciona que existen dos variedades comerciales, el café Arábica que se produce en el 75% de la producción mundial y café Canephora el 25% restante y en nuestro país prevalece la producción de café Arábica. Las actividades del ciclo fenológico del cultivo que son aquellas que comprenden el tiempo transcurrido de una campaña a otra, determinadas por [1] son: floración, llenado de grano, cosecha y descanso. Para informarnos sobre la nutrición de las plantas en general y el cultivo de café, algunos autores [1] y [2] concuerdan que existen 16 elementos principales para la nutrición de la planta, entre ellos el carbono, oxígeno e hidrógeno de los cuales se obtienen del agua y del aire. Además están dos grupos de elementos, uno de ellos denominados elementos mayores o macronutrientes porque son requeridos en mayores cantidades, tales como; nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio y azufre. Por otro lado

están los micronutrientes porque son requeridos en cantidades mínimas, tales como; boro, cobre, hierro, manganeso, cinc, cloro y molibdeno. De la misma forma [3] detalla que las funciones de los nutrientes tienen una suma importancia ya que intervienen en la formación de tejidos, la clorofila, formación de órganos de la flor, respiración, mejora el color y la calidad del fruto y proporciona mayor resistencia a plagas y enfermedades. Ahora, cuando el suelo presenta niveles bajos de nutrientes, la planta específicamente en las hojas se puede presentar sintomatología que evidencia la deficiencia de nutrientes en el suelo, estas empiezan a presentar cambios de color, [4] menciona que en la deficiencia de nitrógeno las hojas manifiestan un cambio de tonalidad de verde a verde claro o amarillento generalizado, en el fósforo las hojas presentan manchas rojizas o pardas rojizas, en potasio se observa el color bronceado y muerte del tejido en los bordes de las hojas, en el magnesio se observan manchas de color pardo-amarillento, en los espacios entre las venas de las hojas. Así mismo expertos mencionan que los síntomas de deficiencia son notorias en etapas como el llenado de grano y maduración del fruto, ya que es en ellas donde empieza a extraer todos los nutrientes del suelo y cuando ya no encuentra reservas es que se empieza a notar estas carencias.

Ahondando en la inteligencia artificial, la cual es la capacidad que posee las máquinas para usar algoritmos, crear sistemas inteligentes, aprender de toda la data que se le proporciona y utilizar ese aprendizaje para la toma de decisiones de la misma forma que lo haría un ser humano, con la única diferencia de que los sistemas basados en IA no necesitan descansar y pueden analizar grandes volúmenes de información a la vez, [8] indica que el campo de IA la componen diferentes áreas de estudio, entre las más importantes están los sistemas expertos, el procesamiento del lenguaje natural, el reconocimiento de imágenes, la robótica, el aprendizaje de las máquinas, entre otros. Existen varios elementos que conforman esta ciencia, dentro de los que se encuentran tres grandes ramas como son la lógica difusa, las redes neurales artificiales y los algoritmos genéticos. Así [9] aporta que el aprendizaje profundo es un sub campo del aprendizaje automático, que es empleado en la solución de problemas complejos y que requiere grandes cantidades de datos, para ello hace uso de las redes neuronales, las que se organizan en capas para reconocer patrones complejos en los datos. La presente investigación se centra en la rama de redes neuronales artificiales, específicamente en las redes neuronales convolucionales, en la actualidad muy usadas para la clasificación y procesamiento de imágenes y la más apropiada para poder llevar a cabo la presente investigación.

Para poder implementar este tipo de red existen en la actualidad marcos de trabajo, dentro de ellos está Keras, API de aprendizaje profundo escrita en Python, ejecutada sobre la librería de aprendizaje automático y de código abierto TensorFlow, el cual tiene una interfaz accesible y potencial para problemas de aprendizaje automático, así permite construir, entrenar y probar modelos desde cero o tomando como base uno previamente entrenado para clasificar imágenes, adaptándolo a la problemática que se desea aplicar, esto es denominado transferlearning o transferencia de aprendizaje. Para el entrenamiento de la red se requiere un conjunto de datos (imágenes) de los que el algoritmo extrae las características y aprende denominados training, por otro lado están los datos que sirven para probar el modelo, conocidos como datos de validación. Una vez entrenado el modelo, es utilizado para clasificar una imagen que no se ha incluido en el entrenamiento y la validación.

Para la creación del modelo de red neuronal se hace uso del lenguaje Python sobre el cual se importan librerías de Keras y TensorFlow. El entorno de desarrollo utilizado fue Pycharm, estas herramientas ayudaron a entrenar el modelo para la identificación de la deficiencia nutricional en las hojas de café.

