**Desarrollo de un modelo para la detección y clasificación de enfermedades en la planta del Tomate utilizándo Swin Transformer**

Oscar David Valencia - 20192182074

Maria José Capera Firigua – 20201188262

Facultad de Ingeniería, Universidad Surcolombiana

Electiva Ciencias de la computación II - Visión Artificial

Ferley Medina Rojas

Agosto de 2023

**TABLA DE CONTENIDOS**

[**INTRODUCCIÓN 3**](#_tycrd2ytbpn5)

[**PROBLEMA 4**](#_76696e9e9q2l)

[**OBJETIVOS 5**](#_5wmsknvme73h)

[Objetivo general 5](#_f6dlx77kymqv)

[Objetivos especificos 5](#_d6r42owmwevb)

[**REVISIÓN DE LITERATURA 6**](#_r2lsqc1cu1it)

[**MARCO TEÓRICO 17**](#_osxtvooujh3s)

[**REFERENCIAS 22**](#_3irfze7s0g8d)

# INTRODUCCIÓN

La detección temprana y precisa de enfermedades en el tomate se ha convertido en una necesidad imperante para mitigar su impacto devastador. Aunque los avances en la visión artificial y el aprendizaje automático han proporcionado soluciones potenciales, estos métodos han sido insuficientes en términos de velocidad, costo, y precisión. Las prometedoras técnicas de Deep Learning, particularmente las redes neuronales convolucionales (CNN por sus siglas en inglés), no han vuelto a plantear nuevas arquitecturas ni tampoco un cambio de paradigma, lo que exige un replanteamiento innovador.

Este estudio se propone explorar y validar un enfoque innovador mediante la aplicación del "Swin Transformer", una arquitectura novedosa en el dominio de la visión por computadora. A través de un análisis sistemático y una metodología rigurosa, se buscará desarrollar un modelo que supere las limitaciones existentes en la detección y clasificación de enfermedades del tomate.

Se enfocará en responder preguntas críticas relacionadas con el desarrollo y validación de este nuevo modelo, así como en su comparación con los métodos basados en CNN. La investigación abordará aspectos esenciales como el aumento de datos, la integridad de los resultados, la configuración y entrenamiento óptimo de la arquitectura Swin Transformer, y la interpretación visual de las decisiones del modelo.

La investigación propuesta tiene un potencial significativo para transformar la práctica actual en la detección y clasificación de enfermedades del tomate, ofreciendo un modelo más preciso y eficiente.

El trabajo se estructura en introducción, problema, objetivos, estado del arte, marco teórico, metodología, materiales y métodos, resultados, conclusiones y trabajo futuro.

# PROBLEMA

El cultivo del tomate es esencial para la alimentación y la economía agrícola global debido a que es una de las hortalizas más producidas mundialmente. De acuerdo con la FAO (2021), la producción mundial superó los 189 millones de toneladas, abarcando más de 5 millones de hectáreas cultivadas. Nutricionalmente es una fuente rica de fitoquímicos, nutrientes, antioxidantes y compuestos fenólicos (Collins et al., 2022). Se ha determinado que su consumo aporta beneficios anticancerígenos y protección contra enfermedades cardiovasculares y neurodegenerativas (Collins et al., 2022).

No obstante, el tomate es vulnerable a una amplia variedad de enfermedades causadas por hongos, bacterias, fitoplasmas, virus y viroides (Panno et al., 2021) Tabla 1. Esta vulnerabilidad se ve incrementada por factores como su limitada diversidad genética resultado de la selección intensiva, la tendencia al monocultivo, el intercambio de material infectado a nivel internacional y el cambio climático (Panno et al., 2021). Estas enfermedades representan pérdidas económicas que superan los 30.000 millones de dólares al año (Caruso et al., 2022). Dichas pérdidas repercuten en la economía agrícola, la salud pública y la sostenibilidad ambiental, al afectar el rendimiento y la calidad del cultivo, desestabilizar ecosistemas y elevar los costos de producción por el uso intensivo de pesticidas y otras medidas de control (Panno et al., 2021).

