Informe final de Proyecto de Investigación

DIGI-PUI-004

Informe final de proyecto de investigación

Universidad de San Carlos de Guatemala

Dirección General de Investigación

Programa Universitario de Investigación en Desarrollo Industrial

“Identificación de enfermedades emergentes del tubérculo de papa (Solanum tuberosum L.) por medio de diagnósticos convencionales y con inteligencia artificial (IA)”

Unidad avaladora: Centro Universitario de Occidente

Partida presupuestaria: 4.8.12.6.40

Nombre del coordinador: Osman Estuardo Cifuentes Soto

Quetzaltenango 27/02/2026

Informe final de Proyecto de Investigación

Contraportada

Autoridades de la Dirección General de Investigación

Dra. Alice Patricia Burgos Paniagua

Directora General de Investigación

Liuba María Cabrera Ovalle

Coordinador(a) del Programa Universitario de Investigación

Autores

Osman Estuardo Cifuentes Soto,	17011
Glenda Edelmira Pérez García,	2025619
Mygdalia Alfonsina Mérida López,	20141157
María de los Ángeles Fuentes Pérez,	20250566
María Fernanda Cortez López,	20250592

Colaboradores de la Unidad Avaladora

Dr. César Haroldo Milián Requena, Director General, Centro Universitarios de Occidente.

M Sc. Elmer Raúl Bethancourt Mérida, director, Dirección General de Investigaciones -DICUNOC-

Ing. Agra. Mygdalia Alfonsina Mérida López, Enlace de Investigación.

El contenido de este informe de investigación es responsabilidad exclusiva de sus autores.

Esta investigación fue cofinanciada con recursos del Fondo de Investigación de la DIGI de la Universidad de San Carlos de Guatemala a través de la partida presupuestaria número: 4.8.12.6.40 en el Programa Universitario de Investigación en. Desarrollo Industrial.

Los autores son responsables del contenido, de las condiciones éticas y legales de la investigación desarrollada.

Este informe está licenciado bajo una Licencia *Creative Commons* Atribución-No Comercial-Compartir Igual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0).
Puede copiarse, distribuirse y adaptarse con la condición de dar crédito a los autores, no usarlo con fines comerciales y compartir cualquier obra derivada bajo la misma licencia.
Para más información, visite: https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es.

Informe final de Proyecto de Investigación

Índice General

Resumen 6
Abstract 7
1 Introducción 8
2 Contexto de la investigación 10
2.1 Delimitación temporal 10
2.2 Delimitación espacial: 10
3 Revisión de literatura 11
3.1 Diagnostico fitopatológico con inteligencia artificial 11
3.2 Enfermedades de tubérculo de papa 15
3.3 Diagnostico con marcadores moleculares 19
3.3.1 PCR (Reacción en Cadena de la Polimerasa) 19
3.3.2 Técnicas moleculares para identificación genética de organismos 20
3.3.3 Secuenciación de ADN 20
4 Planteamientoo del problema 21
5 Objetivos: 22
5.1 Objetivo General: 22
5.2 Objetivos Específicos: 22
6 Hipótesis 22
7 Método 23
7.1 Tipo de investigación. 23
7.2 Enfoque y alcance de la investigación. 23
7.3 Diseño de la investigación. 23
7.4 Población, muestra y muestreo. 23
7.5 Técnicas. 24
7.5.1 Fase de Campo: 24
7.5.2 Fase de Laboratorio: 24
7.5.3 Fase de Gabinete 25
7.6 Resumen de las variables o unidades de análisis 25
7.7 Procesamiento y análisis de la información. 25
8 Aspectos éticos y legales 26

9 Resultados y Discusión 26
9.1 Diagnostico convencional 26
9.1.1 Diagnostico bacterial 26
9.1.2 Diagnostico Fúngico 37
10 Propiedad intelectual 60
11 Beneficiarios directos e indirectos 61
12 Estrategia de divulgación y difusión de los resultados. 62
13 Contribución a las Prioridades Nacionales de Desarrollo (PND) 62
14 Otras contribuciones del proyecto al desarrollo 63
15 Vinculación ..... **¡Error! Marcador no definido.**
16 Conclusiones 64
17 Recomendaciones 65
Referencias 66
Apéndice 70

Índice de Tablas

Tabla 1 Objetivos, variable, instrumentos y unidad de medida o cualificación utilizada en la investigación. 25
Tabla 2 proceso de diagnóstico de muestra número 1 con sintomatología de enfermedad provocada por bacterias 26
Tabla 3 Proceso de diagnóstico de muestra número 2 con sintomatología de enfermedad provocada por bacterias. 27
Tabla 4 Proceso de diagnóstico de muestra de papa número 3 con sintomatología de enfermedad provocada por bacterias. 28
Tabla 5 Proceso de diagnóstico de muestra de papa número 4 con sintomatología de enfermedad provocada por bacterias. 30
Tabla 6 Proceso de diagnóstico de muestra de papa número 5 con sintomatología de enfermedad provocada por bacterias. 31
Tabla 7 Proceso de diagnóstico de muestra de papa número 6 con sintomatología de enfermedad provocada por bacterias. 32
Tabla 8 Proceso de diagnóstico de muestra de papa número 7 con sintomatología de enfermedad provocada por bacterias. 33
Tabla 9 Proceso de diagnóstico de muestra de papa número 8 con sintomatología de enfermedad provocada por bacterias. 34
Tabla 10 Proceso de diagnóstico de muestra de papa número 9 con sintomatología de enfermedad provocada por bacterias. 35
Tabla 11 Proceso de diagnóstico de muestra de papa número 10 con sintomatología de enfermedad provocada por bacterias. 36
Tabla 12 Proceso de diagnóstico de muestra de papa número 01 con sintomatología de enfermedad provocada por hongos. 37
Tabla 13 Proceso de diagnóstico de muestra de papa número 02 con sintomatología de enfermedad provocada por hongos 38
Tabla 14 Proceso de diagnóstico de muestra de papa número 03 con sintomatología de enfermedad provocada por hongos. 40
Tabla 15 Proceso de diagnóstico de muestra de papa número 04 con sintomatología de enfermedad provocada por hongos. 41
Tabla 16 Proceso de diagnóstico de muestra de papa número 05 con sintomatología de enfermedad provocada por hongos. 43
Tabla 17 Proceso de diagnóstico de muestra de papa número 06 con sintomatología de enfermedad provocada por hongos. 44
Tabla 18 Proceso de diagnóstico de muestra de papa número 07 con sintomatología de enfermedad provocada por hongos. 46

Tabla 19 Proceso de diagnóstico de muestra de papa número 08 con sintomatología de enfermedad provocada por hongos. 47
Tabla 20 Proceso de diagnóstico de muestra de papa número 09 con sintomatología de enfermedad provocada por hongos. 49
Tabla 21 Proceso de diagnóstico con IA de tubérculos con sintomatología de enfermedades. 51
Tabla 22 Proceso de diagnóstico con IA de tubérculos con sintomatología de enfermedades. 52
Tabla 23 Proceso de diagnóstico con IA de tubérculos con sintomatología de enfermedades. 53
Tabla 24 Proceso de diagnóstico con IA de tubérculos con sintomatología de enfermedades. 54
Tabla 25 Proceso de diagnóstico con IA de tubérculos con sintomatología de enfermedades. 55
Tabla 26 Proceso de diagnóstico con IA de tubérculos con sintomatología de enfermedades. 56
Tabla 27 Proceso de diagnóstico con IA de tubérculos con sintomatología de enfermedades. 57
Tabla 28 Proceso de diagnóstico con IA de tubérculos con sintomatología de enfermedades. 58
Tabla 29 Proceso de diagnóstico con IA de tubérculos con sintomatología de enfermedades. 59
Tabla 30 Proceso de diagnóstico con IA de tubérculos con sintomatología de enfermedades. 60
Tabla 31 Beneficiarios directos e indirectos de la investigación 61
Tabla 32 Resultados de la estrategia de divulgación y difusión de los resultados. 62

Índice de Figuras

Figura A 1 Tubérculos con síntomas de enfermedades colectados 70

Figura A 2 Colecta de tubérculos son síntomas en mercados regionales 71

Figura A 3 Colecta de tubérculos con sintomatología patológica en bodegas mayoristas. 72

Figura A 4 Tubérculos de papa de descarte por motivos fitosanitarios 73

Figura A 5 Sintomatología de tubérculos enfermos. 74

Figura A 6 Tubérculos con sintomatología grave 75

Figura A 7 Sintomatología bacterial en tubérculos de papa 76

Figura A 8 77

Figura A 9 78

Figura A 10 79

Figura A 11 Cajas Petri con medios de cultivo inoculados 80

Figura A 12 Características visuales macroscópicas 81

Figura A 13 Características visuales macroscópica de un hongos. 82

Figura A 14 Purificación de los patógenos 83

Figura A 15 Diagnostico con Inteligencia Artificial 84

Figura A 16 Diagnostico con Inteligencia Artificial 85

Figura A 17 Diagnostico de enfermedad de un tubérculo con una aplicación de IA 86

Figura A 18 Socialización de Resultados 87

Figura A 19 Socialización de resultados ante agricultores 88

Resumen

En las zonas de producción de papa en Guatemala, el aparecimiento de nuevas enfermedades en los tubérculos de papa ha provocado la disminución de la productividad. Sin embargo, se desconoce el agente causal de estas enfermedades, por lo que el objetivo de esta investigación fue generar un diagnóstico de las enfermedades emergentes en el tubérculo de papá, , así como la validación de un método innovador como lo son las aplicaciones de IA de diagnóstico. El enfoque de la investigación fue aplicado, ya que se generó conocimiento que permitirá recomendar medidas que resuelvan un problema. La primera fase permitió la obtención de muestras de tubérculos con sintomatología de enfermedades, cuya colecta se realizó con muestreo no probabilístico, una segunda fase en laboratorio donde se realizó la identificación de los agentes causales por medio de microscopia, técnicas inmunológicas y secuenciación. Estos diagnósticos de laboratorio fueron cotejados con Apps comerciales y experimentales que utilizan inteligencia artificial para verificar los diagnósticos.. Los resultados posibilitaron determinar la presencia de 9 agentes causales de nuevas enfermedades que están afectando al tubérculo de la papa, incluyendo bacterias y hongos. Así mismo, se estableció que el grado de precisión que tienen los sistemas de inteligencia artificial para el diagnóstico de las enfermedades del tubérculo de la papa es inferior al 30%, que es bajo en comparación con los diagnósticos con IA para enfermedades del follaje de la papa. Por último, la tercera fase estuvo enfocada a la divulgación de los resultados por medio de eventos de socialización.

Palabras Clave: Papa, Tubérculos, Enfermedades, Inteligencia artificial, Diagnostico.

Abstract

In the potato production areas of Guatemala, the emergence of new diseases in potato tubers has led to a decline in productivity. However, the causal agent of these diseases remains unknown, limiting the ability to generate recommendations for their technical management. The objective of this research was to generate a diagnosis of emerging potato tuber diseases in Guatemala, as well as to validate an innovative method using AI diagnostic apps for these diseases. The research approach was applied, as it generated knowledge that will allow for recommendations of actionable solutions to the problem.

The first field phase involved collecting tuber samples showing disease symptoms through non-probability sampling. In the second phase, the causal agents were identified in the laboratory using microscopy, immunological techniques, and sequencing. These laboratory diagnoses were then compared with commercial and/or experimental apps that utilize artificial intelligence to verify the results. Among these, the professional mobile app AGRIO served as the baseline for comparison.

The third phase focused on disseminating the results through a document featuring photos of the symptoms and the disease's causal agent. Additionally, the findings were shared at the National Potato Fair—held in the Sierra de los Cuchumatanes—with over 200 producers, as well as at universities in Quetzaltenango.

Keywords: Potatoe, Tuber, Disease, Artificial intelligence, Diagnosis

Informe final de Proyecto de Investigación

1 Introducción

La producción del cultivo de papa en Guatemala se da bajo el marco de las condiciones climáticas de la región subtropical del hemisferio norte en la sección septentrional de América Central. Esta situación permite la producción del cultivo de papa, pero bajo una fuerte presión de enfermedades, que limitan el rendimiento y la productividad de los diferentes sistemas de producción de este cultivo. (Franco J, 2002)

El aparecimiento de nuevas enfermedades en los tubérculos del cultivo de papa ha provocado la disminución de la productividad en las zonas afectadas. Sin embargo, se desconoce el agente causal de estas enfermedades, lo que limita la posibilidad de generar una recomendación para el manejo agronómico de éstas. Este cambio de escenario que se está dando, en donde anteriormente los tubérculos de papa solamente eran afectados por agentes parasitarios como Ralstonia solanacearum o Rhizoctonia solani y ante el aparecimiento de nuevas enfermedades como el caso de México en donde García-Ávila (2018) reporta que de un estudio realizado en la Central de Abastos de Ecatepec de un total de 34 muestras de tubérculos de papa destinados para consumo humano, obtenidas mediante muestreo visual dirigido, se identificaron microorganismos asociados a daños físicos o alteraciones superficiales, así como manchas atípicas en la superficie de los tubérculos. En el 50% de las muestras se identificaron bacterias como Enterobacter aerogenes, Pseudomonas fluorescens y Streptomyces sp. En el 41% de las muestras se identificaron hongos y protozoarios, incluyendo Fusarium oxysporum, F. solani, F. verticillioides, Rhizoctonia solani, Alternaria sp., Colletotrichum sp., Clonostachys sp., Geotrichum sp., y Spongospora subterranea f. sp. subterranea. En el 9% restante de las muestras no se identificó ningún organismo relacionado con el daño, por lo que claramente es posible visibilizar que existe un riesgo potencialmente alto de que las plantaciones en Guatemala puedan empezar a mostrar infecciones de estos patógenos.

El diagnóstico convencional de enfermedades en el tubérculo de papa se basa en métodos tradicionales que incluyen la observación visual de síntomas, microscopía, pruebas serológicas y moleculares. En el caso de la inteligencia artificial ha revolucionado el diagnóstico de enfermedades en cultivos, incluyendo las del tubérculo de papa. Las técnicas

de IA, como el aprendizaje profundo (deep learning) y el procesamiento de imágenes, permiten una identificación rápida y precisa de enfermedades emergentes. Algunos de los métodos más destacados incluyen: Visión por Computadora, Redes Neuronales Artificiales (ANN), Aplicaciones Móviles: Desarrollo de aplicaciones que permiten a los usuarios tomar fotos de sus cultivos y recibir un diagnóstico inmediato. Estas aplicaciones utilizan IA para analizar las imágenes y proporcionar recomendaciones de tratamientos. (Yandun,2020)

Al comparar teóricamente los dos métodos (Convencional y con IA) y determinar sus beneficios se puede hacer de acuerdo a los parámetros de precisión, velocidad y accesibilidad de los diagnósticos. En el caso de la precisión, mientras que los métodos convencionales dependen en gran medida de la experiencia del observador, las técnicas de IA ofrecen una precisión más alta y consistente. En el caso de la velocidad, puede procesar y analizar datos mucho más rápido que los métodos tradicionales, permitiendo una respuesta más rápida ante brotes de enfermedades y en el caso de la accesibilidad, las aplicaciones basadas en IA pueden ser utilizadas por agricultores sin necesidad de equipamiento especializado, democratizando el acceso a diagnósticos avanzados. (Yandun, 2020)

Por lo que en este proyecto de investigación que planteó el objetivo de generar información que posibilite un diagnóstico oportuno de las enfermedades emergentes en el tubérculo de papá, facilitando un manejo adecuado y promoviendo un incremento en la productividad del cultivo por medio de la identificación de los agentes causales de la enfermedades que prevalezcan, así como la determinación de la precisión de los métodos de inteligencia artificial para la identificación de estas enfermedades, ya que es una tecnología que puede redundar en el futuro en una herramienta que permita a técnicos y agricultores diagnosticar de una manera fiable las enfermedades de sus cultivos y les permita tomar decisiones en las estrategias a implementar para tener controles preventivos y curativos de las mismas. Y así mismo, como factor de superior importancia, en el caso de enfermedades del tubérculo de papa, que es la no difusión o expansión de las mismas a otras zonas de producción por medio de tubérculos infectados que sean utilizados como tubérculo-semilla.

La población meta a la que va dirigida el estudio son en general los 70,000 productores de papa de Guatemala y sus familias, ya que con la información generada en este estudio se

pretende crear un manual de identificación de las nuevas enfermedades que pueda apoyar a generar mejora de estrategias de manejo de las enfermedades y que se podría difundir por redes sociales.

Los resultados del estudio mostraron que 5 géneros de bacterias están asociadas a la sintomatología y 7 géneros de hongos. Así como un género de nemátodos. Sin embargo, la precisión de las cuatro aplicaciones de IA para identificación de las enfermedades en los tubérculos de papa fue mínima, al contrario de una precisión del 100% al hacer el diagnostico de muestras foliares con sintomatología de enfermedades de papa. Lo que demuestra que el software desarrollado para enfermedades de tubérculos es muy incipiente aún a cambio del software desarrollado para enfermedades foliares del mismo cultivo.

2 Contexto de la investigación

2.1 Delimitación temporal

La investigación se realizó de febrero a diciembre del 2025.

2.2 Delimitación espacial:

El área de cobertura del proyecto fueron los departamentos de Quetzaltenango, San Marcos y Huehuetenango.

Altitud: La altitud de siembra del cultivo de papa en estas regiones es superior a los 2400 msnm.