Sobre las herramientas empleadas para el desarrollo de la aplicación móvil híbrida se hizo uso de los lenguajes HTML, CSS, y Javascript, adicionalmente Framework 7 y Phonegap para el empaquetado de la aplicación, así mismo el gestor de base de datos relacional MySQL de código abierto para el almacenamiento de la información.

Materiales y métodos

La presente investigación es de tipo aplicada tecnológica ya que se creó un producto para apoyar un proceso en el ámbito de agricultura.

Los métodos que se utilizaron para la adquisición del conocimiento fueron, la observación para conocer la realidad problemática que se iba a abordar, el análisis de la literatura en la cual se buscó antecedentes que permitieron fortalecer la elección del tema y la solución, el método deductivo para elaborar la estrategia para el planteamiento de la solución al problema, el experimental ya que se entrenó el modelo de red neuronal con un conjunto de imágenes y así encontrar la mejor solución y por último la implementación, puesto que se puso en ejecución la propuesta de solución.

Para la recolección de información, se utilizaron diferentes técnicas como la observación para extraer las características que tenían las hojas con deficiencia nutricional y para la captura de imágenes clasificadas que sirvieron para entrenar el modelo de reconocimiento de imágenes. Así mismo se aplicó una entrevista al especialista en agronomía para orientarnos acerca de las deficiencias nutricionales. Para conocer a cerca de cómo realiza la identificación de deficiencias nutricionales se aplicaron también encuestas a productores de café, en el cual pudimos recolectar más información sobre sus necesidades.

Las metodologías que se emplearon en el desarrollo del sistema fue la metodología CommomKADS para la gestión del conocimiento y la parte inteligente de la cual se optó por utilizar todas las fases que la comprenden, apoyada por la metodología RUP para las funcionalidades del sistema mediante sus iteraciones como el Análisis Preliminar de Requerimientos, Análisis, Diseño, Implementación y finalmente las pruebas.

Resultados y discusión

1. En base a la metodología utilizada

En cuanto a los resultados, en este primer apartado se describe el proceso de desarrollo del sistema inteligente, a través de iteraciones de la aplicación de las metodologías que fueron utilizadas para el desarrollo de la presente investigación que se presenta a continuación:

1.1. Nivel de contexto (CommonKADS)

Esta fase consistió en hacer un estudio a la organización o proceso en el cuál intervendría el sistema inteligente, es comprendida por tres modelos como son, modelo de organización, modelo de tareas y modelo de agentes, los cuales se muestran en diferentes tablas que detallan su contenido, a continuación se expone cada una de ellas:

- **Modelo de Organización**

Se hace un estudio de la organización o del proceso, para identificar los problemas y las oportunidades para implementar un sistema inteligente como se puede observar en la Tabla I. Por otro lado se hace el estudio del área o proceso de interés, detallando la estructura de la misma detallada en la Tabla II. Finalmente se hace una descomposición de los procesos en los cuales intervendrá el sistema inteligente, esto se puede detallar en la Tabla III.

TABLA I
PROBLEMAS Y OPORTUNIDADES DE LAS ORGANIZACIÓN

Modelo de Organización	Problemas y Oportunidades
PROBLEMAS Y OPORTUNIDADES	<p>PROBLEMAS:</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Confusión en la identificación de deficiencias nutricionales en el cultivo de café. ✓ Desconocimiento del fertilizante a elegir para corregir la deficiencia nutricional que identifica. ✓ Ataque de plagas y enfermedades. ✓ Escasez de herramientas tecnológicas. ✓ Escasez de asistencia técnica. <p>OPORTUNIDADES:</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ El consumo de café va en crecimiento a nivel mundial. ✓ El país es uno de los proveedores más importantes a nivel mundial. ✓ Aumento de demanda de productos de calidad por empresas nacionales e internacionales.
CONTEXTO DE LA ORGANIZACIÓN	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Los productores de café se dedican a la producción y comercialización de café, con el fin de producir un producto de calidad exigido por los compradores, locales, nacionales e internacionales.
OPORTUNIDADES	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Desarrollar un sistema inteligente que sirva de apoyo en la identificación de deficiencias nutricionales. Así mismo, apoyar al productor en la elección del tipo de fertilizante a aplicar, brindándole una recomendación para cada deficiencia nutricional.