La detección temprana y precisa de enfermedades en el tomate es primordial para mitigar su impacto, pero a pesar de los avances significativos en visión artificial en la última década, estos han presentado limitaciones. En el ámbito del machine learning, los métodos suelen recurrir a la extracción manual de características y algoritmos heurísticos, lo que puede ser lento, laborioso, costoso y susceptible a errores (Zahangir Alom et al., 2018). Estos enfoques han sido superados por técnicas de Deep Learning como las redes neuronales convolucionales (CNN) (Rawat et al. 2022). Sin embargo, estas últimas parecen haber llegado a un punto de estancamiento tras el desarrollo de arquitecturas como ResNet, DenseNet y EfficientNet (Li, 2020).

Es por ello, que la presente investigación sugiere un enfoque innovador basado la arquitectura "Swin Transformer", el cual ha demostrado ser altamente efectivo en tareas de visión por computador pero que nunca ha sido aplicado en la clasificación de enfermedades del tomate.

En este contexto, se plantea las siguientes preguntas:

* ¿Cómo desarrollar y validar un modelo de detección y clasificación de enfermedades del tomate utilizando la arquitectura Swin Transformer que supere la precisión de las redes neuronales convolucionales (CNN)?
* ¿Cómo se puede construir un dataset balanceado en las diferentes clases de las enfermedades del tomate?
* ¿Cómo evaluar e interpretar las predicciones del modelo Swin Transformer para cada clase?
* ¿Cómo se compara la exactitud (accuracy) del modelo Swin Transformer con los modelos basados en redes neuronales convolucionales?