Temperaturas: En las regiones productoras de papa de los departamentos de Quetzaltenango, San marcos y Huehuetenango las temperaturas promedio varían a lo largo del año. Generalmente, las temperaturas oscilan entre los 5°C y 21°C. Durante la temporada cálida, que va desde mediados de marzo hasta principios de mayo, las temperaturas máximas diarias suelen superar los 21°C. El mes más cálido es mayo, con temperaturas que alcanzan un promedio máximo de 20°C y un mínimo de 10°C. En contraste, la temporada fresca dura desde principios de septiembre hasta finales de enero, con temperaturas máximas diarias que no superan los 19°C. Enero es el mes más frío, con temperaturas mínimas promedio de 6°C y máximas de 19°C

Tipos de Suelos: En esta región predominan los Entisoles, Inceptisoles, Molisoles y Alfisoles1. Estos suelos varían en su capacidad de retención de agua y nutrientes, lo que influye en la agricultura local.

Precipitación: La precipitación promedio de la zona del altiplano con producción de papa es de 2,700 mm anuales.

3 Revisión de literatura

3.1 Diagnostico fitopatológico con inteligencia artificial

Las enfermedades de los cultivos también son un motivo de gran preocupación para el agricultor, ya que se requieren conocimientos y experiencia importantes para detectar una planta enferma y tomar las medidas necesarias para su recuperación. Actualmente, en todo el mundo se utilizan sistemas asistidos por ordenador para diagnosticar enfermedades y sugerir medidas de control. Históricamente se han desarrollado sistemas basados en reglas de un modelo basado en lógica difusa para pronosticar enfermedades según la duración de la humedad de las hojas. Así mismo, se han diseñado diferentes modelos basados en redes neuronales artificiales para el control de enfermedades en diferentes cultivos. (Ghosh et al., 2018)

El uso de la tecnología en el proceso de detección y análisis aumenta la precisión y la fiabilidad de estos procesos. Por ejemplo, las personas que utilizan la última tecnología para analizar las enfermedades que surgen inesperadamente tienen más posibilidades de controlarlas que las que no lo hacen. También las enfermedades causan pérdidas sustanciales en los casos en que la agricultura se realiza con fines comerciales. El uso de la visión artificial (CV) y el aprendizaje automático (ML) podría mejorar la detección y la lucha contra las enfermedades. La visión artificial es una forma de inteligencia artificial (IA) que implica el uso de computadoras para comprender e identificar objetos. Se aplica principalmente en las pruebas de conductores, el estacionamiento y la conducción de vehículos autónomos y ahora en los procesos médicos para detectar y analizar objetos [1]. La visión artificial ayuda a aumentar la precisión de la protección contra las enfermedades en las plantas, lo que facilita la seguridad alimentaria. (Khan et al., 2021)

Aplicación Movil Profesional AGRIO

AGRIO es una solución de agricultura de precisión basada en la inteligencia artificial que ayuda a supervisar, identificar y tratar de forma remota las enfermedades y plagas de las plantas en el campo. Agrio utiliza y aplica algoritmos propios de inteligencia artificial y visión por ordenador para gestionar los cultivos y mejorar el rendimiento. El médico de plantas digital contiene los conocimientos de numerosos expertos en agricultura de todo el mundo y mejora continuamente.

En los últimos años, los productos basados en software han alcanzado la capacidad de completar tareas visuales con una precisión superior a la de un humano experto. ¿Por qué no aplicar entonces esta tecnología a la asesoría agronómica? La generalización de los dispositivos móviles hace que esta pregunta sea aún más relevante, ya que dichos dispositivos permitieron distribuir una solución a gran escala. (AGRIO,2021)

Agrio es una aplicación para Android e iOS desarrollada para gestionar la protección de las plantas de una forma óptima. La identificación de enfermedades es un componente crucial en la rutina de protección de plantas. El valor que ofrece la aplicación también atrae a otras audiencias. Los cultivadores domésticos que buscan asesoramiento profesional son una gran parte de la base de usuarios, aprovechando la función de identificación de enfermedades para sus necesidades. Esto está alineado con una tendencia creciente de los quienes usan la tecnología para ayudar a cultivar alimentos en sus hogares. Además, Agrio sugiere tratamientos biológicos y orgánicos como parte de los protocolos de manejo integrado de plagas, lo que lo hace aún más relevante para los jardineros y cultivadores domésticos. (AGRIO, 2021)

¿Cómo identifica la inteligencia artificial las enfermedades y plagas de las plantas?El reconocimiento de imágenes de última generación se basa en el concepto de redes neuronales artificiales. A la red neuronal se le presentan ejemplos de plantas enfermas que fueron etiquetadas por expertos. En el proceso de aprendizaje, la red neuronal se adapta hasta maximizar la puntuación de rendimiento. El resultado es una aplicación que identifica las enfermedades de las plantas y mejora constantemente a medida que se presentan más ejemplos. Con base en los comentarios de los productores y las observaciones realizadas en los campos, Agrio aprende qué protocolos de tratamiento son más efectivos. Un tratamiento

que no fue efectivo señala un posible problema con la identificación y proporciona más información para que la red mejore. (AGRIO, 2021)

¿Por qué la inteligencia artificial es el enfoque correcto? Hay un vacío masivo en los asesores de protección de plantas que conduce al 40% de las pérdidas de rendimiento. La relación entre trabajadores de extensión y agricultores es desproporcionadamente baja y está lejos de la relación óptima de 1:50. El acceso a asesoramiento de alta calidad está aún menos disponible para los cultivadores domésticos. Con la ayuda de la IA, podemos ofrecer una solución de reconocimiento de imágenes de uso gratuito y también Premium que puede cerrar esta brecha. Agrio analiza miles de imágenes diariamente, lo que de otro modo requeriría cientos de horas de expertos humanos, una alternativa que no es económica. La solución no tiene una escala limitada y, por lo tanto, ofrece una forma viable de apoyar a los productores, mejorar la producción mundial de alimentos y reducir el hambre. (AGRIO, 2021)

Aplicación Plantix

Es una aplicación móvil con un enfoque B2C (Business to Consumers) impulsado por el startup PEAT GmbH, con sede en Berlín, utiliza datos de imágenes científicas y de aprendizaje automático suministrados por ICRISAT e instituciones de investigación locales para brindar información sobre plagas y enfermedades. Actualmente, la base de datos tiene medio millón de imágenes que cubren 30 cultivos en todo el mundo y ofrece remedios para más de 120 enfermedades de los cultivos. Plantix ha recaudado 3,8 millones de descargas y se ha lanzado en más de 10 idiomas. La aplicación ayuda a diagnosticar daños por plagas, enfermedades de las plantas y deficiencias de nutrientes tomando una foto del cultivo afectado. Los usuarios pueden discutir las posibles causas y soluciones entre sí, o con expertos pagados para monitorear las infestaciones y proporcionar soluciones científicamente comprobadas La aplicación ha sido descargada por casi 12 millones de usuarios en todo el mundo, La App recibe fotografías del cultivo afectado y éstas se analizan mediante algoritmos de inteligencia artificial. Los resultados se devuelven inmediatamente al usuario. Se proporciona información crítica sobre los síntomas, los desencadenantes, los productos químicos y los tratamientos biológicos. Todas las imágenes enviadas a través de la aplicación están geo etiquetadas, lo que permite el seguimiento en tiempo real de plagas y

enfermedades. Los metadatos resultantes proporcionan información valiosa sobre la distribución espacial de los cultivos y las enfermedades más importantes de las plantas, por ejemplo, en forma de mapas de alta resolución. Además, la aplicación incluye un sistema de información meteorológica específico para la ubicación de los agricultores y una función comunitaria que facilita la interacción con otros actores interesados en los servicios de protección vegetal.

Algoritmos de Inteligencia artificial para diagnóstico de enfermedades de las plantas y algoritmo de inteligencia de enjambre para la selección de características (SSAFS)

Es un algoritmo que permite la detección eficiente de enfermedades de las plantas basada en imágenes. Entre los beneficios de la introducción de SSAFS, es porque no solo reduce significativamente el recuento de características, sino que también mejora significativamente la precisión de la clasificación. En un estudio recientemente realizado se utilizó una combinación de dos principios: fenómica de alto rendimiento, a través de la cual se pueden analizar a gran escala rasgos de la planta como la gravedad de la enfermedad, y visión por computadora, en la que se extraen características de imagen representativas de una condición específica. Usando SSAFS y un conjunto de imágenes de plantas, los investigadores identificaron un «subconjunto de características óptimas» de las enfermedades de las plantas. Este subconjunto abarcaba una lista de solo las características de alta prioridad que podrían clasificar con éxito una planta como enferma o sana, y estimar aún más la gravedad de la enfermedad. La eficacia de SSAFS se probó en cuatro conjuntos de datos de UCI y seis conjuntos de datos de fenómica de plantas. Estos conjuntos de datos también se utilizaron para comparar el rendimiento de SSAFS con el de otros cinco algoritmos de inteligencia de enjambre similares. Los hallazgos demuestran que SSAFS funciona bien tanto en la detección de enfermedades de las plantas como en la estimación de la gravedad. De hecho, superó a los algoritmos de última generación existentes en la identificación de las características de imagen artesanales más valiosas. Curiosamente, la mayoría de estas características relacionadas con la enfermedad eran locales, es decir, involucraban patrones o estructuras distintas, como puntas, bordes y parches, que a menudo se observan en las plantas enfermas. En general, este algoritmo es una herramienta valiosa para obtener una combinación óptima

de características de imágenes artesanales indicativas de enfermedades de las plantas. Su adopción podría mejorar significativamente la precisión del reconocimiento de enfermedades de las plantas y reducir la duración del procesamiento requerido.

3.2 Enfermedades de tubérculo de papa

El cultivo de la papa tiene un gran número de problemas fitosanitarios destacando las enfermedades causadas por hongos como: Phytophthora infestans, Fusarium spp., Alternaria solani, y Rhizoctonia solani. Estas enfermedades tienen una distribución mundial, y ocasionan pérdidas en plantas anuales, hortalizas, ornamentales y plantas perennes. Han ocasionado pérdidas que varían entre un 20 a un 50% en la producción de papa, principalmente en los tubérculos. El método más común para disminuir el daño ocasionado por este hongo es el químico; con la desventaja de su alta residualidad en el suelo, la que además afecta la microflora benéfica pudiéndose acumular, en algunos casos, en las partes comestibles de las plantas. (Castillo et al., 2001)

Tizón tardío (Phytophthora infestans (Mont.) de Bary)

En la parte externa de los tubérculos infectados se observan depresiones muy superficiales e irregulares, de tamaño variable y de consistencia dura. Al hacer un ligero raspado (con un cuchillo o con la uña), debajo de la piel afectada el tejido es de color marrón. Cortando transversalmente un tubérculo afectado, se observa en la superficie de corte una necrosis de forma irregular, de color marrón, de apariencia granular que avanza de la periferia hacia el centro de la medula. (Torres, 2002)

La dispersión en el campo de esta enfermedad puede ocurrir a partir de tubérculos infectados o de inóculo externo (esporangios) proveniente de otros campos de cultivo. En el primer caso el hongo invade los brotes de los tubérculos infectados formando esporas que van a otros brotes y plantas, y bajo condiciones de humedad apropiada pasan por el suelo infectando plantas cercanas, y si las condiciones climáticas son favorables ocurre la distribución en el cultivo. La segunda vía no presenta un foco bien definido y la enfermedad aparece rápidamente distribuida en forma uniforme en el campo. Diferentes niveles de la enfermedad se originan en gran parte del inóculo que proviene de campos cercanos infectados. (Ferrera y Escalante, 2006)

Rizoctonosis (Rhizoctonia solani)

En la superficie de los tubérculos se forman costras negras y cuando estos son usados como semilla se inicia la enfermedad en la nueva planta Este síntoma tan característico es la presencia de esclerocios, en la superficie del tubérculo, conocido comúnmente como Costra negra (Huarca et al, 2009).

Los esclerocios pueden variar en tamaño, pueden ser muy pequeños, planos, punteados y negros hasta ser grandes masas irregulares que cubren una gran parte de la superficie del tubérculo. Estos esclerocios tienden a confundirse con tierra adherida al tubérculo (Bettiol et al. 2014). De acuerdo con Montaldo (1984) la forma de perpetuarse es mediante la formación de esclerocios, cuerpos negros y duros, que se originan en la superficie de los tubérculos o viven en el suelo. Estas formas latentes son muy resistentes a condiciones adversas de temperatura y humedad. La germinación de los esclerocios origina micelios que invaden las plantas de papa.

Tizón temprano (alternaria solani)

Las infecciones en los tubérculos se caracterizan por lesiones irregulares, hundidas, bordes elevados. Están distribuidas sin orden en la superficie del tubérculo. Las lesiones comienzan con una coloración gris a púrpura tornándose oscuras, circulares e irregulares, hundidas con bordes levantados de color marrón a púrpura, distribuidas des uniformemente en la superficie del tubérculo. El tejido que se observa debajo alcanza desde unos pocos milímetros hasta 3 cm y es de color marrón oscuro, duro, seco y coriáceo (Zachmann, 1982).

Castellanos (2012), indica que una gran presión de inóculo en el suelo puede provocar daño en tubérculos durante el almacenamiento, observándose lesiones ligeramente hundidas de color café sobre la superficie.

Pudrición Blanda (Erwinia carotovora uar. carotovora)

Según Zapata (2000), El ataque a los tubérculos se produce en el suelo, antes de la cosecha o en el almacenamiento. La bacteria penetra por heridas, o por el extremo del estolón que comunica a la papa con la planta madre. Al comienzo las lesiones tienen forma de heridas circulares húmedas, ligeramente hundidas, de color canela a castaño.

En ambiente seco las áreas se hunden profundamente, se endurecen y se secan. De esta manera se presenta una clara demarcación entre el tejido sano y el enfermo. Este último, es inodoro inicialmente, pero a medida que la pudrición avanza adquiere olor desagradable y se torna pegajoso, debido a la presencia de otros microorganismos secundarios. El tejido del tubérculo afectado por pudrición blanda es húmedo, de color crema o canela y consistencia blanda, fácilmente separable del tejido sano. A medida que avanza el daño adquiere un olor desagradable debido a la presencia de organismos secundarios. (Mendez y Gaete, 2006)

Roña (Spongospora subterranea)

Aparecen como lesiones de color marrón violáceo, que más tarde se convierten en pequeñas ampollas que pueden aparecer desde los 43 días después de la siembra. Mientras que los síntomas maduros, aparecen como lesiones redondas, de bordes ligeramente elevados, generalmente poco profundas y de variable diámetro en un rango de 0,5 a 2 mm, que en su interior contienen masas de esporas visibles a partir de los 75 días después de la siembra. Estos síntomas se convierten en pústulas abiertas y de color pardo rojizo con un diámetro de 2 a 10 milímetros, o aún más grandes, y que liberan la masa polvorienta de esporas de resistencia de color castaño oscuro cuyo número varía desde algunos centenares a más de un millar. En algunos casos, las lesiones maduras no se abren, apareciendo como lesiones oscuras y elevadas, que se abren una vez que los tubérculos han sido almacenados. (Acuña,et al. 2021)

Sarna plateada (Helminthosporium solani)

Acuña y Cadiz (2011) indican que afecta el peridermo del tubérculo alterando su apariencia y calidad de procesamiento, no afecta el rendimiento. En papas de piel roja los síntomas son más notorios, pero también afecta papas de piel blanca. Los primeros síntomas se presentan como pequeños puntos circulares de color claro, que se agrandan hasta cubrir gran parte del tubérculo. Las áreas afectadas presentan un color plateado brillante, especialmente cuando el tubérculo está húmedo. La transmisión del hongo es principalmente a través de tubérculos semilla enfermos que infectan el suelo y posteriormente a los nuevos tubérculos. Cuanto más tiempo permanecen los tubérculos en el suelo postsecado de las plantas, mayor es la probabilidad de infección y severidad de la enfermedad. La enfermedad continúa

incrementándose durante el almacenamiento, donde se pueden producir nuevas infecciones si las condiciones de alta temperatura y humedad prevalecen.

Sarna Común (Streptomyces scabies.)

Los síntomas de la sarna son muy diversos, pero generalmente se presentan como lesiones corchosas irregulares, de color café, de tamaño variable y que se desarrollan en cualquier lugar de la superficie del tubérculo. A veces los síntomas consisten en una capa superficial de tejido corchoso que cubre gran parte de la superficie del tubérculo. Lesiones ocasionadas por sarna común (russet), a veces son de hasta 1cm. de profundidad, café oscuras con el tejido bajo la lesión de color café claro y translúcido. En el mismo tubérculo pueden presentarse ambos tipos de lesiones. Los síntomas se desarrollan durante la estación de crecimiento, pero el período de infección ocurre cuando el tubérculo se está formando. Pocas semanas después de la infección aparecen en el tubérculo en crecimiento pequeñas lesiones circulares acuosas. Los tubérculos maduros ya no son susceptibles a la infección, pero las lesiones formadas pueden seguir expandiéndose a medida que el tubérculo crece, aumentando la severidad del daño. (Sohaib, et al., 2020)

Pudrición Seca o Fusariosis (Fusarium)

En los tubérculos las lesiones que se inician en las heridas se hacen evidentes alrededor de un mes después del almacenaje. La infección se va extendiendo lentamente y el peridermo correspondiente a las partes lesionadas se hunde y arruga, formando a veces anillos concéntricos a medida que el tejido se va secando. Del peridermo muerto pueden emerger pústulas que contienen micelio y esporas. Los tubérculos podridos se arrugan y finalmente se momifican. La necrosis interna toma un matiz castaño que varía hasta el chocolate oscuro, con el borde ligeramente necrosado que se distingue por una coloración más oscura. Los bordes de la lesión en progreso retienen su coloración castaña, pero el tejido necrosado viejo adopta una variedad de colores, forma cavidades tapizadas de micelio y se seca tomando consistencia de madera podrida (Hooker, 1980).