TABLA II
ESTRUCTURA DE LA ORGANIZACIÓN

Modelo de Organización	Documento de aspectos variables
ESTRUCTURA	La organización de estudio es una finca de café La actividad económica que desempeña es cultivo y comercialización de café. Este tipo de organizaciones son dirigidas por el mismo productor de café, quién interviene en todas las tareas y proceso del cultivo del café, desde la siembra hasta su comercialización apoyado en algunas tareas por personal externo, específicamente para las labores de cosecha.
PROCESO	El productor de café o caficultor se encarga de realizar la evaluación del estado del cultivo mediante la observación de las hojas, a través de los síntomas que presentan identifica que afección posee la planta y en base a lo observado adquiere un producto para poder corregir la afección.
PERSONAL	La persona encargada de la identificación de afecciones en el cultivo es el mismo productor de café.
CONOCIMIENTO	El productor de café tiene conocimientos basados en la experiencia para desarrollar su labor.

TABLA III
DESCOMPOSICIÓN DE LOS PROCESOS DE LA ORGANIZACIÓN

Modelo de Organización		Descomposición de los Procesos				
N ^o	TAREA	REALIZADA POR	DONDE?	ACTIVO DE CONOCIMIENTO	CONOCIMIENTO INTENSIVO?	IMPORTANCIA
1	Identificar síntomas en la hoja y dar un diagnóstico.	Productor de café	Parcela	Conocimiento basado en la experiencia.	Sí	Muy Alta

○ Modelo de tareas

Aquí se realiza un análisis de las tareas relevantes dentro del proceso en el que se implantará el sistema inteligente, esto en la Tabla IV.

TABLA IV
TAREA IDENTIFICAR DEFICIENCIAS NUTRICIONALES

Modelo de Tareas	Análisis de tareas
TAREA	Identificar las deficiencias nutricionales a través de los síntomas que presenta la hoja. Se organiza en la parcela donde está ubicado el cultivo para poder identificar la deficiencia nutricional.
ORGANIZACIÓN	El objetivo de esta tarea es evaluar si los síntomas que presenta la planta puede ser por deficiencia nutricional u otra afección.
OBJETIVO Y VALOR	Objeto de Entrada: Síntomas que presenta la hoja de café.
OBJETOS	Objeto de Salida: Deficiencia nutricional identificada.
MANIPULADOS	Realizado por los productores de café.
AGENTES	El productor tiene conocimiento basado en la experiencia al cultivar café.
CONOCIMIENTO Y CAPACIDAD	La tarea se realiza de manera general.
CALIDAD Y EFICIENCIA	

- **Modelo de agentes**

Se identifica y documenta los agentes ejecutores de la tarea que se pretende mejorar, detallado en la Tabla V.

TABLA V
AGENTE EJECUTOR DE LA TAREA

Modelo de agentes	Documento de descripción de agentes
NOMBRE	Productor de café
ORGANIZACIÓN	Realizado en la parcela de café
INVOLUCRADO EN	Todas las tareas

1.2. Análisis Preliminar de Requerimientos – Casos de Uso (RUP)

En esta iteración a través de los diagramas de RUP se plasman los requerimientos que se tienen en cuenta para llevar a cabo el desarrollo del sistema inteligente. Se puede observar en uno de sus diagramas de casos de uso en la Fig. 1.

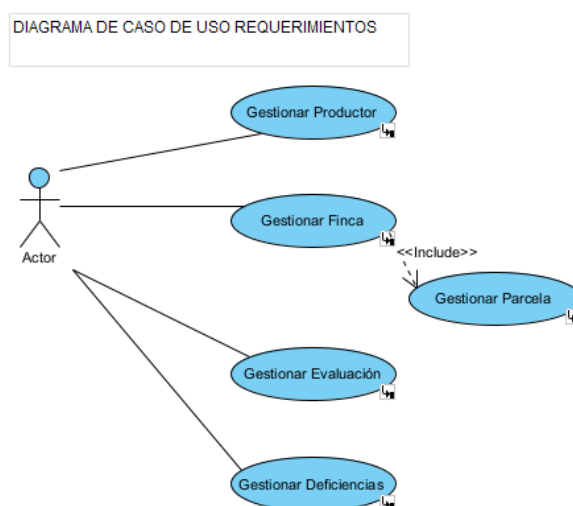


Fig. 1 Diagrama de casos de uso de requerimientos

1.3. Análisis (RUP)

Esta iteración correspondiente a la metodología RUP, en apoyo de sus diagramas de análisis se plasma cómo serían los procesos en el sistema que se desarrolló.

1.4. Nivel de concepto (CommonKADS)

En esta iteración se desarrollan dos actividades que comprenden el modelo de conocimiento y el de comunicación que se detallan a continuación:

- **Modelo de conocimiento**

En este apartado se detalla la estructura del conocimiento las imágenes, donde se clasificaron en carpetas el número total de imágenes por cada deficiencia nutricional abordada en la presente investigación y detalladas en la Tabla VII.