# OBJETIVOS

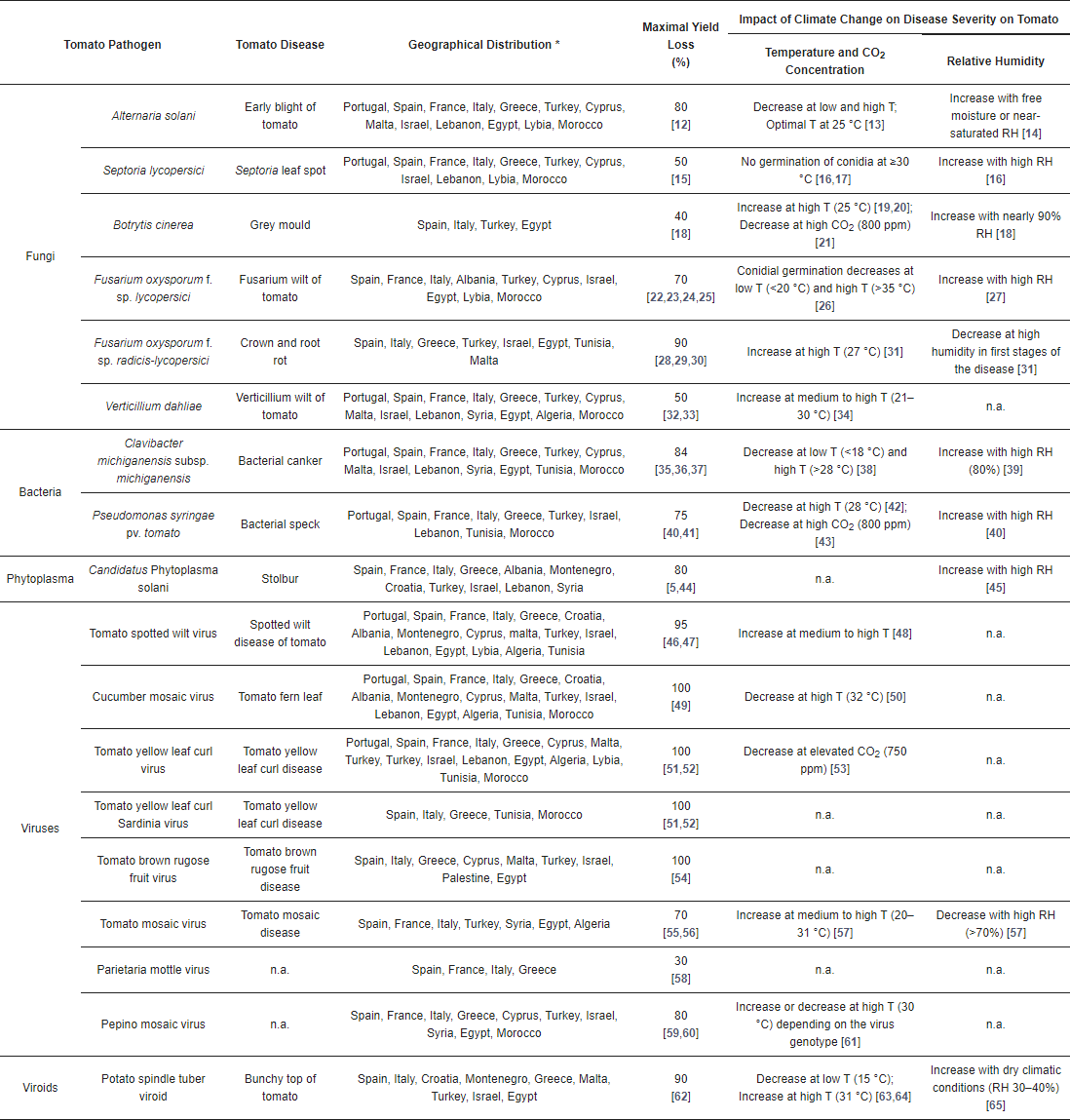
## Objetivo general

Desarrollar y validar un modelo de detección y clasificación de enfermedades de plantas de tomate utilizando la arquitectura Swin Transformer, con el propósito de conseguir una precisión superior en comparación con las redes neuronales convolucionales.

## Objetivos específicos

* Construir un dataset balanceado en las diferentes clases de las enfermedades del tomate.
* Evaluar e interpretar las predicciones del modelo Swin Transformer para cada clase.
* Comparar y analizar la exactitud (accuracy) del modelo Swin Transformer con modelos basados en redes neuronales convolucionales.

**Tabla 1.** Lista de patógenos y enfermedades de la planta de tomate (Panno et al., 2021).



# ESTADO DEL ARTE

En el artículo ***"Machine Learning Approach towards Tomato Leaf Disease Classification"***, Gadade y Kirange, (2020) presentan un enfoque de machine learning para la identificación y clasificación de las enfermedades de las hojas del tomate. El proceso de investigación inició con la recolección de 9,000 imágenes de hojas de tomate del dataset de PlantVillage, enfocándose en siete clases de plantas enfermas y una clase de planta sana.

En la fase de preprocesamiento se minimizó el ruido de las imágenes utilizando un filtro de mediana, después se realizó la extracción de características mediante las técnicas GLCM (Gray-Level Co-Occurrence Matrix), Gabor y SURF (Speeded Up Robust Features). Para clasificar las imágenes en categorías normales o enfermas, se emplearon varios algoritmos de clasificación como la máquina de soporte vectorial (SVM), k-Nearest Neighbors (KNN), Naïve Bayes (NB) y árboles de decisión.

Los resultados mostraron que la combinación de SVM y Gabor obtuvo métricas superiores a todas las demás con un 'accuracy' de 0,7339, 'precision' de 0,2525, 'recall' de 0,9492 y 'f1-score' de 0,3989. A pesar de estos resultados, los autores indican que técnicas más avanzadas, como Adaptive Neuro Fuzzy, Neural Networks y algoritmos genéticos, podrían mejorar la clasificación.

No obstante, este trabajo evidencia que los métodos tradicionales de machine learning muestran métricas inferiores en comparación con las técnicas modernas de Deep learning basadas en redes neuronales convolucionales. Esta observación señala una posible obsolescencia de los métodos tradicionales en el ámbito de la clasificación de enfermedades en hojas de tomate a través de técnicas de visión por computadora.

En el estudio titulado ***"ToLeD: Tomato Leaf Disease Detection using Convolution Neural Network"*** de Mohit Agarwala et al. (2020) se propone un enfoque basado en una Red Neuronal Convolucional (CNN) para la detección y clasificación de enfermedades en las hojas del tomate. El estudio utiliza el dataset de Plant Village que contiene imágenes de hojas de tomate afectadas por nueve tipos de enfermedades, además de una clase de hojas sanas. Para equilibrar el dataset, se aplicaron técnicas de aumento de datos resultando en 10,000 imágenes para el entrenamiento, 7,000 para la validación y 500 para las pruebas.