Los tubérculos afectados por R. solani presentan lo que se conoce como "ojos ciegos" y masas compactas de micelio llamadas esclerocios en la superficie, de color negro a castaño oscuro, éstas presentan variabilidad en tamaño y forma, y son fácilmente extraíbles. Estas estructuras

son producidas solamente por los grupos de anastomosis GA3 y GA7. Por otro lado, para el control de esta enfermedad, no existe ningún fungicida efectivo. se ha demostrado que el control biológico de R. solani con Rhizoctonia binucleada reduce la muerte de plántulas de papa provenientes de semilla sexual cuando éstas son transplantadas a campos infectados con R. solani, sin embargo, no se han terminado de ajustar las dosis y los métodos de aplicación (Arcos y Zuñiga, 2015).

3.3 Diagnostico con marcadores moleculares

Los marcadores moleculares son fragmentos específicos de ADN que se utilizan como **señales** para identificar variaciones genéticas entre individuos o poblaciones. Collard y Marckill (2008) explican que los marcadores moleculares son herramientas indispensables en el campo de la agricultura, biología, ecología, ciencias forense y estudios de diversidad genética. Una de las funciones principales es localizar y aislar genes de interés, actualmente existen varias técnicas moleculares que permiten conocer las proporciones de genes en las poblaciones naturales de manera indirecta, así como también el análisis de proteínas directamente relacionado a estudios de ADN.

3.3.1 PCR (Reacción en Cadena de la Polimerasa)

La PCR es una amplificación in vitro, de ADN y se determina en tres pasos: la desnaturalización es la copia del ADN molde del patógeno en estudio, incrementando la temperatura para separar las dos cadenas que la componen; luego pasa a la hibridación aquí se aparean los oligonucleótidos del ADN y se requiere que la temperatura baje, causando que estas cadenas pequeñas de ADN se una a la secuencia complementaria en el individuo y se limite la secuencia amplificada. Para terminar, se eleva nuevamente la temperatura de la reacción hasta llegar a la óptima de la polimerasa de ADN, provocando la extensión de las cadenas hijas correspondiente dicho de otra manera se duplica el número inicial de ADN. Se repite estos tres pasos logrando obtener un número de cadena delimitada por el oligonucleótido (Li, et al 2009).

El proceso descrito anteriormente es para una PCR clásica pues se amplifica exponencialmente el ADN haciendo uso de dos cebadores, existen otras variantes que no pueden ser excluyentes (Acosta 2025).

3.3.2 Técnicas moleculares para identificación genética de organismos

Diferentes técnicas que se han reportado para asociar por medio análisis genético a un organismo. Dentro de las técnicas se puede utilizar. La técnica de RFLP (Restriction Fragment Length Polimorphism Analysis), esta técnica permite obtener una serie de fragmentos del ADN de diferentes tamaños que dan lugar a un patrón de bandas PCR/RFLP, estos fragentos se obtienen utilizando enzimas de restricción (Quitero 2025).

Según Dávila 2001, si el objetivo es realizar estudios filogenéticos entre diferentes organismos, se puede utilizar la técnica de RAPD (Random Amplificatión of Polimorphic ADN).

De acuerdo con Suarez & Peñaranda, (2022), la identificación molecular de hongos en general se realiza con la amplificación por PCR y cebadores universales de la región ITS del ADNr (Álvarez 2007). La región codificada, ITS e IGS, cambian rápidamente por lo tanto son útiles para la comparación entre especies de hongos dentro de un mismo género o cepa dentro de una especie.

La secuenciación automática se utiliza la reacción anteriormente mencionada, pero con la diferencia de que esta técnica se realiza con fluorescencia en vez de radioactividad. Cada emisión fluorescente es transmitida como una señal directamente a una computadora donde un programa la interpreta y codifica como nucleótido particular, facilita la captura de los nucleótidos debido a que se incorporan a programas que los leen desde el gel. Es una de las mejores alternativas para estos procesos, siendo su mayor limitante el alto costo de ejecución.

3.3.3 Secuenciación de ADN

Es un análisis más detallado del ADN, ya que se secuencia la región de interés para diferentes individuos. Años atrás el uso de secuencias para diferentes estudios no era muy práctico, ya que los fragmentos de ADN de cada individuo debían ser aislados para librerías de ADN subgenómico después de haber pasado por una hibridación. En la actualidad debido a la evolución de la tecnología, este proceso es muy común y práctico para el análisis de genética de poblaciones y de problemas taxonómicos. (Alcántara, 2007)

Para la secuenciación de hongos patógenos con frecuencia utilizan la región ITS (Internal Transcribed Spacer) es una de las técnicas más utilizadas para su identificación. Se utiliza la

región del ADN ribosomal y se lo caliza entre los genes 18S y 28S e incluye ITS1, 5.8S E ITS2. Siendo el principal código de barras genético de los hongos debido a que combinan zonas conservadas (para amplificación de PCR) con regiones variables que permiten diferenciar las especies (Cueva, 2008).

La secuenciación inicia con la extracción del ADN de hongos purificados en medios de cultivo, o de forma directa es decir el hongo se encuentra esporulando en el tejido vegetal, posteriormente se amplifica la región ITS mediante el PCR utilizando para ello cebadores universales y posteriormente secuenciar el fragmento obtenido. Luego se compara la secuencia obtenida con bases de datos para su identificación (Minchala & Tacuri, 2023)

De acuerdo con Parra (2025), La región ITS presenta algunas limitantes, ya que en ciertos géneros (como *Fusarium o Aspergillus*) no siempre permite identificar especies debido a que son muy cercanas por lo que se hace necesario complementar con otros marcadores.

Para la identificación molecular de bacterias de acuerdo con Schaad et al. (2001) la técnica más utilizada esta la PCR (Reacción en Cadena de la Polimerasa), utilizando la secuencia del gen 16S analizando el ADN-rRNA (ADN ribosomal) utilizando marcadores moleculares específicos. Esta herramienta es clave para identificar especies bacterianas, estudiar su diversidad genética y poder realizar planes de manejo y estrategias de control más eficaces.

4 Planteamiento del problema

En Guatemala no se conoce la etiología de las enfermedades emergentes que están afectando los tubérculos del cultivo de papa y que como consecuencia de su presencia han provocado la disminución de la productividad del cultivo en las zonas afectadas. El hecho de realizar una diagnostico oportuno y preciso permite generar recomendaciones de manejo de la enfermedad para en primer lugar tratar de impedir el trasiego de semilla con sintomatología de las enfermedades y que puedan ser los instrumentos de propagación de la enfermedad a otras zonas de cultivo en Guatemala y en segundo lugar que se pueda generar un plan de manejo de la enfermedad para mitigar los efectos de ésta sobre el rendimiento y la productividad del cultivo. Por lo que el contar con un método de diagnóstico rápido y eficaz

puede permitir contribuir a disminuir esta problemática. Las enfermedades emergentes en el cultivo no son exclusivas de Guatemala, en México se han detectado brotes de enfermedades infecciosas de la papa entre ellas la *Clavibacter michiganensis subsp*. *sepedonicus*, *Ralstonia solanacearum* raza 3 y *Leptinotarsa decemlineata* (SENASICA, 2022), por lo que se considera que una situación global que afecta la producción de la semilla de papa en general. Por lo que se plantearon las siguientes preguntas de investigación que se intentaron resolver con este estudio: ¿Que agente causal es el que está asociado a las sintomatologías de las diferentes enfermedades emergentes que están ocurriendo en el tubérculo de la papa? , y ¿Qué grado de precisión tienen los diagnósticos operados por inteligencia artificial para la determinación de las agentes causales de las enfermedades del tubérculo de la papa en comparación con los métodos convencionales de diagnóstico

5 Objetivos:

5.1 Objetivo General:

Generar información que posibilite un diagnóstico oportuno de las enfermedades emergentes en el tubérculo de papá, facilitando un manejo adecuado y promoviendo un incremento en la productividad del cultivo.

5.2 Objetivos Específicos:

Determinar el agente causal de las nuevas enfermedades que están afectando al tubérculo de la papa.

Establecer el grado de precisión que tienen los sistemas de inteligencia artificial para el diagnóstico de las enfermedades del tubérculo de la papa en comparación con los métodos convencionales.

Elaborar un manual de síntomas y recomendaciones de manejo de las enfermedades del tubérculo de la papa.

6 Hipótesis

Las nuevas enfermedades que están afectando al cultivo de papa en el altiplano de Guatemala son de origen biótico y es posible identificar su agente causal por medio de diagnósticos convencionales y de inteligencia artificial.

7 Método

7.1 Tipo de investigación.

El tipo de la investigación es aplicada, ya que se generó conocimiento que permitió recomendar medidas que permiten resolver un problema y de esta forma incrementar o mantener la productividad del cultivo.

7.2 Enfoque y alcance de la investigación.

La investigación tuvo un enfoque cuantitativo y un alcance descriptivo explicativo

7.3 Diseño de la investigación.

La investigación fue cuantitativa y de carácter no experimental, observacional, prospectiva y transversal.

7.4 Población, muestra y muestreo.

La población o universo fueron los productores de papa de los 3 municipios con mayor cantidad de productores de papa de Guatemala y en los cuales se han reportado aparecimiento de nuevas enfermedades.

La muestra a tomar fue de 1 kilogramo de papa con la misma sintomatología en los tubérculos.

El tipo de muestreo a utilizar será Discrecional (Hernandez O, 2021) , ya que el muestreo discrecional es un tipo de muestreo en el que un investigador selecciona una muestra basada en su conocimiento sobre el tema. La muestra es elegida a partir de un criterio profesional y puede basarse en la experiencia de investigaciones realizadas con anterioridad o en el conocimiento que el investigador tiene sobre la población. El muestreo discrecional es considerado un muestreo no probabilístico.

Por lo que se esperan obtuvieron 30 muestras de tubérculos con enfermedades del tubérculo de 10 municipios productores de papa en Guatemala. Siendo estos:

Concepción Chiquirichapa, San Juan Ostuncalco, San Martín y Palestina de los Altos en Quetzaltenango.

Ixchiguan, San Pedro y San Marcos en el departamento de San Marcos.

Chiantla, Todos Santos Cuchumatan y Aguacatan en el departamento de Huehuetenango.

7.5 Técnicas.

7.5.1 Fase de Campo:

Se identificaron asociaciones de productores de papa, ONGS, proyectos e instituciones que tienen presencia en los diez municipios productores seleccionados, así como a miembros de organizaciones no formales como grupos CADERES del MAGA.

Se realizó una campaña con las organizaciones para promover la colaboración de los agricultores para aportar muestras de tubérculos de semilla de papa que presenten síntomas de enfermedades o su identificación en mercados locales.

Se establecieron días de colecta de muestras y el equipo d investigación participó en las mismas.

7.5.2 Fase de Laboratorio:

Los laboratorios utilizados fueron el laboratorio de Fitopatología de la División de Ciencia y Tecnología del Centro Universitario de Occidente, así como el módulo de laboratorios de la División. Así mismo, se contó con la colaboración del Laboratorio de Protección Vegetal de la Universidad del Valle de Guatemala.

Las muestras se almacenaron bajo condiciones de temperatura, luminosidad, humedad relativa óptima para muestras fitopatológicas.

La técnica básica que se utilizó para la detección de las muestras fue por microscopía óptica, microscopia digital y la utilización de Inmuno Strips de AGDIA. De manera complementaria se contrataron los servicios de secuenciación para la identificación taxonómica de los agentes causales no determinados por las técnicas básicas.

Las técnicas de Inteligencia Artificial utilizadas fueron con el uso del software de aplicaciones móviles comerciales: Plantix, Agrio, Tumani CIAT, Dr. Nabbat, Plant Disease Identifier y Plant Disease Diagnostic. Se utilizaron versiones gratuitas y de pago de estas aplicaciones.

Para la realización de las capturas de las imágenes se utilizó una Tablet con procesador Snapdragon 8 Gen 2 for Galaxy con lente frontal 13 MP AF (Con enfoque automático y con sensor de apertura de diafragma) con un sistema operativo Android 13 con One UI. Las

muestras del síntoma de a enfermedad fueron colocadas sobre un fondo blanco, el ángulo de toma de la captura será de 90 grados y la distancia entre el lente y la muestra dependió del autoenfoque del lente.

7.5.3 Fase de Gabinete

Sé elaboró un informe con información de imágenes de los síntomas identificados en los tubérculos, así como el diagnostico convencional (microscópico, inmunológico y/o de secuenciación genómica) y también con el de las aplicaciones de inteligencia artificial y se describió la sintomatología y el agente causal, la enfermedad y algunas recomendaciones de manejo de la enfermedad.

7.6 Resumen de las variables o unidades de análisis.

TABLA 1 OBJETIVOS, VARIABLE, INSTRUMENTOS Y UNIDAD DE MEDIDA O CUALIFICACIÓN UTILIZADA EN LA INVESTIGACIÓN.

Objetivo específico	Variable	Instrumentos	Unidad de medida o cualificación
Determinar el agente causal de las enfermedades que están afectando al tubérculo de la papa.	Agente causal	Microscopia Test inmunológicos y pruebas de secuenciación molecular.	Muestras de tubérculos con síntomas asociados a una enfermedad y a un agente causal.
Establecer el grado de precisión que tienen los sistemas de inteligencia artificial para el diagnóstico de las enfermedades del tubérculo de la papa.	Porcentaje de precisión.	Tablas de Cotejo entre diagnostico fitopatológico básico y diagnostico fitopatológico por técnicas de IA.	Número de muestras identificadas de manera similar por ambos métodos.

Nota. Síntesis de la operatividad y coherencia del proyecto.

7.7 Procesamiento y análisis de la información.

Los resultados de los análisis de laboratorio fueron procesados por medio de Estadística no paramétrica y fueron utilizados los métodos de Estadística descriptiva multivariada. Dentro de estos los métodos utilizados fueron: Análisis de Conglomerados que permitió agrupar las muestras de acuerdo a los resultados de diagnóstico. Por lo que se listaron las enfermedades

diagnosticadas, su frecuencia de detección y los lugares o municipios en donde fueron obtenidas las muestras. Los análisis se realizaron con el Software estadístico INFOSTAT Profesional versión 2020p

8 Aspectos éticos y legales

9

El tipo de estudio no aplica para la normativa del CONAP y es un proyecto original que no tiene financiamiento extra ni ha sido sometido a alguna convocatoria previa.

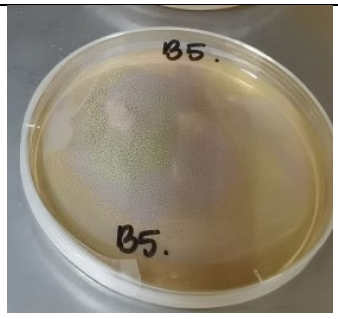
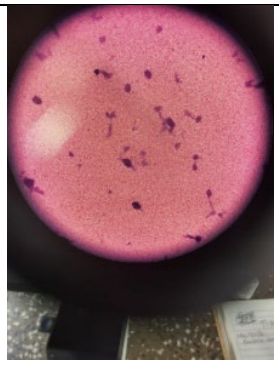
9 Resultados y Discusión

9.1 Diagnostico convencional

9.1.1 Diagnostico bacterial

TABLA 2

PROCESO DE DIAGNÓSTICO DE MUESTRA NÚMERO 1 CON SINTOMATOLOGÍA DE ENFERMEDAD PROVOCADA POR BACTERIAS

Muestra	Síntomas en Tubérculo	Aislamiento en caja Petri	Vista en microscopio
B2 LPV-25-1229			

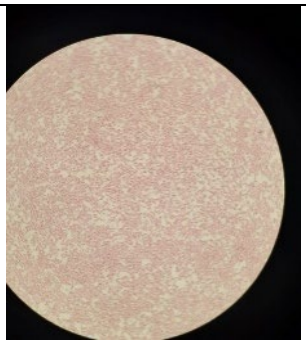
Nota. Se muestran en la tabla la fotografía de la muestra del tubérculo de papa con sintomatología provocada por el patógeno, posteriormente el medio del cultivo de este patógeno y posteriormente el montaje en un microscopio con una ampliación de 10x.

La muestra B2 LPV-25-1229 fue cultivada y aislada en medio de cultivo PDA, posteriormente fue identificada por medio del análisis de secuenciación con la metodología de "Análisis general", corresponde a la alineación en NCBI con toda la base de datos de organismos con una cobertura del 81 por ciento como la bacteria del género: Klebsiella sp. Esta bacteria se caracteriza por que puede actuar como un patógeno oportunista o endófito en el cultivo de papa, desencadenando la pudrición blanda en los tubérculos. Siampi y Dubin (2022) mencionan que, en infecciones avanzadas, el tubérculo pierde su estructura, tornando su tejido interno blando, pastoso y con un olor desagradable. Los síntomas principales que provoca son:

- Ablandamiento del tejido: La papa pierde su firmeza original y cede a la presión.
- Decoloración y mal olor: El interior suele volverse acuoso y desprender un olor fétido (derivado de la fermentación y descomposición bacteriana).
- Infección secundaria: A menudo ocurre junto con otras bacterias (como Pectobacterium) o tras el ataque de plagas (ej. polilla de la papa) que facilitan la entrada de Klebsiella a través de heridas.

TABLA 3

PROCESO DE DIAGNÓSTICO DE MUESTRA NÚMERO 2 CON SINTOMATOLOGÍA DE ENFERMEDAD PROVOCADA POR BACTERIAS.