TABLA VI
DOCUMENTO SOBRE EL MODELO DE CONOCIMIENTO

MODELO DE CONOCIMIENTO	DOCUMENTO SOBRE EL MODELO DE CONOCIMIENTO(KM-1)
MODELO DE CONOCIMIENTO	La base de conocimiento la conforman las fotografías obtenidas de hojas de café de variedad Catimor con deficiencia nutricional para poder entrenar y probar el modelo de reconocimiento de imágenes.
FUENTES DE CONOCIMIENTO USADAS	Para poder implementar el sistema inteligente se realizaron fotografías de hojas de café con deficiencia nutricional, que fueron clasificadas según el tipo con ayuda del experto en la materia.

TABLA VII
DISTRIBUCIÓN DE IMÁGENES OBTENIDAS

TIPO	TOTAL
Hoja sin deficiencia	36
Deficiencia de Nitrógeno	45
Deficiencia de Fósforo	69
Deficiencia de Potasio	87
Deficiencias de Magnesio	75
TOTAL	312

1.5. Nivel de implementación (CommonKADS)

En esta iteración se encuentra el modelo de diseño, en el cual se detalla el proceso para la implementación de la base de conocimiento es decir del modelo de reconocimiento de imágenes que funcionará en conjunto con la aplicación móvil híbrida.

- **Modelo de diseño (Modelo de reconocimiento de imágenes)**

En este apartado se realiza la descripción del proceso del modelo de reconocimiento de la imagen.

Previamente al entrenamiento de la red las imágenes etiquetadas y clasificadas por deficiencia nutricional pasarán por un proceso de normalización y transformación de los valores de cada píxel.

La red neuronal toma como entrada los píxeles que contienen una imagen, cabe precisar que se determina el tamaño las imágenes en este caso 224x224x3, siendo la imagen a color se necesitará de tres canales adicionales (red, green, blue).



Fig. 2 *Imagen a ingresar a la red neuronal*

Cabe precisar que de los dos tipos existentes de modelos, la arquitectura que se siguió o eligió para el entrenamiento es el modelo secuencial, por ser más sencilla. De esta manera cada neurona estaría conectada con todas las neuronas de la siguiente capa.

Se procede con las convoluciones en donde se va recorriendo la imagen (píxel a píxel), para obtener las características y se genera una nueva imagen de salida más pequeña, reduciendo la altura y la longitud de la misma. Así a medida de que se ejecuten más capas convoluciones, los mapas de características serán capaces de reconocer formas más complejas

Seguidamente, se genera una función de agrupación denominada Max Pooling en donde se reduce aún más la altura y la longitud, la profundidad se mantiene intacta. Toma el número más alto y se genera una matriz más pequeña.

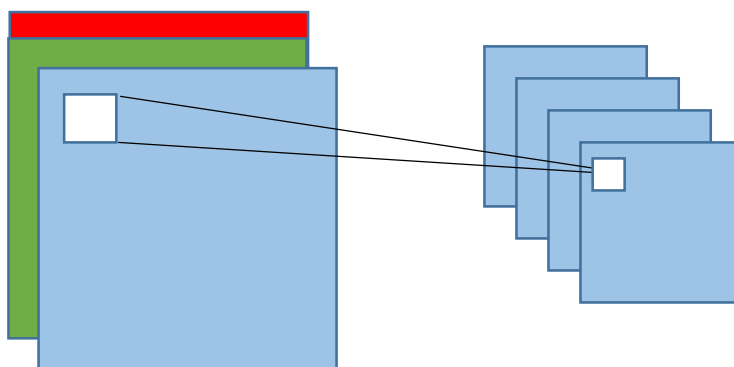


Fig. 3 *Convolución y Max Pooling*

Finalmente la capa deja de ser tridimensional, pasa a ser una capa oculta tradicional donde se realizan muchas convoluciones y a la cual se le aplica la función llamada Softmax para conectar con la capa de salida conformada por las neuronas correspondientes a las clases que se van a clasificar en este caso 5 clases. Se evalúa el modelo con los datos de validación obteniendo el porcentaje de precisión. De esta manera se realiza el entrenamiento de la red neuronal para lograr el reconocimiento y clasificación de la imagen nueva a ingresar.

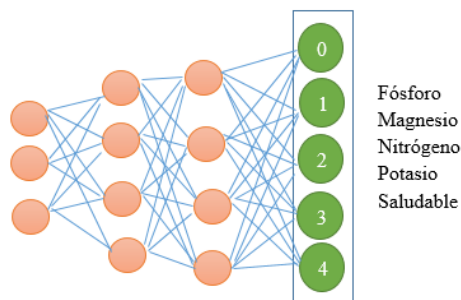


Fig. 4 Conexión completa y salida de la red

1.6. Diseño (RUP)

En esta iteración se plasma el funcionamiento de la aplicación híbrida en conjunto con la parte inteligente, a través de los diagramas al diseño que proporciona la metodología RUP, dentro de ellos se encuentran el diseño de interfaces del sistema y la arquitectura del mismo para mostrar el detalle del funcionamiento y comunicación, ello se detalla en la Fig. 5.