La arquitectura CNN desarrollada en el estudio consta de 3 capas convolucionales, 3 capas de max-pooling y 2 capas completamente conectadas. Se evaluaron también modelos CNN preentrenados a través de transferencia de aprendizaje, empleando el mismo dataset, con el objetivo de contrastar la eficacia del modelo propuesto. Las métricas resultantes mostraron una precisión en un rango de 76% a 100% para diversas clases, con una precisión promedio de 91.2%. Este rendimiento supera al de modelos preentrenados como VGG16, con una precisión del 77.2%, InceptionV3, con 63.4%, y MobileNet, con 63.7%

El modelo propuesto tiene un número menor de parámetros entrenables comparado al de los modelos preentrenados, sugiriendo potenciales ventajas en almacenamiento y computación. No obstante, la variabilidad en la exactitud entre clases y la comparación con trabajos más actuales indican que el modelo, aunque eficaz, está superado por enfoques más recientes.

El artículo ***"Tomato plant disease detection using transfer learning with C-GAN synthetic images"*** de Abbas et al. (2021) aborda un enfoque de Deep learning para la detección y clasificación de enfermedades de la planta del tomate. La metodología implementa dos fases principales, la generación de imágenes sintéticas mediante Redes Antagónicas Generativas Condicionales (C-GAN) para extender el dataset y la clasificación de enfermedades utilizando un modelo DenseNet121 previamente entrenado.

El desempeño del método se evaluó con el dataset de PlantVillage, que incluye nueve clases de hojas de tomate con distintas enfermedades además de una clase de hojas sanas. Las imágenes sintéticas generadas con C-GAN se añadieron al dataset existente. Luego, se entrenó el modelo DenseNet121 con el conjunto de imágenes extendido.

Se realizaron dos series de experimentos, el primero centrado en el entrenamiento de C-GAN y la generación de imágenes sintéticas; el segundo, en el entrenamiento del modelo DenseNet121 utilizando el dataset ampliado. Un análisis comparativo con modelos preentrenados como VGG19, ResNet50, Inception-V3, Xception y MobileNet mostró que el modelo propuesto logró el más alto nivel de exactitud, con un 97.11% en la clasificación de las 10 clases del estudio.

No obstante, aunque el modelo propuesto demostró una alta eficacia en la clasificación de enfermedades de la planta de tomate y la aplicación de C-GAN ayudó a evitar el sobreajuste, es importante evaluar la fidelidad de las imágenes sintéticas generadas, ya que podrían no tener el nivel de detalle que presentan las imágenes reales y, por lo tanto, afectar negativamente el rendimiento del modelo en tareas de generalización.

El estudio ***"Early Detection and Classification of Tomato Leaf Disease Using High-Performance Deep Neural Network"*** de Trivedi et al. (2021) aborda la identificación y clasificación de enfermedades en hojas de tomate mediante Convolutional Neural Networks (CNN). Se empleó un conjunto de datos compuesto por 3000 imágenes, distribuidas en nueve clases de hojas afectadas y una clase de hojas sanas. En la fase de preprocesamiento, las imágenes se normalizaron y redimensionaron.

El proceso comprende etapas de preprocesamiento, segmentación y clasificación a través de CNN. La arquitectura CNN especificada consta de ocho capas convolucionales, ocho capas de max pooling, tres capas fully connected, con una tasa de dropout de 0.5 y función de activación Relu. Se realizaron experimentos variando parámetros como la tasa de aprendizaje y el número de épocas.

Los resultados de la métrica de exactitud fueron del 98.49%. Los experimentos adicionales mostraron que la precisión varía levemente con diferentes tasas de aprendizaje y épocas, oscilando en general alrededor del 98.4% al 98.58%. La comparación con modelos estándar como MobileNet, VGG16 e InceptionV3 indicó que el modelo propuesto supera a estos modelos CNN en exactitud.

El estudio resalta la eficacia del modelo propuesto, especialmente en comparación con otros modelos. Sin embargo, omite discusiones sobre limitaciones, aplicabilidad futura o la justificación para la elección de la arquitectura específica empleada.