Muestra	Síntomas en Tubérculo	Aislamiento en caja Petri	Vista en microscopio
B1 LPV-25-1228			

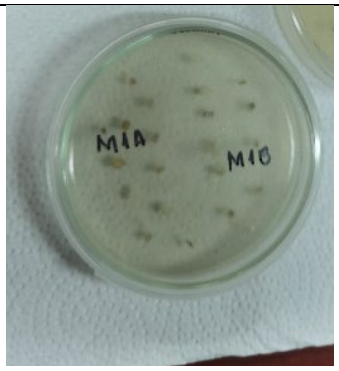
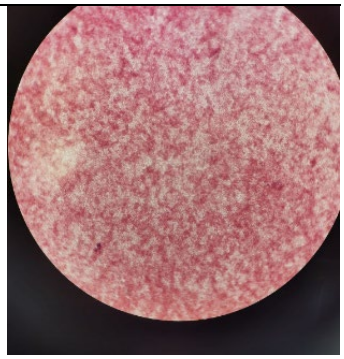
Nota. Se muestran en la tabla en primer lugar la fotografía de las muestras del tubérculo de papa con sintomatología provocada por el patógeno, posteriormente el medio del cultivo de este patógeno y posteriormente el montaje en un microscopio con una ampliación de 10x.

La muestra B2 LPV-25-1228 fue cultivada y aislada en medio de cultivo PDA, posteriormente fue identificada por medio del análisis de secuenciación con la metodología de "Análisis general", corresponde a la alineación en NCBI con toda la base de datos de organismos con una cobertura del 59 por ciento como la bacteria del género: Pseudomonas sp.

Esta bacteria se caracteriza por causar principalmente pudriciones blandas en post cosecha y tejidos de almacenamiento. Afecta a una gran variedad de hortalizas como la lechuga, la alfalfa y la papa, destruyendo las paredes celulares mediante enzimas específicas. Se clasifica esta bacteria dentro del grupo IV LOPAT y detalla su capacidad pectolítica (destrucción de pectina en las paredes celulares de la planta). En Ecuador, Viteri (2020) analizó a la presencia de la bacteria en las provincias de Pichincha, Carchi y Chimborazo. Relaciona a P. marginalis con síntomas específicos en tubérculos: pudrición acelerada, lesiones acuosas, manchas negras en el tallo y zonas rosadas en la superficie del tubérculo.

TABLA 4

PROCESO DE DIAGNÓSTICO DE MUESTRA DE PAPA NÚMERO 3 CON SINTOMATOLOGÍA DE ENFERMEDAD PROVOCADA POR BACTERIAS.

Muestra	Síntomas en Tubérculo	Aislamiento en caja Petri	Vista en microscopio
B3 LPV-25-1230			

Nota. Se muestran en la tabla la fotografía de la muestra del tubérculo de papa con sintomatología provocada por el patógeno, posteriormente el medio del cultivo de este

patógeno y posteriormente el montaje en un microscopio con una ampliación de 10x y mostrando una tinción de Gram negativa.

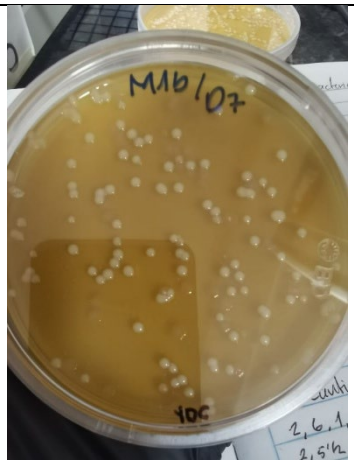
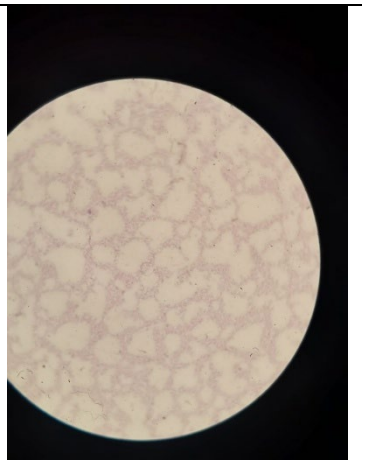
La muestra B2 LPV-25-1230 fue cultivada y aislada en medio de cultivo PDA, posteriormente fue identificada por medio del análisis de secuenciación con la metodología de "Análisis general", corresponde a la alineación en NCBI con toda la base de datos de organismos con una cobertura del 60 por ciento como la bacteria del género: Klebsiella sp.

Esta bacteria se caracteriza por puede actuar como un patógeno oportunista o endófito en el cultivo de papa, desencadenando la pudrición blanda en los tubérculos. Siampi y Dubin (2022) mencionan que, en infecciones avanzadas, el tubérculo pierde su estructura, tornando su tejido interno blando, pastoso y con un olor desagradable. Los síntomas principales que provoca son:

- Ablandamiento del tejido: La papa pierde su firmeza original y cede a la presión.
- Decoloración y mal olor: El interior suele volverse acuoso y desprender un olor fétido (derivado de la fermentación y descomposición bacteriana).
- Infección secundaria: A menudo ocurre junto con otras bacterias (como Pectobacterium) o tras el ataque de plagas (ej. polilla de la papa) que facilitan la entrada de Klebsiella a través de heridas.

TABLA 5

PROCESO DE DIAGNÓSTICO DE MUESTRA DE PAPA NÚMERO 4 CON SINTOMATOLOGÍA DE ENFERMEDAD PROVOCADA POR BACTERIAS.

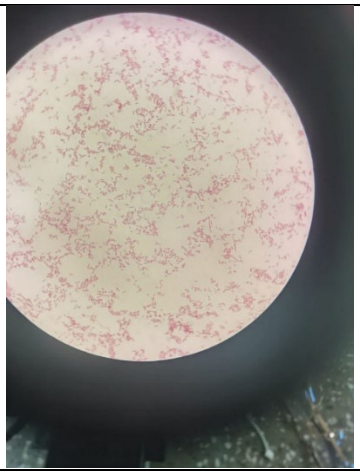
Muestra	Síntomas en Tubérculo	Aislamiento en caja Petri	Vista en microscopio
B4 LPV-25-1231			

Nota. Se muestran en la tabla la fotografía de la muestra del tubérculo de papa con sintomatología provocada por el patógeno, posteriormente el medio del cultivo de este patógeno y posteriormente el montaje en un microscopio con una ampliación de 10x y mostrando una tinción de Gram negativa.

La muestra B2 LPV-25-1231 fue cultivada y aislada en medio de cultivo PDA, posteriormente fue identificada por medio del análisis de secuenciación con la metodología de "Análisis general", corresponde a la alineación en NCBI con toda la base de datos de organismos con una cobertura del 65 por ciento como la bacteria del género: Enterobacter sp. La bacteria Enterobacter se caracteriza por causar pudrición blanda y daños postcosecha en tubérculos de papa, aunque con frecuencia también aparecen como endófitos oportunistas asociados a otras infecciones. En estudios se ha mostrado ocasionando pudrición blanda severa: discos de tubérculo con lesiones de 5.5–7.93 cm y síntomas de marchitez y amarillamiento en plantas infectadas vía riego. Los tipos de daños que ocasiona son principalmente daños superficiales durante la postcosecha en 1 publicación, 23 publicaciones indican pudrición blanda del tubérculo y pudrición blanda en conjunto con marchitez de plantas en 4 publicaciones. (Morkovic, et al, 2023)

TABLA 6

PROCESO DE DIAGNÓSTICO DE MUESTRA DE PAPA NÚMERO 5 CON SINTOMATOLOGÍA DE ENFERMEDAD PROVOCADA POR BACTERIAS.

Muestra	Síntomas en Tubérculo	Aislamiento en caja Petri	Vista en microscopio
B5 LPV-25-1232			

Nota. Se muestran en la tabla la fotografía de la muestra del tubérculo de papa con sintomatología provocada por el patógeno, posteriormente el medio del cultivo de este patógeno y posteriormente el montaje en un microscopio con una ampliación de 10x y mostrando una tinción color rosa tipo Gram negativa.

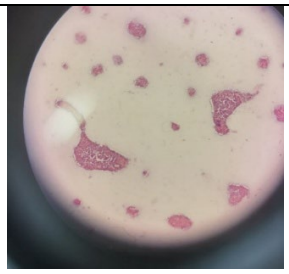
La muestra B2 LPV-25-1232 fue cultivada y aislada en medio de cultivo PDA, posteriormente fue identificada por medio del análisis de secuenciación con la metodología de "Análisis general", corresponde a la alineación en NCBI con toda la base de datos de organismos con una cobertura del 82 por ciento como la bacteria del género: Pseudomonas sp.

Esta bacteria se caracteriza por causar principalmente pudriciones blandas en postcosecha y tejidos de almacenamiento. Afecta a una gran variedad de hortalizas como la lechuga, la alfalfa y la papa, destruyendo las paredes celulares mediante enzimas específicas. Se clasifica esta bacteria dentro del grupo IV LOPAT y detalla su capacidad pecto lítica (destrucción de pectina en las paredes celulares de la planta). En Ecuador, Viteri (2020) analizó a la presencia

de la bacteria en las provincias de Pichincha, Carchi y Chimborazo. Relaciona a P. marginalis con síntomas específicos en tubérculos: pudrición acelerada, lesiones acuosas, manchas negras en el tallo y zonas rosadas en la superficie del tubérculo.

TABLA 7

PROCESO DE DIAGNÓSTICO DE MUESTRA DE PAPA NÚMERO 6 CON SINTOMATOLOGÍA DE ENFERMEDAD PROVOCADA POR BACTERIAS.

Muestra	Síntomas en Tubérculo	Aislamiento en caja Petri	Vista en microscopio
B6 LPV-25-1233			

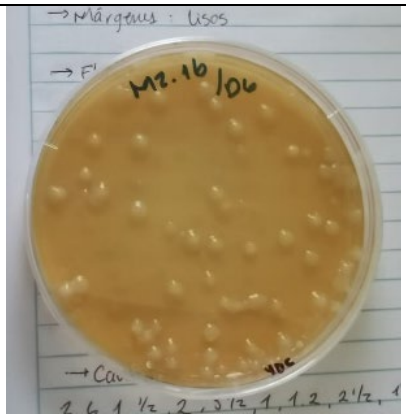
Nota. Se muestran en la tabla la fotografía de la muestra del tubérculo de papa con sintomatología provocada por el patógeno, en donde se ve la perdida parcial de la epidermis, posteriormente el medio del cultivo de este patógeno y posteriormente el montaje en un microscopio con una ampliación de 10x y mostrando una tinción de Gram negativa.

La muestra B2 LPV-25-1233 fue cultivada y aislada en medio de cultivo PDA, posteriormente fue identificada por medio del análisis de secuenciación con la metodología de "Análisis general", corresponde a la alineación en NCBI con toda la base de datos de organismos con una cobertura del 67 por ciento como la bacteria del género: Lelliottia sp.

Esta bacteria se caracteriza por: ser un bacilo Gramnegativo, anaerobio facultativo y móvil, perteneciente a la familia Enterobacteriaceae. Originalmente clasificada como Enterobacter amnigenus, fue reclasificada en 2013 al género Lelliottia tras análisis genéticos. Es una bacteria versátil con impacto clínico y agrícola. (Alvares et al, 2016)

TABLA 8

PROCESO DE DIAGNÓSTICO DE MUESTRA DE PAPA NÚMERO 7 CON SINTOMATOLOGÍA DE ENFERMEDAD PROVOCADA POR BACTERIAS.

Muestra	Síntomas en Tubérculo	Aislamiento en caja Petri	Vista en microscopio
B7 LPV-25-1234			

Nota. Se muestran en la tabla la fotografía de la muestra del tubérculo de papa con sintomatología provocada por el patógeno, posteriormente el medio del cultivo de este patógeno y posteriormente el montaje en un microscopio con una ampliación de 10x y mostrando una tinción de Gram negativa.

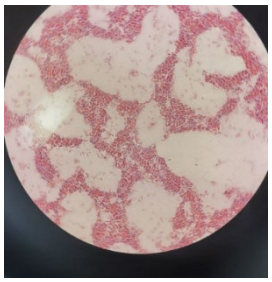
La muestra B2 LPV-25-1234 fue cultivada y aislada en medio de cultivo PDA, posteriormente fue identificada por medio del análisis de secuenciación con la metodología de "Análisis general", corresponde a la alineación en NCBI con toda la base de datos de organismos con una cobertura del 100 por ciento como la bacteria del género: Klebsiella sp. Esta bacteria se caracteriza por puede actuar como un patógeno oportunista o endófito en el cultivo de papa, desencadenando la pudrición blanda en los tubérculos. Siampi y Dubin (2022) mencionan que, en infecciones avanzadas, el tubérculo pierde su estructura, tornando su tejido interno blando, pastoso y con un olor desagradable. Los síntomas principales que provoca son:

- Ablandamiento del tejido: La papa pierde su firmeza original y cede a la presión.

- Decoloración y mal olor: El interior suele volverse acuoso y desprender un olor fétido (derivado de la fermentación y descomposición bacteriana).
- Infección secundaria: A menudo ocurre junto con otras bacterias (como Pectobacterium) o tras el ataque de plagas (ej. polilla de la papa) que facilitan la entrada de Klebsiella a través de heridas.

TABLA 9

PROCESO DE DIAGNÓSTICO DE MUESTRA DE PAPA NÚMERO 8 CON SINTOMATOLOGÍA DE ENFERMEDAD PROVOCADA POR BACTERIAS.

Muestra	Síntomas en Tubérculo	Aislamiento en caja Petri	Vista en microscopio
B8 LPV-25-1235			

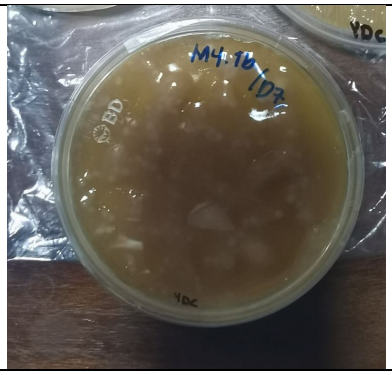
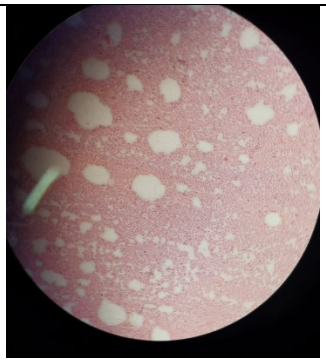
Nota. Se muestran en la tabla la fotografía la sintomatología provocada por el patógeno con mancas necróticas pardas en los ápices de los tubérculos, posteriormente el medio del cultivo de este patógeno y posteriormente el montaje en un microscopio con una ampliación de 10x y mostrando una tinción de Gram negativa.

La muestra B2 LPV-25-1235 fue cultivada y aislada en medio de cultivo PDA, posteriormente fue identificada por medio del análisis de secuenciación con la metodología de "Análisis general", corresponde a la alineación en NCBI con toda la base de datos de organismos con una cobertura del 99 por ciento como la bacteria del género: Enterobacter sp. La bacteria Enterobacter se caracteriza por causar pudrición blanda y daños postcosecha en tubérculos de papa, aunque con frecuencia también aparecen como endófitos oportunistas asociados a otras infecciones. En estudios se ha mostrado ocasionando pudrición blanda severa: discos de tubérculo con lesiones de 5.5–7.93 cm y síntomas de marchitez y amarillamiento en plantas infectadas vía riego. Los tipos de daños que ocasiona son

principalmente daños superficiales durante la postcosecha en 1 publicación, 23 publicaciones indican pudrición blanda del tubérculo y pudrición blanda en conjunto con marchitez de plantas en 4 publicaciones. (Morkovic, et al, 2023)

TABLA 10

PROCESO DE DIAGNÓSTICO DE MUESTRA DE PAPA NÚMERO 9 CON SINTOMATOLOGÍA DE ENFERMEDAD PROVOCADA POR BACTERIAS.

Muestra	Síntomas en Tubérculo	Aislamiento en caja Petri	Vista en microscopio
B9 LPV-24-1236			

Nota. Se muestran en la tabla la fotografía de la muestra del tubérculo de papa con sintomatología provocada por el patógeno, posteriormente el medio del cultivo de este patógeno y posteriormente el montaje en un microscopio con una ampliación de 10x y mostrando una tinción de Gram negativa.

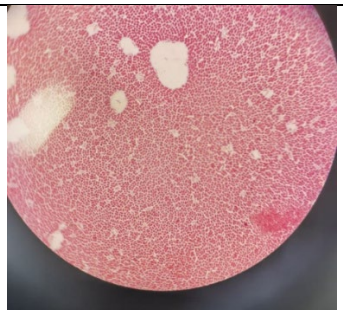
La muestra B2 LPV-25-1236 fue cultivada y aislada en medio de cultivo PDA, posteriormente fue identificada por medio del análisis de secuenciación con la metodología de "Análisis general", corresponde a la alineación en NCBI con toda la base de datos de organismos con una cobertura del 77 por ciento como la bacteria del género: Pseudomonas sp.

Esta bacteria se caracteriza por causar principalmente pudriciones blandas en postcosecha y tejidos de almacenamiento. Afecta a una gran variedad de hortalizas como la lechuga, la alfalfa y la papa, destruyendo las paredes celulares mediante enzimas específicas. Se clasifica esta bacteria dentro del grupo IV LOPAT y detalla su capacidad pecto lítica (destrucción de pectina en las paredes celulares de la planta). En Ecuador, Viteri (2020) analizó a la presencia

de la bacteria en las provincias de Pichincha, Carchi y Chimborazo. Relaciona a P. marginalis con síntomas específicos en tubérculos: pudrición acelerada, lesiones acuosas, manchas negras en el tallo y zonas rosadas en la superficie del tubérculo.

TABLA 11

PROCESO DE DIAGNÓSTICO DE MUESTRA DE PAPA NÚMERO 10 CON SINTOMATOLOGÍA DE ENFERMEDAD PROVOCADA POR BACTERIAS.

Muestra	Síntomas en Tubérculo	Aislamiento en caja Petri	Vista en microscopio
B10 LPV-25-1237			

Nota. Se muestran en la tabla la fotografía de la muestra del tubérculo de papa con sintomatología provocada por el patógeno, posteriormente el medio del cultivo de este patógeno y posteriormente el montaje en un microscopio con una ampliación de 10x y mostrando una tinción de Gram negativa.