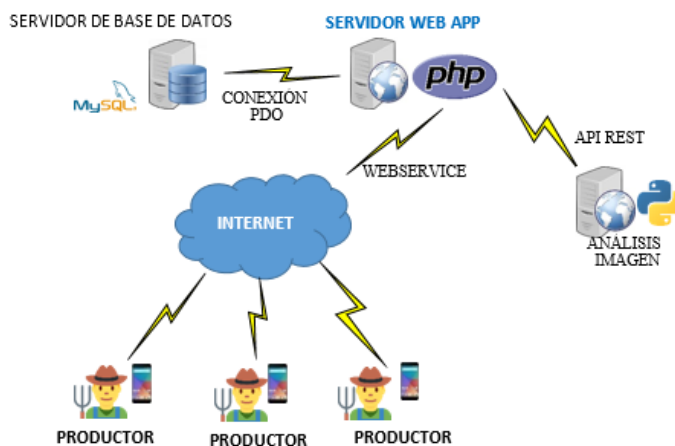


Fig. 5 Diseño de la arquitectura

2. En base a los objetivos de la investigación

En el siguiente apartado se detallará el cumplimiento de los objetivos durante la investigación.

2.1. Identificar las características de deficiencias nutricionales en las hojas de café.

Se identificaron las características de cada tipo de deficiencia nutricional, esto con el apoyo del especialista Luis Terrones, Ingeniero Agrónomo de profesión, quien ejerce como Técnico Líder del área llamada PECA (Programa de educación a caficultores) de una empresa transnacional. Con base a la asesoría del especialista y con la literatura disponible en la web, se pudo determinar qué deficiencias nutricionales serían las que el sistema podría identificar, así mismo poder clasificar las fotografías que se obtuvieron en las fincas. Esto se detalla en el Anexo N° 1.

2.2. Determinar el modelo de red neuronal apropiado que permita identificar las deficiencias nutricionales en hojas de café.

Para el cumplimiento de este objetivo se realizó una investigación de los tipos de red neuronal usados en algunas investigaciones para tratar temas de reconocimiento de imágenes. Se determinó que las redes neuronales convolucionales era el tipo de red neuronal con mayor aplicación en el reconocimiento de imágenes de afecciones en cultivos como las deficiencias nutricionales. Tomando en cuenta la estructura del modelo utilizado por estas investigaciones, se entrenó la red neuronal a través de la librería Keras en conjunto con TensorFlow.

2.3. Desarrollar una aplicación híbrida apoyada por el modelo de red neuronal que permita la identificación de la deficiencia nutricional.

Se desarrolló la aplicación híbrida, donde el usuario (productor de café) tiene la opción de ingresar una imagen desde su dispositivo móvil, ya sea a través de la cámara del mismo o desde la galería de imágenes del propio dispositivo, esta será analizada internamente por el modelo guardado y mostrará al usuario el resultado de la deficiencia detectada. Se demuestra esto en la Fig. 6 que corresponde a la interfaz de registro de imagen.

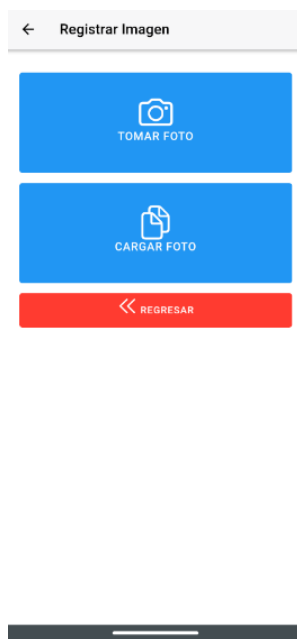


Fig. 6 Interfaz Registrar Imagen

2.4. Validar el funcionamiento del sistema inteligente.

Se realizó una simulación para validar el funcionamiento del sistema inteligente. Para evaluar si la hoja presenta deficiencia nutricional, se ingresó una imagen desde la galería del dispositivo móvil, esta es analizada internamente y muestra el resultado en un mensaje, así mismo brinda una recomendación de productos que podrían aplicarse de acuerdo a la deficiencia identificada. En la Fig. 7 se puede observar los resultados del reconocimiento para la imagen ingresada y finalmente las recomendaciones que se brindan para la deficiencia nutricional.



Fig. 7 Interfaz de Resultado de imagen evaluada.

Por otro lado, el productor podrá registrar los resultados de las imágenes evaluadas y que será visible dentro de la aplicación. En la Fig. 8 se puede observar la lista de las evaluaciones que se han registrado en una parcela de café, junto con la fecha en que se dio tal evaluación.

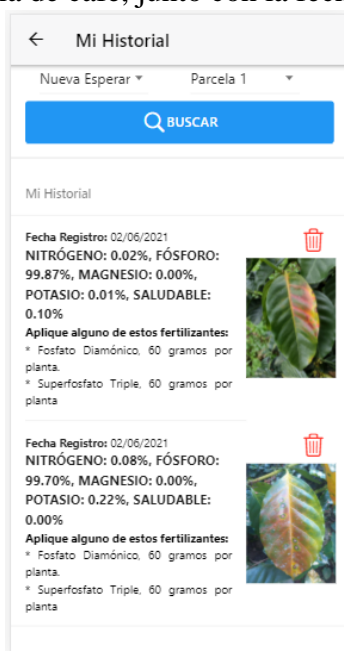


Fig. 8 Interfaz historial de evaluaciones

Se complementó el logro de este objetivo con el formulario de preguntas sobre la funcionalidad del sistema inteligente aplicado a expertos en agronomía detallado en el Anexo N° 2.

La presente investigación tuvo como objetivo principal el desarrollo de un sistema inteligente para apoyar en la identificación de deficiencias nutricionales en el cultivo de café. Al identificar las características de las deficiencias nutricionales en las hojas de café se pudo observar que cada tipo manifestaba síntomas distinguibles de otro, así se pudo delimitar los que se abordarían para su posterior identificación en el sistema inteligente, debido a su importancia en cuanto al requerimiento en el cultivo y a la cantidad de imágenes que se podrían obtener para el entrenamiento de la red neuronal.

Para determinar el modelo de red neuronal analizamos investigaciones como [10] donde desarrollaron un sistema de reconocimiento de imágenes digitales, basado en un modelo que ellos propusieron para evaluar el estado nutricional de nitrógeno y potasio en *Brachiaria brizantha* cv. Marandu, haciendo uso de redes neuronales convolucionales, obteniendo un excelente rendimiento en la clasificación, así también en [11] creó un prototipo de clasificación de enfermedades en hojas de café basado en visión computacional, haciendo uso de modelos de red ya entrenados y uno propuesto. Ambos autores implementan redes neuronales convolucionales en el reconocimiento y clasificación de imágenes, lo cual también se aplica en la presente, para reforzar la elección del tipo de red y el modelo de la arquitectura encontramos a [12] donde desarrolla un sistema inteligente para detectar plagas y enfermedades en el cultivo de arroz, específicamente una aplicación móvil apoyada por el entrenamiento de un modelo de reconocimiento de imagen basado en el modelo secuencial de Keras, y la librería TensorFlow, herramientas que nos sirvieron para el desarrollo del modelo.

Ahora, en cuanto al desarrollo de una aplicación híbrida apoyada por el modelo de red neuronal, podemos decir que en [6] crean un prototipo para clasificar hojas con deficiencia nutricional en hojas de café, ello consistió en una cabina con dos cámaras y un LED para mejorar la iluminación y poder realizar las capturas de las imágenes, se realizó el procesamiento de imágenes en conjunto con la red neuronal convolucional y así se le indicaba al usuario en pantalla que deficiencia se había detectado, a diferencia de la presente investigación en la cual la solución es de mayor acceso, pues se desarrolló una aplicación móvil híbrida en la cual el usuario puede evaluar una imagen ingresando desde su dispositivo móvil sin necesidad de cortar la hoja de la planta de café.

La validación del sistema inteligente fue dada por el ingeniero agrónomo que asesoró en la investigación, a quién se le brindó acceso a la herramienta para poder ver el funcionamiento del mismo.

Conclusiones

Se logró identificar las características que posee cada deficiencia nutricional en las hojas de café en base a los síntomas, todo ello permitió establecer qué deficiencias podían ser reconocidas por el sistema inteligente.

Se logró determinar el modelo de red neuronal que permitió el reconocimiento de imágenes de hojas con deficiencia nutricional, optando por las redes neuronales convolucionales y por una de las arquitecturas más utilizada por este tipo de problemáticas que es el modelo secuencial, que proporciona la librería Keras en conjunto con TensorFlow.

Se desarrolló una aplicación móvil híbrida que apoyada por el modelo de red neuronal, logró el objetivo de capturar o ingresar una imagen desde el dispositivo móvil para ser analizada y mostrar el resultado de la identificación de la deficiencia nutricional al productor de café. Así mismo la herramienta proporciona información de los resultados, registrándolos en un historial para ser consultado posteriormente.