La muestra B2 LPV-25-1237 fue cultivada y aislada en medio de cultivo PDA, posteriormente fue identificada por medio del análisis de secuenciación con la metodología de "Análisis general", corresponde a la alineación en NCBI con toda la base de datos de organismos con una cobertura del 63 por ciento como la bacteria del género: Lelliottia sp.

Esta bacteria se caracteriza por: ser un bacilo Gramnegativo, anaerobio facultativo y móvil, perteneciente a la familia Enterobacteriaceae. Originalmente clasificada como Enterobacter amnigenus, fue reclasificada en 2013 al género Lelliottia tras análisis genéticos. Es una bacteria versátil con impacto clínico y agrícola. (Alvares et al, 2016)

9.1.2 Diagnostico Fúngico

TABLA 12

PROCESO DE DIAGNÓSTICO DE MUESTRA DE PAPA NÚMERO 01 CON SINTOMATOLOGÍA DE ENFERMEDAD PROVOCADA POR HONGOS.

No.	Muestra colectada	Aislamiento de la colonia	Montaje a 40x
1			

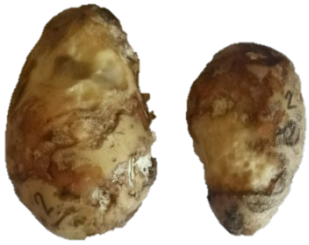
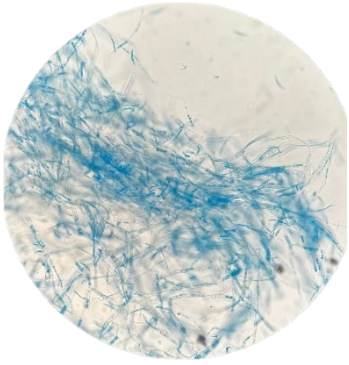
Nota. Se muestran en la tabla la fotografía de la muestra del tubérculo de papa con sintomatología provocada por el patógeno en forma de llagas en la epidermis y en la pulpa, posteriormente en el medio de cultivo 3 colonias miceliales de ovalada, tipo algodonosa oscara y posteriormente el montaje en un microscopio con una ampliación de 10x y mostrando las hifas y estructuras propagativas.

La muestra 1 fue identificada como el fitopatógeno *Boeremia exigua* var. *exigua*, presentando una similitud del 98.53% y una cobertura del 12.00% en la secuenciación de la región ITS; adicionalmente, se obtuvo un 90.11% de similitud y 10.00% de cobertura en la secuenciación de la región EF. Este patógeno se caracteriza por inducir lesiones necróticas hundidas en el tubérculo, de color marrón oscuro a negro, con una clara delimitación entre el tejido sano y el tejido afectado. De acuerdo con Quezada et al. (2024), *Boeremia exigua* var. *exigua* es un hongo ascomiceto oportunista que puede desarrollarse tanto como saprófito como patógeno, afectando principalmente raíces y tubérculos. Su incidencia se incrementa durante el almacenamiento, donde puede permanecer en estado latente en tubérculos aparentemente

sanos; sin embargo, factores como daños mecánicos durante la cosecha, manipulación, clasificación o procesamiento, así como condiciones de bajas temperaturas, favorecen la activación del patógeno y el desarrollo de pudrición seca (Gai et al., 2016). Morfológicamente, el patógeno presenta picnidios de color marrón oscuro, de forma esférica a oblada, que contienen esporas de morfología redondeada. Los conidios son hialinos, de forma cilíndrica, con extremos no puntiagudos y ligeramente curvados, inicialmente unicelulares, desarrollando posteriormente un septo central que puede presentarse constreñido o ligeramente constreñido hacia la región media o posterior. Asimismo, Zhang et al. (2025) reportaron que el fungicida Prochloraz mostró el mayor efecto inhibitorio sobre el patógeno, seguido de su combinación con Carbendazim.

TABLA 13

PROCESO DE DIAGNÓSTICO DE MUESTRA DE PAPA NÚMERO 02 CON SINTOMATOLOGÍA DE ENFERMEDAD PROVOCADA POR HONGOS

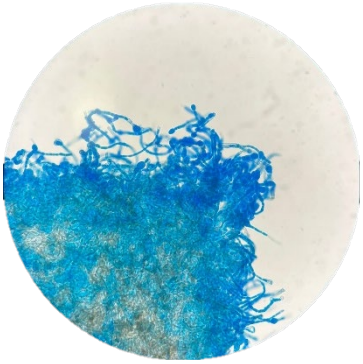
Muestra	Síntomas en Tubérculo	Aislamiento en caja Petri	Vista en microscopio
2			

Nota. Se muestran en la tabla la fotografía de la muestra del tubérculo de papa con sintomatología provocada, posteriormente en el medio de cultivo 3 colonias miceliales de forma redonda, tipo fibrosa clara y posteriormente el montaje en un microscopio con una ampliación de 10x y mostrando las hifas y estructuras propagativas teñidas con Lactofenol.

Las muestras 2 fueron identificadas como correspondientes al hongo *Fusarium oxysporum*. En la secuenciación de la región ITS, la muestra 2 presentó una similitud de 77.63% con una cobertura del 100.0%; la muestra 7 mostró una similitud del 100.0% y una cobertura del 99.00%; la muestra 8 registró una similitud de 88.93% con una cobertura del 35.00%; y la muestra 9 evidenció una similitud de 91.28% con una cobertura del 100.0%. De manera complementaria, en la secuenciación de la región EF, la muestra 2 presentó una similitud de 90.76% y una cobertura del 32.00%; la muestra 7 mostró una similitud de 94.12% con una cobertura del 20.00%, siendo identificada como *Fusarium* sp.; mientras que las muestras 8 y 9 no presentaron alineamiento en dicha región. Los síntomas observados incluyeron pudriciones tanto secas como blandas, decoloración del tubérculo y pudrición anular en las distintas muestras colectadas. El género *Fusarium* constituye uno de los grupos de hongos fitopatógenos micotoxigénicos de mayor importancia, asociado a enfermedades como el marchitamiento de tallos y hojas en campo, así como a la pudrición seca de tubérculos durante el almacenamiento (Bibi et al., 2024). De acuerdo con Snyder y Hansen (1945), este género es reconocido como uno de los complejos de hongos patogénicos más relevantes en la agricultura y horticultura, capaces de causar una amplia gama de enfermedades y comportarse como patógenos oportunistas. Desde el punto de vista morfológico y reproductivo, *Fusarium oxysporum* produce tres tipos principales de esporas: microconidios, macroconidios y clamidósporas. Los microconidios presentan formas variables, generalmente ovales o esféricas, y constituyen las estructuras de menor tamaño. Los macroconidios son hialinos, de forma falcada (en medialuna), alargados y ligeramente curvados, con presencia de septos internos que varían comúnmente entre tres y cuatro, dependiendo de su desarrollo (Leslie & Summerell, 2006). Por su parte, las clamidósporas son estructuras de resistencia que permiten al hongo sobrevivir por largos periodos en el suelo o en residuos vegetales, incluso bajo condiciones ambientales adversas, favoreciendo su persistencia y diseminación en los sistemas de producción.

TABLA 14

PROCESO DE DIAGNÓSTICO DE MUESTRA DE PAPA NÚMERO 03 CON SINTOMATOLOGÍA DE ENFERMEDAD PROVOCADA POR HONGOS.

Muestra	Síntomas en Tubérculo	Aislamiento en caja Petri	Vista en microscopio
			

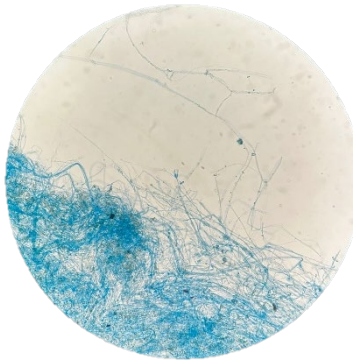
Nota. Se muestran en la tabla la fotografía de la muestra del tubérculo de papa con la sintomatología provocada , posteriormente en el medio de cultivo 3 colonias miceliales de forma redonda, tipo algodonas oscura y posteriormente el montaje en un microscopio con una ampliación de 10x y mostrando las hifas y estructuras propagativas teñidas con Lactofenol.

La muestra 3 fue identificada como *Alternaria tenuissima.* En la secuencia de la región ITS presentó una similitud de 91.42% y una cobertura de 94.00%, por otro lado, en la secuenciación de la región EF presentó una similitud de 84.79% y cobertura de 51.00%. Según Leng et. al (2022) *Alternaria tenuissima* infecta las papas almacenadas y causa la pudrición de los tubérculos, lo que resulta en pérdidas económicas significativas, su alta capacidad para producir estructuras reproductivas en grandes cantidades se relaciona con su habilidad para actuar tanto como patógeno primario como oportunista, infectando tejidos debilitados o previamente dañados. Esto es particularmente relevante en tubérculos de papa, donde factores como daño mecánico, estrés fisiológico o condiciones inadecuadas de almacenamiento pueden favorecer la infección y el desarrollo de pudriciones. El fitopatógeno se caracteriza por la producción de conidios de tamaño reducido (small-spored), lo cual

constituye un rasgo diagnóstico clave para su diferenciación frente a otras especies del género asociadas al cultivo de papa, además, presenta un micelio septado, de coloración oscura, típico de hongos adaptados a condiciones ambientales variables. Los conidióforos pueden ser simples o ramificados, emergiendo directamente del micelio y actuando como estructuras especializadas para la producción de esporas (Zhang et. al, 2020). Liu et. al (2019) sugieren que la capacidad del quitosano para reducir la pudrición por Alternaria en tubérculos de papa almacenados se debe a su actividad antifúngica directa y a su capacidad para inducir respuestas de defensa en los tejidos del tubérculo. El quitosano podría tener potencial como sustituto de los fungicidas sintéticos para reducir las pérdidas postcosecha en la papa.

TABLA 15

PROCESO DE DIAGNÓSTICO DE MUESTRA DE PAPA NÚMERO 04 CON SINTOMATOLOGÍA DE ENFERMEDAD PROVOCADA POR HONGOS.

Muestra	Síntomas en Tubérculo	Aislamiento en caja Petri	Vista en microscopio
4			

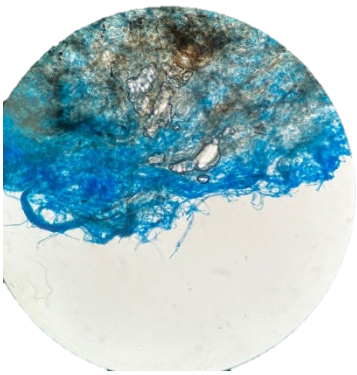
Nota. Se muestran en la tabla la fotografía de la muestra del tubérculo de papa con sintomatología provocada, posteriormente en el medio de cultivo 3 colonias miceliales de forma redonda, tipo fibrosa clara y posteriormente el montaje en un microscopio con una ampliación de 10x y mostrando las hifas y estructuras propagativas teñidas con Lactofenol.

La muestra 4 fue identificada como *Coprinellus micaceus.* En la secuencia de la región ITS presentó una similitud de 90.21 % y una cobertura de 87.00%, por otro lado, en la

secuenciación de la región EF presentó una similitud de 84.12 % y cobertura de 81.00%. *Coprinellus micaceus*, poseen sistemas enzimáticos especializados para la degradación de biomasa vegetal, incluyendo la producción de laccasas, peroxidasas y celulasas. Estas enzimas actúan sobre los principales componentes de la pared celular, como lignina, celulosa y hemicelulosa, provocando la desorganización estructural del tejido vegetal. La acción conjunta de estos sistemas enzimáticos genera la ruptura de las paredes celulares, colapso tisular y liberación de compuestos que son aprovechados por el hongo. En el caso del tubérculo de papa, este proceso se traduce en ablandamiento, pérdida de firmeza y descomposición progresiva del tejido. Por lo tanto, aunque *C. micaceus* no se considera un patógeno primario, su capacidad degradativa le permite desempeñar un papel activo en el deterioro del tubérculo bajo condiciones favorables (Kim, 2021). El control químico de *Coprinellus micaceus* debe abordarse considerando su naturaleza como hongo ligninolítico, cuya capacidad de degradación del tejido vegetal depende de la producción de enzimas extracelulares como laccasas y peroxidasas. Henn et, al (2020) de mostraron que fungicidas, incluyendo compuestos triazoles e imidazoles como flusilazole, imazalil, pyrimethanil y tetraconazole, son capaces de inhibir significativamente la actividad de la laccasa en hongos basidiomicetos, reduciendo su capacidad de degradación estructural, limitando su colonización en el tejido vegetal.

TABLA 16

PROCESO DE DIAGNÓSTICO DE MUESTRA DE PAPA NÚMERO 05 CON SINTOMATOLOGÍA DE ENFERMEDAD PROVOCADA POR HONGOS.

Muestra	Síntomas en Tubérculo	Aislamiento en caja Petri	Vista en microscopio
5			

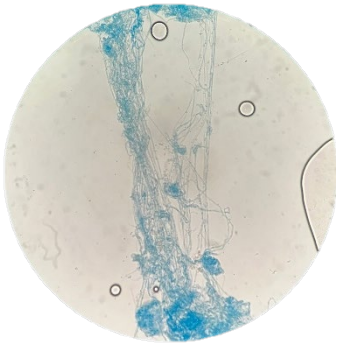
Nota. Se muestran en la tabla la fotografía de la muestra del tubérculo de papa con sintomatología provocada , posteriormente en el medio de cultivo 3 colonias crecimiento en forma radial, , tipo fibrosa clara y posteriormente el montaje en un microscopio con una ampliación de 10x y mostrando las hifas y estructuras propagativas teñidas con Lactofenol.

La muestra 5 fue identificada como *Setophoma terrestres.* En la secuencia de la región ITS presentó una similitud de 98.19% y una cobertura de 71.00%, por otro lado, en la secuenciación de la región EF se presentó como “Clon de bacteria no cultivada A135” con una similitud de 81.70% y cobertura de 71.00%. Este es un hongo que ataca directamente a las raíces de la planta y por consecuencia al tubérculo. *Setophoma terrestris* es un hongo fitopatógeno caracterizado por la formación de picnidios y conidios hialinos unicelulares, los cuales se desarrollan bajo condiciones favorables de humedad. Este patógeno se asocia principalmente a infecciones radiculares. Aunque no infecta directamente el tubérculo de papa, el daño en el sistema radicular provoca una disminución en la absorción de agua y nutrientes, afectando el desarrollo, tamaño y calidad de los tubérculos (López et. al, 2025). Asimismo, el estrés fisiológico generado incrementa la susceptibilidad del cultivo a

infecciones secundarias. Rivera et. al (2019) han demostrado que agentes biológicos como *Trichoderma virens*, *Trichoderma harzianum* y *Bacillus licheniformis* presentan efectos inhibitorios sobre el crecimiento del patógeno, constituyendo una alternativa viable dentro de programas de manejo integrado.

TABLA 17

PROCESO DE DIAGNÓSTICO DE MUESTRA DE PAPA NÚMERO 06 CON SINTOMATOLOGÍA DE ENFERMEDAD PROVOCADA POR HONGOS.

Muestra	Síntomas en Tubérculo	Aislamiento en caja Petri	Vista en microscopio
6			

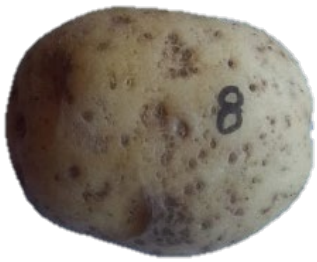
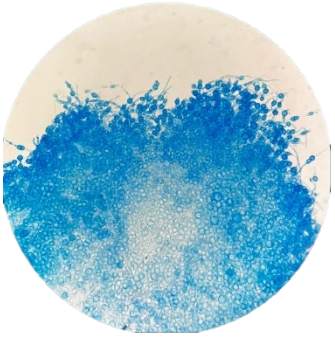
Nota. Se muestran en la tabla la fotografía de la muestra del tubérculo de papa con sintomatología provocada , posteriormente en el medio de cultivo 3 colonias miceliales de forma redonda, tipo fibrosa clara y posteriormente el montaje en un microscopio con una ampliación de 10x y mostrando las hifas y estructuras propagativas teñidas con Lactofenol.

Las muestras 2, 7, 8 y 9 fueron identificadas como correspondientes al hongo *Fusarium oxysporum*. En la secuenciación de la región ITS, la muestra 2 presentó una similitud de 77.63% con una cobertura del 100.0%; la muestra 7 mostró una similitud del 100.0% y una cobertura del 99.00%; la muestra 8 registró una similitud de 88.93% con una cobertura del 35.00%; y la muestra 9 evidenció una similitud de 91.28% con una cobertura del 100.0%. De manera complementaria, en la secuenciación de la región EF, la muestra 2 presentó una

similitud de 90.76% y una cobertura del 32.00%; la muestra 7 mostró una similitud de 94.12% con una cobertura del 20.00%, siendo identificada como *Fusarium* sp.; mientras que las muestras 8 y 9 no presentaron alineamiento en dicha región. Los síntomas observados incluyeron pudriciones tanto secas como blandas, decoloración del tubérculo y pudrición anular en las distintas muestras colectadas. El género *Fusarium* constituye uno de los grupos de hongos fitopatógenos micotoxigénicos de mayor importancia, asociado a enfermedades como el marchitamiento de tallos y hojas en campo, así como a la pudrición seca de tubérculos durante el almacenamiento (Bibi et al., 2024). De acuerdo con Snyder y Hansen (1945), este género es reconocido como uno de los complejos de hongos patogénicos más relevantes en la agricultura y horticultura, capaces de causar una amplia gama de enfermedades y comportarse como patógenos oportunistas. Desde el punto de vista morfológico y reproductivo, *Fusarium oxysporum* produce tres tipos principales de esporas: microconidios, macroconidios y clamidósporas. Los microconidios presentan formas variables, generalmente ovales o esféricas, y constituyen las estructuras de menor tamaño. Los macroconidios son hialinos, de forma falcada (en medialuna), alargados y ligeramente curvados, con presencia de septos internos que varían comúnmente entre tres y cuatro, dependiendo de su desarrollo (Leslie & Summerell, 2006). Por su parte, las clamidósporas son estructuras de resistencia que permiten al hongo sobrevivir por largos periodos en el suelo o en residuos vegetales, incluso bajo condiciones ambientales adversas, favoreciendo su persistencia y diseminación en los sistemas de producción.