Se realizaron las pruebas en cuanto a la funcionalidad del sistema inteligente para mostrar el reconocimiento o identificación de las deficiencias nutricionales en hojas de café.

Recomendaciones

En investigaciones futuras se recomienda abarcar más deficiencias nutricionales, ya que la tarea de identificarlas es complicada, debido a la variedad de síntomas que posee cada una.





Se debe considerar integrar un plan de fertilización dentro de las funcionalidades de la aplicación híbrida, donde el productor tenga la capacidad de visualizar las deficiencias nutricionales en cada etapa del ciclo fenológico del cultivo de café.

Referencias

- [1] Junta Nacional del Café, *El Café de Perú*, Lima, 2020.
- [2] C. Díaz Vargas y M. Carmen Willems, “*Línea Base Del Sector Caféen el Perú*”, Lima, 2017.
- [3] Ministerio de Agricultura y Riego, “Plan Nacional De Acción Ddel Café”, Julio 2018. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2RGEMfq>
- [4] Anacafé, “Fertilización”, Guatemala.
- [5] INTAGRI, “Disponibilidad de Nutrimentos y el pH del Suelo”, 2018. [En línea]. Available: <https://bit.ly/358hF0r>
- [6] M. Vassallo-Barco, L. Vives-Garnique, V. Tuesta-Monteza, H. Mejía-Cabrera y R. Yera Toledo, "Automatic Detection of Nutritional Deficiencies In Coffee Tree Leaves Through Shape And Texture Descriptors", *Journal of Digital Information Management*, vol. 15, n.º 1, ene. 2019. [En línea]. Available: <https://bit.ly/3ceRWYh>. Acceso: mayo 2021
- [7] J. A. Velazco Zapata, “Diseño y desarrollo de un sistema prototipo de diagnóstico de afecciones en plantas de cítricos utilizando procesamiento de imágenes y aprendizaje profundo”, Tesis de grado, Electrónica y Ciencias de la Computación, Pontificia Universidad Javeriana Cali, Cali, Colombia, 2019. [En línea]. Available: <https://bit.ly/3gvdxyu>
- [8] J. J. Romero, C. Dafonte y F. J. Penousal, “Inteligencia Artificial y Computación Avanzada”, Fundación Alfredo Brañas, Santiago de Compostela, 2007.
- [9] J. Hurwitz y D. Kirsch, “Machine Learning”, edición limitada, Nueva York: For Dummies, 2018. [En línea]. Available: <https://ibm.co/3wdlFZF>
- [10] B. R. Dal Prá, R. Navarro de Mesquita, M. Olímpio de Menezes y D. Alves de Andrade, "Nutritional Evaluation of Brachiaria brizantha cv. marandu using Convolutional Neural Networks", *Inteligencia Artificial*, vol. 23, n.º 66, pp.85-96, ene. 2021. [En línea]. Available: <https://bit.ly/2RvD809> Acceso: mayo 2021.
- [11] E. J. Puella Zegarra, "Construcción de un prototipo de sistema para clasificar enfermedades en las hojas decaféto basado en visión computacional", Tesis de grado, Universidad Nacional San Antonio de Abad del Cuzco, Cuzco, Perú, 2020. [En línea]. Available: <https://bit.ly/3wU11O7>
- [12] J. L. Galan Zapata, "Sistema inteligente de reconococimiento de imágenes para apoyar en el diagnóstico de plagas y enfermedades en el cultivo de arroz en el departamento de Lambayeque en el año 2019", Tesis de grado, Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo, Lambayeque, 2020. [En línea]. Available: <https://bit.ly/3gaoViA>

Anexos

ANEXO N° 01 FICHA DE OBSERVACION CARACTERÍSTICAS Y SÍNTOMAS DE LAS DEFICIENCIA NUTRICIONALES

Deficiencia	Síntomas	Imagen	Cantidad De Muestras
Nitrógeno	Las hojas presentan un amarillento que empieza desde la nervadura, cuando la deficiencia es severa la hoja alcanza el color amarillento en su totalidad.		45
Fósforo	Las hojas presentan manchas amarilla con coloraciones rojizas, en caso severos ocurre en la toda la hoja y se cae con facilidad.		69
Magnesio	Las hojas presentan manchas amarillas o verde claro desde la base hasta el ápice entre las nervaduras que se conservan de color verde.		75
Potasio	Los bordes y ápice de la hoja se enrollan hacia arriba, al comienzo se presenta un amarillento que luego toma un color pardo oscuro.		87

ANEXO N° 02 LISTA DE CHEQUEO APLICADA A EXPERTO

Lista de Chequeo aplicada al experto del cultivo café para validar el funcionamiento del sistema inteligente.