TABLA

18 PROCESO DE DIAGNÓSTICO DE MUESTRA DE PAPA NÚMERO 07 CON SINTOMATOLOGÍA DE ENFERMEDAD PROVOCADA POR HONGOS.

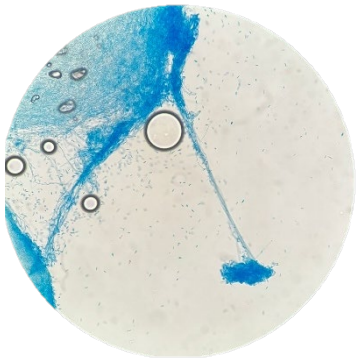
Muestra	Síntomas en Tubérculo	Aislamiento en caja Petri	Vista en microscopio
7			

Nota. Se muestran en la tabla la fotografía de la muestra del tubérculo de papa con sintomatología provocada , posteriormente en el medio de cultivo 3 colonias miceliales de forma redonda, tipo fibrosa clara y posteriormente el montaje en un microscopio con una ampliación de 10x y mostrando las hifas y estructuras propagativas teñidas con Lactofenol.

La muestra 7 fue identificada como correspondientes al hongo *Fusarium oxysporum*. En la secuenciación de la región ITS, la muestra 2 presentó una similitud de 77.63% con una cobertura del 100.0%; la muestra 7 mostró una similitud del 100.0% y una cobertura del 99.00%; la muestra 8 registró una similitud de 88.93% con una cobertura del 35.00%; y la muestra 9 evidenció una similitud de 91.28% con una cobertura del 100.0%. De manera complementaria, en la secuenciación de la región EF, la muestra 2 presentó una similitud de 90.76% y una cobertura del 32.00%; la muestra 7 mostró una similitud de 94.12% con una cobertura del 20.00%, siendo identificada como *Fusarium* sp.; mientras que las muestras 8 y 9 no presentaron alineamiento en dicha región. Los síntomas observados incluyeron pudriciones tanto secas como blandas, decoloración del tubérculo y pudrición anular en las distintas muestras colectadas. El género *Fusarium* constituye uno de los grupos de hongos fitopatógenos micotoxigénicos de mayor importancia, asociado a enfermedades como el

marchitamiento de tallos y hojas en campo, así como a la pudrición seca de tubérculos durante el almacenamiento (Bibi et al., 2024). De acuerdo con Snyder y Hansen (1945), este género es reconocido como uno de los complejos de hongos patogénicos más relevantes en la agricultura y horticultura, capaces de causar una amplia gama de enfermedades y comportarse como patógenos oportunistas. Desde el punto de vista morfológico y reproductivo, *Fusarium oxysporum* produce tres tipos principales de esporas: microconidios, macroconidios y clamidósporas. Los microconidios presentan formas variables, generalmente ovales o esféricas, y constituyen las estructuras de menor tamaño. Los macroconidios son hialinos, de forma falcada (en medialuna), alargados y ligeramente curvados, con presencia de septos internos que varían comúnmente entre tres y cuatro, dependiendo de su desarrollo (Leslie & Summerell, 2006). Por su parte, las clamidósporas son estructuras de resistencia que permiten al hongo sobrevivir por largos periodos en el suelo o en residuos vegetales, incluso bajo condiciones ambientales adversas, favoreciendo su persistencia y diseminación en los sistemas de producción.

TABLA 19 PROCESO DE DIAGNÓSTICO DE MUESTRA DE PAPA NÚMERO 08 CON SINTOMATOLOGÍA DE ENFERMEDAD PROVOCADA POR HONGOS.

Muestra	Síntomas en Tubérculo	Aislamiento en caja Petri	Vista en microscopio
8			

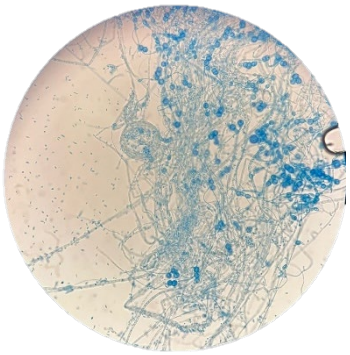
Nota. Se muestran en la tabla la fotografía de la muestra del tubérculo de papa con sintomatología provocada , posteriormente en el medio de cultivo 3 colonias miceliales de

forma redonda, tipo fibrosa clara y posteriormente el montaje en un microscopio con una ampliación de 10x y mostrando las hifas y estructuras propagativas teñidas con Lactofenol.

Las muestras 8 fueron identificadas como correspondientes al hongo *Fusarium oxysporum*. En la secuenciación de la región ITS, la muestra 2 presentó una similitud de 77.63% con una cobertura del 100.0%; la muestra 7 mostró una similitud del 100.0% y una cobertura del 99.00%; la muestra 8 registró una similitud de 88.93% con una cobertura del 35.00%; y la muestra 9 evidenció una similitud de 91.28% con una cobertura del 100.0%. De manera complementaria, en la secuenciación de la región EF, la muestra 2 presentó una similitud de 90.76% y una cobertura del 32.00%; la muestra 7 mostró una similitud de 94.12% con una cobertura del 20.00%, siendo identificada como *Fusarium* sp.; mientras que las muestras 8 y 9 no presentaron alineamiento en dicha región. Los síntomas observados incluyeron pudriciones tanto secas como blandas, decoloración del tubérculo y pudrición anular en las distintas muestras colectadas. El género *Fusarium* constituye uno de los grupos de hongos fitopatógenos micotoxigénicos de mayor importancia, asociado a enfermedades como el marchitamiento de tallos y hojas en campo, así como a la pudrición seca de tubérculos durante el almacenamiento (Bibi et al., 2024). De acuerdo con Snyder y Hansen (1945), este género es reconocido como uno de los complejos de hongos patogénicos más relevantes en la agricultura y horticultura, capaces de causar una amplia gama de enfermedades y comportarse como patógenos oportunistas. Desde el punto de vista morfológico y reproductivo, *Fusarium oxysporum* produce tres tipos principales de esporas: microconidios, macroconidios y clamidósporas. Los microconidios presentan formas variables, generalmente ovales o esféricas, y constituyen las estructuras de menor tamaño. Los macroconidios son hialinos, de forma falcada (en medialuna), alargados y ligeramente curvados, con presencia de septos internos que varían comúnmente entre tres y cuatro, dependiendo de su desarrollo (Leslie & Summerell, 2006). Por su parte, las clamidósporas son estructuras de resistencia que permiten al hongo sobrevivir por largos periodos en el suelo o en residuos vegetales, incluso bajo condiciones ambientales adversas, favoreciendo su persistencia y diseminación en los sistemas de producción.

TABLA 20

PROCESO DE DIAGNÓSTICO DE MUESTRA DE PAPA NÚMERO 09 CON SINTOMATOLOGÍA DE ENFERMEDAD PROVOCADA POR HONGOS.

Muestra	Síntomas en Tubérculo	Aislamiento en caja Petri	Vista en microscopio
9			

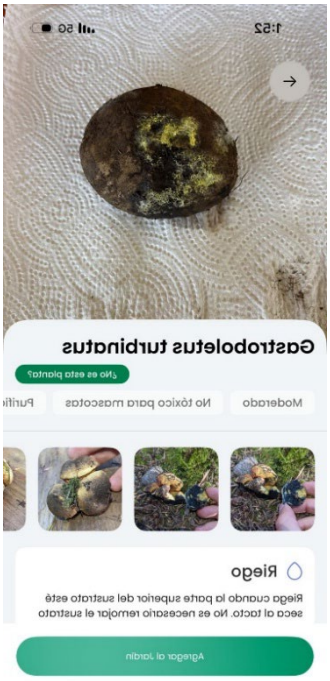
Nota. Se muestran en la tabla la fotografía de la muestra del tubérculo de papa con sintomatología, posteriormente en el medio 1 colonias micelial sin forma dominante, tipo algodonosa clara y el montaje en un microscopio con una ampliación de 10x y mostrando las hifas y estructuras propagativas teñidas con Lactofenol.

Las muestras 9 fueron identificadas como correspondientes al hongo *Fusarium oxysporum*. En la secuenciación de la región ITS, la muestra 2 presentó una similitud de 77.63% con una cobertura del 100.0%; la muestra 7 mostró una similitud del 100.0% y una cobertura del 99.00%; la muestra 8 registró una similitud de 88.93% con una cobertura del 35.00%; y la muestra 9 evidenció una similitud de 91.28% con una cobertura del 100.0%. De manera complementaria, en la secuenciación de la región EF, la muestra 2 presentó una similitud de 90.76% y una cobertura del 32.00%; la muestra 7 mostró una similitud de 94.12% con una cobertura del 20.00%, siendo identificada como *Fusarium* sp.; mientras que las muestras 8 y 9 no presentaron alineamiento en dicha región. Los síntomas observados incluyeron pudriciones tanto secas como blandas, decoloración del tubérculo y pudrición anular en las distintas muestras colectadas. El género *Fusarium* constituye uno de los grupos de hongos fitopatógenos micotoxigénicos de mayor importancia, asociado a enfermedades como el

marchitamiento de tallos y hojas en campo, así como a la pudrición seca de tubérculos durante el almacenamiento (Bibi et al., 2024). De acuerdo con Snyder y Hansen (1945), este género es reconocido como uno de los complejos de hongos patogénicos más relevantes en la agricultura y horticultura, capaces de causar una amplia gama de enfermedades y comportarse como patógenos oportunistas. Desde el punto de vista morfológico y reproductivo, *Fusarium oxysporum* produce tres tipos principales de esporas: microconidios, macroconidios y clamidósporas. Los microconidios presentan formas variables, generalmente ovales o esféricas, y constituyen las estructuras de menor tamaño. Los macroconidios son hialinos, de forma falcada (en medialuna), alargados y ligeramente curvados, con presencia de septos internos que varían comúnmente entre tres y cuatro, dependiendo de su desarrollo (Leslie & Summerell, 2006). Por su parte, las clamidósporas son estructuras de resistencia que permiten al hongo sobrevivir por largos periodos en el suelo o en residuos vegetales, incluso bajo condiciones ambientales adversas, favoreciendo su persistencia y diseminación en los sistemas de producción.

TABLA 21

PROCESO DE DIAGNÓSTICO CON IA DE TUBÉRCULOS CON SINTOMATOLOGÍA DE ENFERMEDADES.

Tubérculo enfermo	Uso de aplicación	Respuesta de la aplicación
		

Nota. Secuencia de fotografías del proceso de diagnóstico con Aplicaciones de Inteligencia Artificial, iniciando a la derecha con la sintomatología del patógeno en el tubérculo, luego la captura efectuada por la APP y posteriormente la respuesta del diagnóstico.

Se observó que la aplicación realizo un reconocimiento de la imagen; sin embargo, la respuesta obtenida no correspondió con la sintomatología que presenta el tubérculo de papa. Este resultado evidencia una limitación de la capacidad de la aplicación para identificar de manera precisa las características visuales asociadas a las enfermedades o alteraciones del tubérculo de papa.

TABLA 22

PROCESO DE DIAGNÓSTICO CON IA DE TUBÉRCULOS CON SINTOMATOLOGÍA DE ENFERMEDADES.

Tubérculo enfermo	Uso de aplicación	Respuesta de la aplicación
		

Nota. Secuencia de fotografías del proceso de diagnóstico con Aplicaciones de Inteligencia Artificial, iniciando a la derecha con la sintomatología del patógeno en el tubérculo, luego la captura efectuada por la APP y posteriormente la respuesta del diagnóstico.

Se observó que la aplicación no logró reconocer la imagen del tubérculo de papa. Esto indica que la aplicación está diseñada principalmente para identificar enfermedades en la parte vegetativa de las plantas. Se evidencia una limitación en la aplicación, lo que sugiere ampliar la base de datos y algoritmos de reconocimientos para incluir síntomas presentes en otras partes.

TABLA 23

PROCESO DE DIAGNÓSTICO CON IA DE TUBÉRCULOS CON SINTOMATOLOGÍA DE ENFERMEDADES.

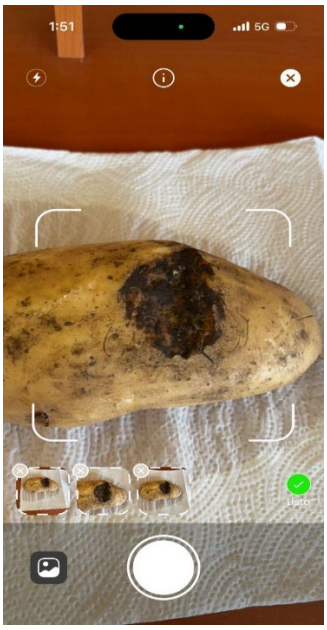
Tubérculo enfermo	Uso de aplicación	Respuesta de la aplicación
		

Nota. Secuencia de fotografías del proceso de diagnóstico con Aplicaciones de Inteligencia Artificial, iniciando a la derecha con la sintomatología del patógeno en el tubérculo, luego la captura efectuada por la APP y posteriormente la respuesta del diagnóstico.

Se observó que la aplicación no logró reconocer la imagen del tubérculo de papa. Esto indica que la aplicación está diseñada principalmente para identificar enfermedades en la parte vegetativa de las plantas. Se evidencia una limitación en la aplicación, lo que sugiere ampliar la base de datos y algoritmos de reconocimientos para incluir síntomas presentes en otras partes de la planta.

TABLA 24

PROCESO DE DIAGNÓSTICO CON IA DE TUBÉRCULOS CON SINTOMATOLOGÍA DE ENFERMEDADES.

Tubérculo enfermo	Uso de aplicación	Respuesta de la aplicación
		

Nota. Secuencia de fotografías del proceso de diagnóstico con Aplicaciones de Inteligencia Artificial, iniciando a la derecha con la sintomatología del patógeno en el tubérculo, luego la captura efectuada por la APP y posteriormente la respuesta del diagnóstico.

Se observó que la aplicación no logró reconocer la imagen del tubérculo de papa. Esto indica que la aplicación está diseñada principalmente para identificar enfermedades en la parte vegetativa de las plantas. Se evidencia una limitación en la aplicación, lo que sugiere ampliar la base de datos y algoritmos de reconocimientos para incluir síntomas presentes en otras partes de la planta.

TABLA 25

PROCESO DE DIAGNÓSTICO CON IA DE TUBÉRCULOS CON SINTOMATOLOGÍA DE ENFERMEDADES.

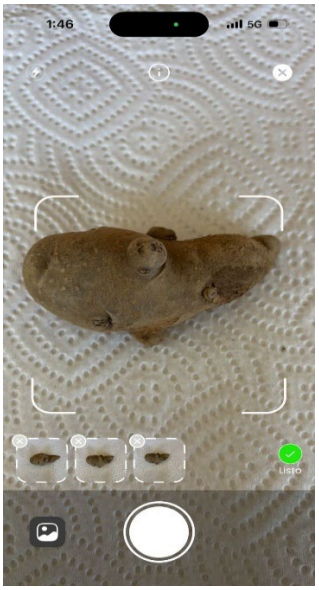
Tubérculo enfermo	Uso de aplicación	Respuesta de la aplicación
		

Nota. Secuencia de fotografías del proceso de diagnostico con Aplicaciones de Inteligencia Artificial, iniciando a la derecha con la sintomatología del patógeno en el tubérculo, luego la captura efectuada por la APP y posteriormente la respuesta del diagnóstico.

Se observó que la aplicación realizo un reconocimiento de la imagen; sin embargo, la respuesta obtenida no correspondió con la sintomatología que presenta el tubérculo de papa. Este resultado evidencia una limitación de la capacidad de la aplicación para identificar de manera precisa las características visuales asociadas a las enfermedades o alteraciones del tubérculo de papa.

TABLA 26

PROCESO DE DIAGNÓSTICO CON IA DE TUBÉRCULOS CON SINTOMATOLOGÍA DE ENFERMEDADES.

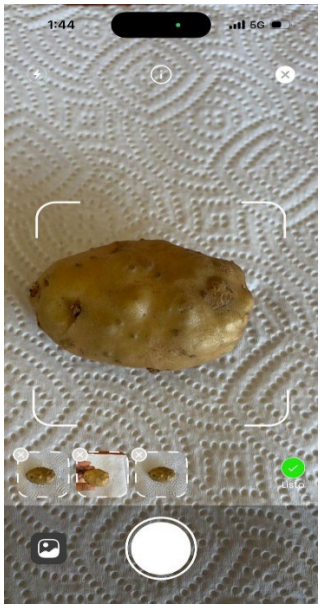
Tubérculo enfermo	Uso de aplicación	Respuesta de la aplicación
		

Nota. Secuencia de fotografías del proceso de diagnostico con Aplicaciones de Inteligencia Artificial, iniciando a la derecha con la sintomatología del patógeno en el tubérculo, luego la captura efectuada por la APP y posteriormente la respuesta del diagnóstico.

Se observó que la aplicación no logró reconocer la imagen del tubérculo de papa. Esto indica que la aplicación está diseñada principalmente para identificar enfermedades en la parte vegetativa de las plantas. Se evidencia una limitación en la aplicación, lo que sugiere ampliar la base de datos y algoritmos de reconocimientos para incluir síntomas presentes en otras partes de la planta.

TABLA 27

PROCESO DE DIAGNÓSTICO CON IA DE TUBÉRCULOS CON SINTOMATOLOGÍA DE ENFERMEDADES.

Tubérculo enfermo	Uso de aplicación	Respuesta de la aplicación
		

Nota. Secuencia de fotografías del proceso de diagnóstico con Aplicaciones de Inteligencia Artificial, iniciando a la derecha con la sintomatología del patógeno en el tubérculo, luego la captura efectuada por la APP y posteriormente la respuesta del diagnóstico.

Se observó que la aplicación no logró reconocer la imagen del tubérculo de papa. Esto indica que la aplicación está diseñada principalmente para identificar enfermedades en la parte vegetativa de las plantas. Se evidencia una limitación en la aplicación, lo que sugiere ampliar la base de datos y algoritmos de reconocimientos para incluir síntomas presentes en otras partes de la planta.

TABLA 28

PROCESO DE DIAGNÓSTICO CON IA DE TUBÉRCULOS CON SINTOMATOLOGÍA DE ENFERMEDADES.

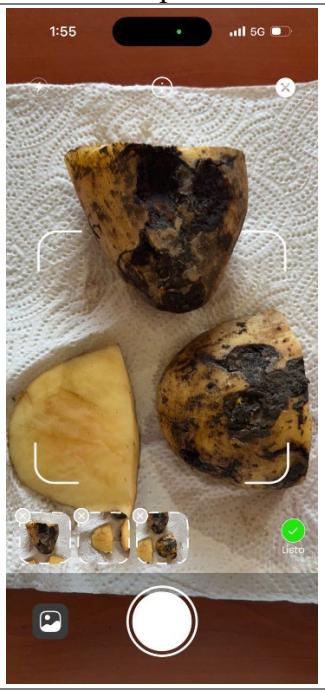
Tubérculo enfermo	Uso de aplicación	Respuesta de la aplicación
		

Nota. Secuencia de fotografías del proceso de diagnostico con Aplicaciones de Inteligencia Artificial, iniciando a la derecha con la sintomatología del patógeno en el tubérculo, luego la captura efectuada por la APP y posteriormente la respuesta del diagnóstico.

Se observó que la aplicación no logró reconocer la imagen del tubérculo de papa. Esto indica que la aplicación está diseñada principalmente para identificar enfermedades en la parte vegetativa de las plantas. Se evidencia una limitación en la aplicación, lo que sugiere ampliar la base de datos y algoritmos de reconocimientos para incluir síntomas presentes en otras partes de la planta.

TABLA 29

PROCESO DE DIAGNÓSTICO CON IA DE TUBÉRCULOS CON SINTOMATOLOGÍA DE ENFERMEDADES.

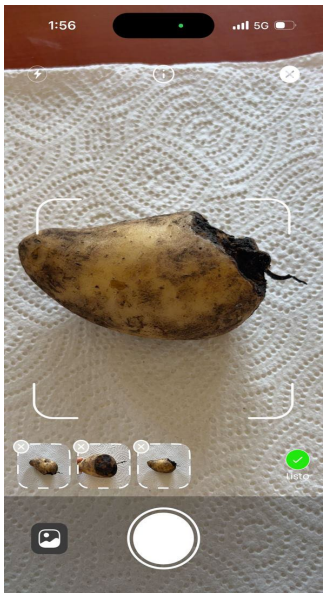
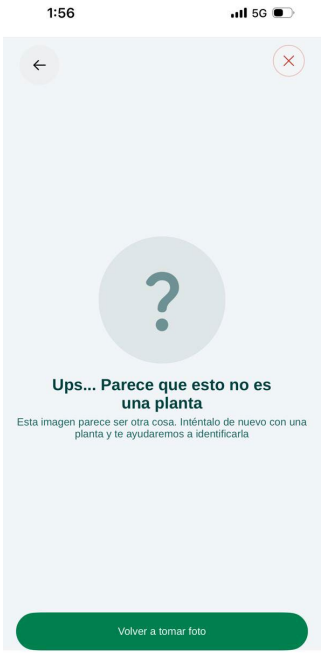
Tubérculo enfermo	Uso de aplicación	Respuesta de la aplicación
		

Nota. Secuencia de fotografías del proceso de diagnostico con Aplicaciones de Inteligencia Artificial, iniciando a la derecha con la sintomatología del patógeno en el tubérculo, luego la captura efectuada por la APP y posteriormente la respuesta del diagnóstico.

Se observó que la aplicación no logró reconocer la imagen del tubérculo de papa. Esto indica que la aplicación está diseñada principalmente para identificar enfermedades en la parte vegetativa de las plantas. Se evidencia una limitación en la aplicación, lo que sugiere ampliar la base de datos y algoritmos de reconocimientos para incluir síntomas presentes en otras partes de la planta.

TABLA 30

PROCESO DE DIAGNÓSTICO CON IA DE TUBÉRCULOS CON SINTOMATOLOGÍA DE ENFERMEDADES.

Tubérculo enfermo	Uso de aplicación	Respuesta de la aplicación
		

Nota. Secuencia de fotografías del proceso de diagnóstico con Aplicaciones de Inteligencia Artificial, iniciando a la derecha con la sintomatología del patógeno en el tubérculo, luego la captura efectuada por la APP y posteriormente la respuesta del diagnóstico.

Se observó que la aplicación no logró reconocer la imagen del tubérculo de papa. Esto indica que la aplicación está diseñada principalmente para identificar enfermedades en la parte vegetativa de las plantas. Se evidencia una limitación en la aplicación, lo que sugiere ampliar la base de datos y algoritmos de reconocimientos para incluir síntomas presentes en otras partes de la planta.

10 Propiedad intelectual

Los resultados obtenidos en la presente investigación son de tipo generativo descriptivo, por lo que no son sujetos a gestión de propiedad intelectual.

11 Beneficiarios directos e indirectos

TABLA 31

BENEFICIARIOS DIRECTOS E INDIRECTOS DE LA INVESTIGACIÓN

Resultados, productos o hallazgos	**Beneficiarios directos (institución, organización, sector académico o tipo de personas)**	**Número de beneficiarios directos**	**Beneficiarios indirectos (institución, organización, sector académico o tipo de personas)**	**Número de Beneficiarios indirectos**
Agentes causales de enfermedades identificados.	Organizaciones de productores	10	Productores de papa	200
Un método de diagnóstico de enfermedades de los tubérculos	Organizaciones de productores	10	Productores de papa	200
Un manual digital	Organizaciones de productores	10	Estudiantes	200 (potencialmente 70000 productores de papa de Guatemala)
	Agencias de extensión	10		10 extensionistas
	Unidades académicas	3		82 estudiantes.

Nota. Información cuantitativa de los resultados obtenidos en el proyecto.

12 Estrategia de divulgación y difusión de los resultados.

TABLA 32

RESULTADOS DE LA ESTRATEGIA DE DIVULGACIÓN Y DIFUSIÓN DE LOS RESULTADOS.

	Sí	No
Presentación TV		x
Entrevistas radiales		x
Podcast		x
Entrevista DIGI		x
Recursos audiovisuales	X	
Congresos científicos nacionales o internacionales		X
Talleres	X	
Publicación de libro		X
Publicación de capítulo en un libro x		X
Publicación de artículo científico	X	
Divulgación por redes sociales institucionales		X
Conversatorios con especialistas	X	
Presentación pública	X	
Presentación autoridades USAC		X
Presentación a beneficiarios directos	X	
Entrega de resultados	X	
Docencia en grado	X	
Docencia postgrado		X
Póster científico		X
Trifoliares		X
Conferencias	X	
Encuentros de campo (días de campo)		X
Intercambio de conocimientos y experiencias con productores y vendedores...	X	
Otro (describa)		

13 Contribución a las Prioridades Nacionales de Desarrollo (PND)

Los resultados de este estudio vienen a contribuir en el mejoramiento y aseguramiento de la producción de alimentos, por lo que directamente está relacionado a la Seguridad Alimentaria y Nutricional. Dentro de estas esta la meta 2.3 en la que se establece que para el 2030 se

debe, duplicar la productividad agrícola y los ingresos de los productores de alimentos en pequeña escala, en particular las mujeres, pueblos indígenas, agricultores familiares, pastores y pescadores, lo que incluye acceso seguro y equitativo a la tierra, a otros recursos de producción e insumos, a conocimientos, a servicios financieros, a mercados y a oportunidades para la generación de valor añadido y empleos no agrícolas, principalmente en lo relacionado a poner a disposición de los productores de papa los conocimientos necesarios para mejorar su productividad.

Así mismo, los resultados obtenidos en el proyecto contribuyen a las Prioridades Nacionales de desarrollo (PND) en relación a la Seguridad Alimentaria y Nutricional y al cumplimiento de la meta 2.4 que establece que para el 2030, se debe asegurar la sostenibilidad de los sistemas de producción de alimentos y aplicar prácticas agrícolas resilientes que aumenten la productividad y la producción, contribuyan al mantenimiento de los ecosistemas, fortalezcan la capacidad de adaptación al cambio climático, los fenómenos meteorológicos extremos, las sequías, las inundaciones y otros desastres, y mejoren progresivamente la calidad del suelo y la tierra

14 Otras contribuciones del proyecto al desarrollo

No aplica directamente

15 Vinculación

El proyecto tuvo vinculación de apoyo con El Instituto de Ciencia y Tecnología Agrícolas (ICTA), con las oficinas de extensión del MAGA, con la Universidad del Valle de Guatemala, con la Agrocadena de la Papa y con las organizaciones de diferente nivel de productores de papa en los departamentos de Quetzaltenango, Huehuetenango y San Marcos. Se participó en una actividad especifica de socialización de resultados del proyecto, por medio de una conferencia en el día de la papa y el cordero en la Sierra de los Cuchumatanes por medio de la organización ASOCUCH. Así mismo se dieron a conocer

los resultados a los estudiantes de la carrera de Agronomía de las universidades Rafel Landivar, Mariano Galvez y Universidad de San Carlos de Guatemala en Quetzaltenango.

16 Conclusiones

- Se identifico a 9 agentes causales de las nuevas enfermedades que están afectando al tubérculo de la papa, siendo los siguientes hongos: Boeremia exigua, Fusarium Oxysporum, Alternaria tennuissima, Setophoma terrestres y Coprinellus micaceus y las bacterias Klebsiella sp, Pseudomonas marginallis, Enterobacter sp y Lelliottia sp.

- Se estableció que el grado de precisión que tienen los sistemas de inteligencia artificial para el diagnóstico de las enfermedades del tubérculo de la papa y en el caso de identificación de enfermedades del tubérculo fue del 20%, que se considera bajo a comparación de un 70 % para la identificación de enfermedades del follaje del mismo cultivo de papa.

- Se elaboro un documento con los síntomas y recomendaciones de manejo de las enfermedades del tubérculo del papa denominado “Manual de identificación de nuevos agentes causales de enfermedades en tubérculos de papa”

- Se generó información que posibilita un diagnóstico oportuno de las enfermedades emergentes en el tubérculo de papá, facilitando un manejo adecuado y promoviendo un incremento en la productividad del cultivo.

17 Recomendaciones

- Promover la generación de una app específica para la identificación con inteligencia artificial de las enfermedades del tubérculo de la papa.

- Impulsar el uso de las apps comerciales para la identificación de las enfermedades del tubérculo de la papa para incrementar la precisión del diagnóstico con esta metodología.

- Dar a conocer los resultados de la presente investigación que permitan concientizar sobre los efectos negativos sobre la producción nacional de papa si las enfermedades continúan propagándose principalmente por medio de la semilla.

- Con base a los resultados de la presente investigación, promover el uso de semilla certificada de papa libre de patógenos.

Referencias

Acosta Tenelema, M. C. (2025). Iniciadores de PCR en la detección de Citomegalovirus mediante herramientas bioinformáticas (Bachelor's thesis, Riobamba: Universidad Nacional de Chimborazo).

Alcántara, M. R. (2007). Breve revisión de los marcadores moleculares. *Ecología molecular*, *18*(1), 541-566.

Álvarez Coral, A. V. (2022). Caracterización molecular de hongos aislados a partir de la rizosfera de frailejones (Espeletia pycnophylla Cuatrec) en el páramo de paja blanca en el Departamento de Nariño, Colombia.

Belosokhov, A., Yarmeeva, M., Kokaeva, L., Chudinova, E., Mislavskiy, S., & Elansky, S. (2022). *Trichocladium solani* sp. nov.—A new pathogen on potato tubers causing yellow rot. *Journal of Fungi, 8*(11), 1160. https://doi.org/10.3390/jof8111160

Bibi, A., Mubeen, F., Rizwan, A., Ullah, I., Hammad, M., Waqas, M. A. B., Ikram, A., Abbas, Z., Halterman, D., & Saeed, N. A. (2024). Morpho-molecular identification of *Fusarium equiseti* and *Fusarium oxysporum* associated with symptomatic wilting of potato from Pakistan. *Journal of Fungi, 10*(10), 701. https://doi.org/10.3390/jof10100701

Collard, B. C., & Mackill, D. J. (2008). Marker-assisted selection: an approach for precision plant breeding in the twenty-first century. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, *363*(1491), 557-572.

Cueva, D. V. O. (2008). “CARACTERIZACIÓN MOLECULAR DE 60 (Doctoral dissertation, UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA).

Gai, YP, Ma, HJ, Chen, XL, Chen, HH y Li, HY (2016). *Pudrición del tubérculo de Patata causada por Boeremia exigua, una nueva enfermedad de almacenamiento poscosecha en China*. Canadian Journal of Plant Pathology, 38 (2), 243–249. https: //doi.org/10.1080/07060661.2016.1158742.

Henn, C., Alves, D., Boscolo, M., Da Silva, R., Gomes, S. (2020). *Biodegradación de atrazina y producción de enzimas ligninolíticas por cepas de basidiomicetos*. https: //link.springer.com/article/10.1186/s12866-020-01950-0#citeas.

Kim, S. (2021). *Enzimas ligninolíticas de hongos: características y aplicación de enzimas potenciales para la conversión de lignina en productos químicos y materiales de base biológica*. Applied Sciences, 11 (13), 6161. https: //doi.org/10.3390/app11136161.

Leng, J., Dai, Y., Qiu, D., Zou, Y., Wud, X. (2022). *Utilización de la levadura antagonista Wickerhamomyces anomalus, combinada con UV-C para controlar la podredumbre postcosecha de tubérculos de la papa causada por alternaria tenuissima*. https: //doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2022.109782.

Leslie J. F., & Summerell B. A. (2006). *The Fusarium laboratory manual*. Blackwell Publishing. First edition. U. S. A. 369 pp.

Liu, J., Zhang, X., Kennedy, J. F., Jiang, M., Cai, Q., & Wu, X. (2019). *Chitosan induces resistance to tuber rot in stored potato caused by Alternaria tenuissima*.

International journal of biological macromolecules, 140, 851–857. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.08.227.

López, A., Tovar, D., León, J., Allende, R., Bernardi, N., Márquez, I., García, R. (2025). *Caracterización morfológica, filogenia y patogénesis de Setophoma terrestris causante de raíces corchosas y rosadas del tomate (Solanum lycopersicum) en Sinaloa, México*. Rev. méx. fitopatol vol.42 no.2 Texcoco https://doi.org/10.18781/r.mex.fit.2309-5.

Minchala Maurat, E. G., & Tacuri Ochoa, C. E. (2023). Determinación por taxonomía molecular de hongos contaminantes persistentes en el laboratorio de Biotecnología Vegetal (Bachelor's thesis).

Parra, M. (2025). Caracterización molecular de los componentes del reloj circadiano y su relación con la producción de compuestos fotoprotectores en Aureobasidium pullulans.

Quintero Ramirez, N. (2025). Evaluación de protocolo para la identificación de bacterias promotoras del crecimiento vegetal mediante el análisis del gen ARN ribosomal 16S con la técnica PCR-RFLP.

Rivera-Méndez, W., Fuentes-Alfaro, R., Courrau-López, K., Aguilar-Ulloa, W., Zúñiga-Vega, C., & Brenes-Madriz, J. (2019). *Control biológico de Setophoma terrestris aislado de la rizosfera de cebolla en Costa Rica*. Archives of Phytopathology and Plant Protection, 52 (7–8), 813–824. https://doi.org/10.1080/03235408.2018.1548258.

Schaad, NW, Jones, JB, & Chun, W. (2001). Guía de laboratorio para la identificación de bacterias fitopatógenas.

Suárez-Contreras, L. Y., & Peñaranda-Figueredo, F. A. (2022). Identificación molecular de hongos filamentosos y su potencial biotecnológico. *Biotecnología en el sector agropecuario y agroindustrial*, *20*(1), 194-206.

Snyder W. C., & Hansen H. N. (1945). *The species concept in Fusarium with reference to Discolor and other sections*. American Journal of Botany. 32(10): 657-666.

Zhang, J., Islam, MS, Wang, J., Zhao, Y., & Dong, W. (2022). *Aislamiento de endófitos de papa y cribado de genes antimicrobianos de Chaetomium globosum*. International Journal of Molecular Sciences, 23 (9), 4611. https: //doi.org/10.3390/ijms23094611.

Zhang, P., Zhang, W., Wang, S. et al. Producción de toxinas crudas y control químico de Boeremia exigua. Sci Rep 15, 11009 (2025). https: //doi.org/10.1038/s41598-024-79371-6.

Zhang, Y., Tian, P., Duan, G., Gao, F., Schnabel, G., Zhan, J., & Chen, F. (2020). *Histone H3 gene is not a suitable marker to distinguish Alternaria tenuissima from A*. alternata affecting potato. PloS one, 15(4), e0231961. https: //doi.org/10.1371/journal.pone.0231961.