Nombre: Luis Alberto Terrones Vásquez

Especialidad: Ing. Agrónomo

Pregunta	Calificación
¿Las deficiencias nutricionales identificadas por parte del sistema se están realizando de manera correcta?	SI (x) NO ()
¿Considera útiles las recomendaciones sobre los fertilizantes brindados por el sistema?	SI (x) NO ()
¿Usted recomendaría este sistema a algún productor de café?	SI (x) NO ()
¿Considera útil el sistema desarrollado?	SI (x) NO ()
Consideramos importante un comentario o recomendación respecto al sistema inteligente. <ul style="list-style-type: none"> • Ampliar la gama de más imágenes de deficiencias nutricionales. 	

LISTA DE CHEQUEO APLICADA A EXPERTO

Lista de Chequeo aplicada al experto del cultivo café para validar el funcionamiento del sistema inteligente.

Nombre: José Eladio Fernández Carhuajulca

Especialidad: Ing. Agrónomo-UNPRG.

Pregunta	Calificación
¿Las deficiencias nutricionales identificadas por parte del sistema se están realizando de manera correcta?	SI (X) NO ()
¿Considera útiles las recomendaciones sobre los fertilizantes brindados por el sistema?	SI (X) NO ()
¿Usted recomendaría este sistema a algún productor de café?	SI (X) NO ()
¿Considera útil el sistema desarrollado?	SI (X) NO ()
Consideramos importante un comentario o recomendación respecto al sistema inteligente: Si bien es cierto que el sistema inteligente detecta las deficiencias nutricionales de una planta de café a través de la captura de imágenes del área foliar, sin embargo, el sistema se podría mejorar para que además de indicar el nombre comercial del fertilizante a aplicar, pueda indicar la cantidad por hectárea, así como la concentración de nutrientes del mismo, para una mejor comprensión por parte del productor.	

José E. Fernández Carhuajulca

DNI: 44199460

CIP: 133540

LISTA DE CHEQUEO APLICADA A EXPERTO

Lista de Chequeo aplicada al experto del cultivo café para validar el funcionamiento del sistema inteligente.

Nombre: *Maria Ramos Santisteban Chiro*

Especialidad: *Ingeniera Agrónoma*

Pregunta	Calificación
¿Las deficiencias nutricionales identificadas por parte del sistema se están realizando de manera correcta?	SI (X) NO ()
¿Considera útiles las recomendaciones sobre los fertilizantes brindados por el sistema?	SI (X) NO ()
¿Usted recomendaría este sistema a algún productor de café?	SI (X) NO ()
¿Considera útil el sistema desarrollado?	SI (X) NO ()
Consideramos importante un comentario o recomendación respecto al sistema inteligente:	

MARIA RAMOS SANTISTEBAN CHIRO
INGENIERA AGRÓNOMA
REG. CIP. 518846

Maria Ramos Santisteban Chiro

Nombre del experto

ANEXO N° 03 LISTA DE CHEQUEO APLICADA AL PRODUCTOR DE CAFÉ

Lista de Chequeo aplicada al productor café para validar el funcionamiento del sistema inteligente

Pregunta	Calificación
¿Es claro para usted el resultado sobre la deficiencia nutricional identificada por el sistema?	SI () NO ()
¿Considera útil la información de fertilizantes que se brindan en el sistema?	SI () NO ()
¿Usted recomendaría este sistema otro productor de café?	SI () NO ()
¿Considera útil el sistema desarrollado?	SI () NO ()
Consideramos importante un comentario o recomendación respecto al sistema inteligente.	

ANEXO N° 04 CONSTANCIA DE JUICIO DE EXPERTO

CONSTANCIA DE JUICIO DE EXPERTO

NOMBRE DEL EXPERTO: Luis Alberto Terrones Vásquez

ESPECIALIDAD: Ing. Agrónomo

DNI N°: 47315018

Por medio de la presente, hago constar que realicé la revisión de los resultados del sistema inteligente, en cuanto a la identificación de la deficiencias nutricionales de las hojas de la planta de café; esto como parte de la investigación realizada por la estudiante ISIS PAOLA LÓPEZ SOTELO, investigación que lleva por título "Sistema inteligente para apoyar en la identificación de deficiencias nutricionales del cultivo de café".

Una vez indicadas las observaciones pertinentes, considero que el sistema cumple los parámetros necesarios para detectar las deficiencias nutricionales en las hojas de café.

Expido la presente, a solicitud de la parte interesada para los fines que crea conveniente, a los 04 días del mes de junio del 2021.

Atentamente



Luis Alberto Terrones Vásquez
DNI: 47315018