Wang, Y. N., Wang, Z., Wu, L., Cen, X. N., Li, B. T., Ning, F., .. & Li, J. (2009). *A multicenter retrospective analysis of diagnosis and treatment of 72 hemophagocytic syndrome patients*. Chinese Journal of Hematology, 793-798

Apéndice
Registro fotográfico de los procesos de la investigación en orden cronológico del proyecto:

Identificación de enfermedades emergentes del tubérculo de papa (Solanum tuberosum L.) por medio de diagnósticos convencionales y con inteligencia artificial (IA)"

FIGURA A 1 TUBÉRCULOS CON SÍNTOMAS DE ENFERMEDADES COLECTADOS



Nota. Los tubérculos colectados en zonas agrícolas, mercados y bodegas permitieron tener una amplia gama de variabilidad en las enfermedades encontradas como se puede ver en la fotografía.

FIGURA A 2 COLECTA DE TUBÉRCULOS SON SÍNTOMAS EN MERCADOS REGIONALES



Nota. Se identificaron muestras con sintomatología de enfermedades en mercados locales. Las cuales fueron colectadas para el estudio.

FIGURA A 3 COLECTA DE TUBÉRCULOS CON SINTOMATOLOGÍA PATOLÓGICA EN BODEGAS MAYORISTAS.



Nota: Se evidenció que en bodegas mayoristas se encontró una mayor prevalencia de tubérculos enfermos que en los mercados regionales que en algunos casos merman el volumen de papa almacenado.

FIGURA A 4 TUBÉRCULOS DE PAPA DE DESCARTE POR MOTIVOS FITOSANITARIOS



Nota: Los volúmenes de tubérculos de papa descartada en las bodegas mayoristas es bastante grave, ya que representa además de perdidas económicas, un alto riesgo si los tubérculos fueran utilizados como semilla.

Figura A 5 Sintomatología de tubérculos enfermos.



Nota. *Durante la colecta de los tubérculos se seleccionaron los que presentaron diferentes tipos de síntomas como se observa en la fotografía en donde se observan lesiones tipo cancros necróticos.*

FIGURA A 6 TUBÉRCULOS CON SINTOMATOLOGÍA GRAVE



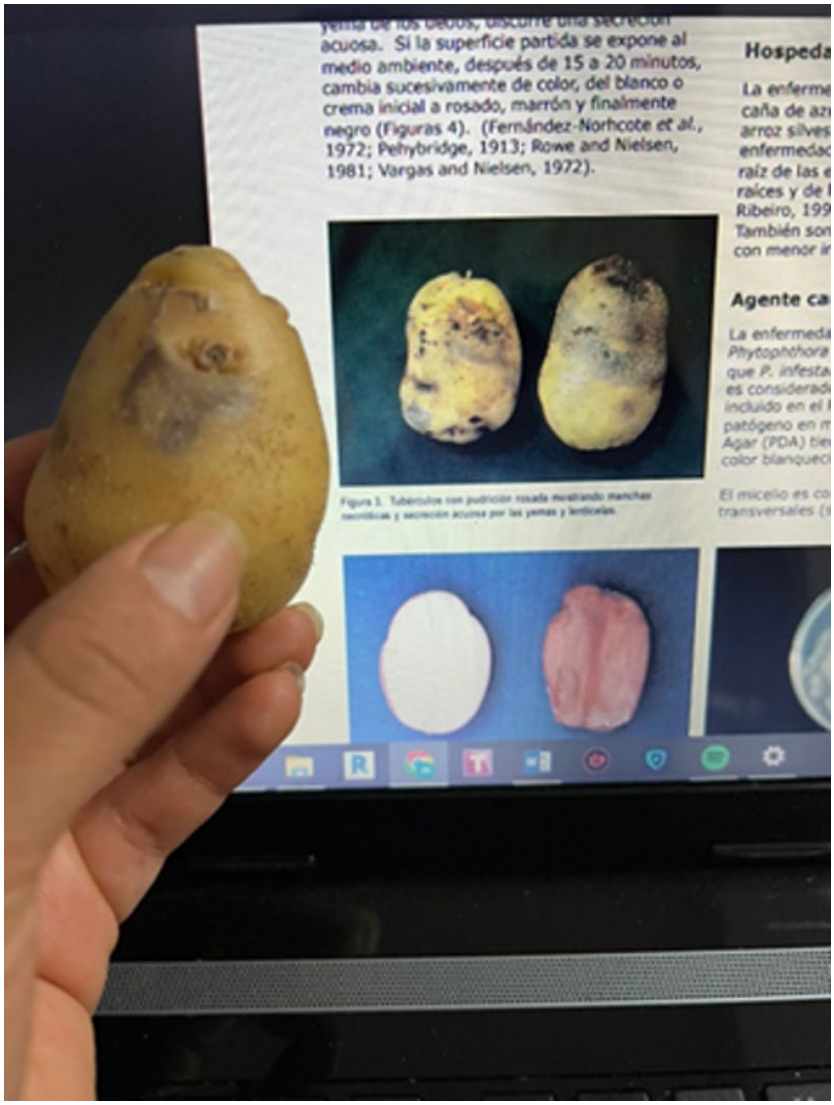
Nota. Las afecciones de las enfermedades de los tubérculos pueden pasar de estrato del peridermis a la pulpa, provocando papa comercial de rechazo

Figura A 7 Sintomatología bacterial en tubérculos de papa



Nota. Entre las muestras colectadas se identificaron tubérculos con síntomas con una destrucción completa de la peridermis, que son síntomas que no se habían reportado con anterioridad en Guatemala, tal como se observan en la muestra 2 de la fotografía.

Figura A 8
Cotejo visual de síntomas



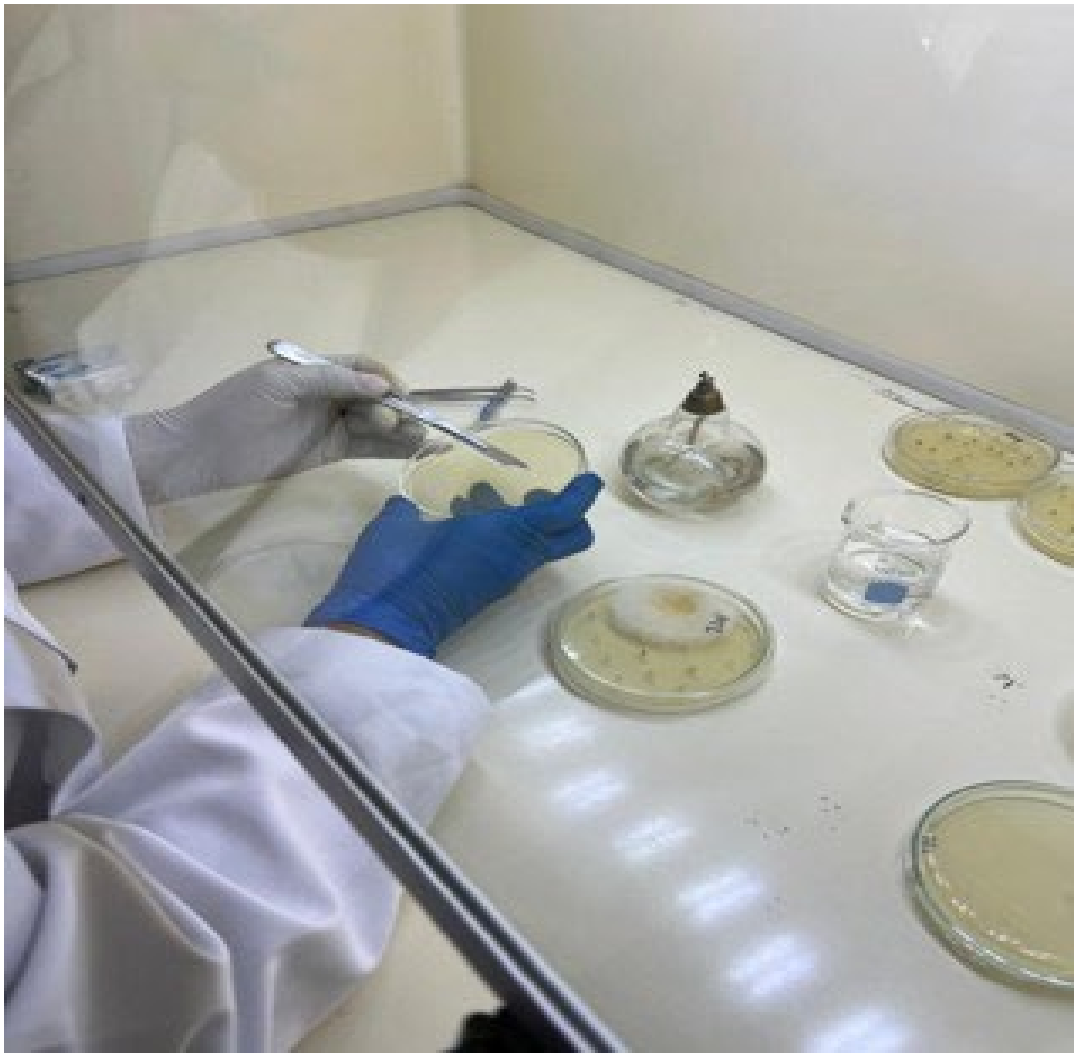
Nota. El primer paso en el proceso de diagnóstico fue determinar por medio de cotejo con manuales de enfermedades de papa similitudes visuales para seleccionar muestras cuya sintomatología fuera ocasionada por factores bióticos.

FIGURA A 9
Preparación de muestras en el laboratorio de Fitopatología



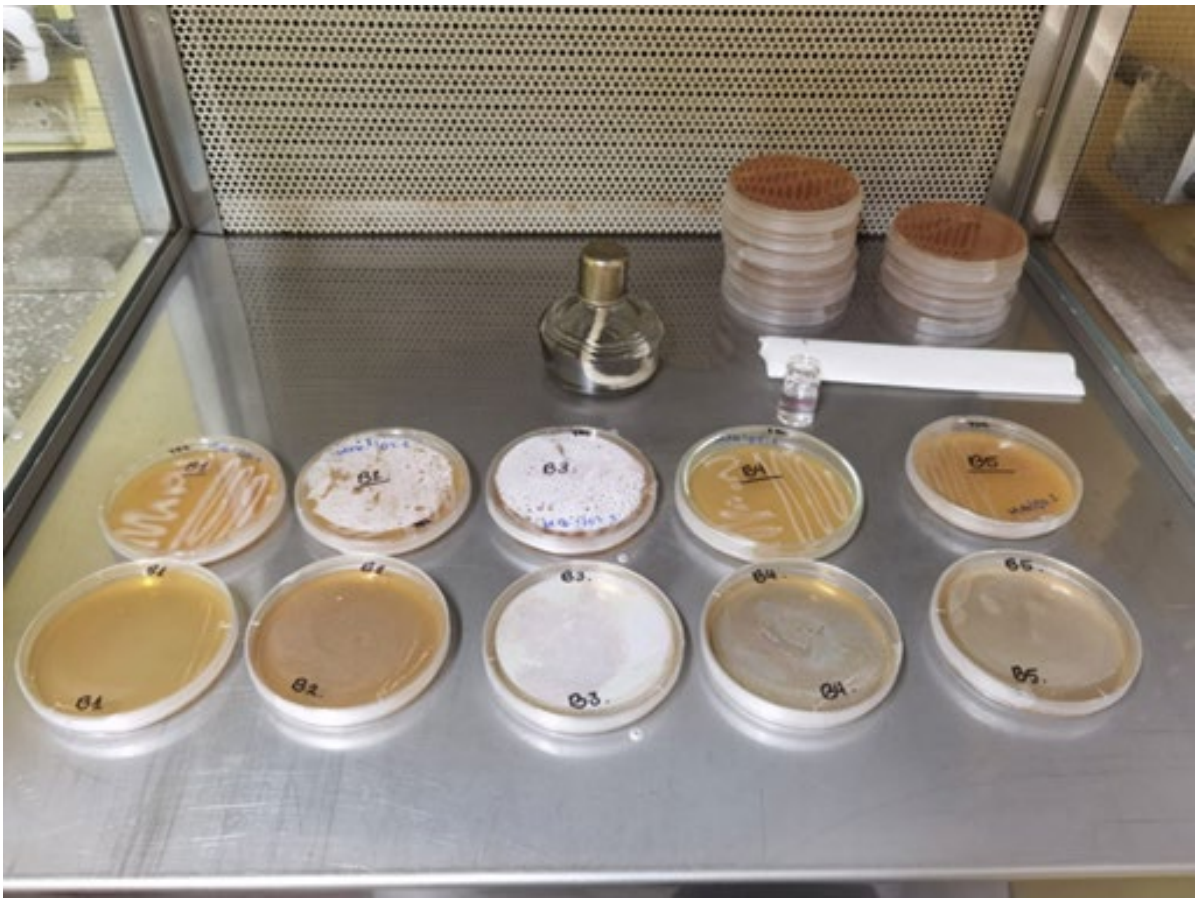
Nota. La segunda etapa consistió en seleccionar las partes infectadas de los tubérculos de cada muestra y se procedió a resguardarlos en cámaras húmedas para procurar el crecimiento y desarrollo de las estructuras vegetativas y sexuales de los patógenos.

Figura A 10
Inoculación de los medios de cultivo en el laboratorio de Fitopatología.



Nota. Las muestras que presentaron signos de la enfermedad fueron utilizadas para obtener muestras de las estructuras e inocular medios de cultivo que en este caso fue PDA (Papa, dextroxa y agar). La inoculación se realizó en cámaras de flujo laminar con el procedimiento de inocuidad apropiado para realizar el aislamiento de los patógenos.

Figura A 11 Cajas Petri con medios de cultivo inoculados



Nota. Se observa en la fotografía las cajas petrí con los medios de cultivo inoculados y esperando el crecimiento de las estructuras vegetativas y sexuales de los patógenos. Se realizaron varias fases y en este caso fue la primera fase.

FIGURA A 12 CARACTERÍSTICAS VISUALES MACROSCÓPICAS



Nota. En el medio de cultivo se puede observar el crecimiento de colonias bacteriales de tipo puntiforme con elevaciones convexas y de color blanquecino.

Figura A 13 Características visuales macroscópica de un hongos.



Nota. El medio de cultivo permitió el desarrollo y crecimiento de un hongo que se caracteriza por tener estructuras blancas, filamentosas. En la placa se observan 4 colonias del hongo.

Figura A 14 Purificación de los patógenos



Nota. Después del crecimiento de los patógenos en las placas se procedió nuevamente a tomar parte de sus estructuras y volverlas a sembrar para obtener un microrganismo purificado. En la fotografía se evidencia la realización de un proceso de purificación de los 9 que se le realizo a cada patógeno. Previamente al envío de la secuenciación de las muestras.

Figura A 15 Diagnostico con Inteligencia Artificial



Nota. Se realizó diagnósticos con diferentes aplicaciones de identificación de enfermedades. En la fotografía se presenta una imagen generada por una aplicación que identifica correctamente la presencia de la bacteria Xantomonas sp en una hoja de papa.

FIGURA A 16 DIAGNOSTICO CON INTELIGENCIA ARTIFICIAL



Nota. En la fotografía se observa la imagen en de respuesta de una Aplicación que diagnostica correctamente una enfermedad de la hoja de la papa. También proponer otras opciones, pero en general la primera respuesta fue la correcta.

Figura A 17 Diagnostico de enfermedad de un tubérculo con una aplicación de IA



Nota. La imagen muestra como la aplicación genera una respuesta de diagnostico de la enfermedad en una toma de 3 sintomatologías de una misma enfermedad. Sin embargo, la respuesta es incorrecta, ya que asocia la enfermedad del tubérculo a un hongo que esta afectando a la corteza de un árbol.

Figura A 18 Socialización de Resultados



Nota. En la imagen se observa uno de los eventos en donde se ha socializados los resultados de las nuevas enfermedades emergentes que han sido diagnosticadas en los tubérculos de papa en Guatemala.

Figura A 19 Socialización de resultados ante agricultores



Nota. En la fotografía se observa un grupo de productores de papa en la sierra de los Cuchumatanes participando en el evento de socialización de las nuevas enfermedades que han sido diagnosticadas y las medidas necesarias para evitar la proliferación de estas.

Declaración del coordinador (a) del proyecto de investigación

El coordinador (a) de proyecto de investigación con base en el Reglamento para el desarrollo de los proyectos de investigación cofinanciados por medio del Fondo de Investigación, artículo 20, elaboró este informe en función de los datos recabados en el proyecto.

Ing. Agr. Osman Estuardo Cifuentes Soto **Coordinador del proyecto**	**Firma**
Fecha: 27/02/2026	

Aval del director (a) del instituto, centro, unidad o departamento de investigación o coordinador de investigación del centro regional universitario

De conformidad con el artículo 19 del Reglamento para el desarrollo de los proyectos de investigación cofinanciados por medio del Fondo de Investigación otorgo el aval al presente informe final de las actividades realizadas en el proyecto Identificación de enfermedades emergentes del tubérculo de papa (Solanum tuberosum L.) por medio de diagnósticos convencionales y con inteligencia artificial (IA)” en mi calidad de Director del Departamento de Investigación del Centro Universitario de Occidente (DICUNOC), mismo que ha sido revisado y cumple su ejecución de acuerdo a lo planificado.

Vo.Bo. **MSc. Elmer Raúl Bethancourt Mérida** **Director de la Dirección General de Investigación del Centro Universitario de Occidente**	**Firma**
Fecha: 27/02/2026	

Recepción de la Dirección General de Investigación

Vo.**Bo.** **M Sc. Liuba María Cabrera Ovalle** **Coordinadora de Programa Universitario en Desarrollo Industrial**	Firma
Fecha: 27/02/2026	

/Digi2026