El artículo titulado ***"Tomato leaf disease classification using supervised learning techniques: contrasting analysis"***, presentado por Rawat et al., (2022), ofrece una contribución al campo de la clasificación de enfermedades en hojas de tomate a través de técnicas de aprendizaje supervisado.

El estudio se articula en torno a cuatro componentes principales: selección del dataset de imágenes de tomates del archivo "Plant Village", el preprocesamiento de estas imágenes para la eliminación de ruido mediante un filtro de mediana, la aplicación de diversos algoritmos de aprendizaje automático como SVM, K-Nearest Neighbour, Naïve Bayes, Decision Tree, Feed Forward Neural Network, Back Propagation Neural Network, Deep Neural Network, Convolutional Neural Network y Multi Kernel SVM, y por último la evaluación de la efectividad de estos algoritmos mediante métricas como Precisión, F1-Score y Recall.

El estudio realiza un análisis comparativo de la eficacia de los diferentes algoritmos. En este análisis, la Red Neuronal Convolucional (CNN) logra una exactitud de 98,5%, superando a otros algoritmos como SVM, que alcanza un 90% de exactitud, y KNN con un 83,6%. La investigación concluye que las CNN ofrecen un rendimiento superior en la clasificación de enfermedades de hojas de tomate en comparación con métodos tradicionales de machine learning.

El estudio titulado ***"AlexNet Convolutional Neural Network for Disease Detection and Classification of Tomato Leaf"*** (Chen et al., 2022) aborda la detección y clasificación de enfermedades en hojas de tomate mediante una red neuronal convolucional (CNN) basada en la arquitectura de AlexNet. Los autores utilizaron un conjunto de datos de 18,345 imágenes de entrenamiento y 4,585 imágenes de prueba, distribuidas en nueve clases correspondientes a diversas enfermedades de la hoja del tomate y una clase de hoja sana.

La modificación realizada a la arquitectura de la red AlexNet involucra tres capas de convolución, tres capas completamente conectadas y una capa de salida. Se utilizó el optimizador Adam con una tasa de aprendizaje de 0.0005, 75 épocas y un tamaño de lote de 128. La función de pérdida fue la entropía cruzada. El modelo mostró una exactitud del 96%, una tasa de precisión del 98%, un valor de recall del 95% y un F1-score del 97%.

Las conclusiones destacan la eficacia del modelo para la clasificación de enfermedades en hojas de tomate. Se señala que el modelo es lo suficientemente ligero como para implementarse en dispositivos móviles, lo que es relevante dadas las limitaciones de capacidad de memoria en estos dispositivos.

El estudio ***"BotanicX-AI: Identification of Tomato Leaf Diseases Using an Explanation-Driven Deep-Learning Model"*** de Bhandari et al., (2023), aborda la clasificación de nueve clases de enfermedades en hojas de tomate y una clase para las hojas sanas utilizando un modelo de aprendizaje profundo basado en EfficientNetB5. El dataset se construye preprocesando las imagenes mediante redimensionamiento y aumentos de datos resultando en 11,000 imágenes de hojas de tomate distribuidas en 10 clases.

La metodología consiste en aplicar transferencia de aprendizaje utilizando un modelo de EfficientNetB5 al que se le agregaron capas adicionales como la normalización por lotes, capas densas y técnicas de regularización como dropout. Para incrementar la interpretabilidad del modelo se integran técnicas como GradCAM y LIME, que ayudan a identificar las regiones de la imagen que más contribuyen a la clasificación.

En cuanto a métricas el modelo propuesto alcanzó una exactitud del 99.07%, superando a otros modelos preentrenados, como MobileNet (94,00%), Xception (95,32%), VGG16 (93,35%), ResNet50 (96,03%) y DenseNet121 (96,30%). Las técnicas de GradCAM y LIME pudieron identificar las regiones más importantes en las imágenes de las hojas para la clasificación. Aunque se observó que GradCAM tenía limitaciones en la identificación de ciertas regiones en algunas clases de enfermedades.

Finalmente, los autores recomiendan la consideración de otras técnicas de interpretabilidad, como HiResCAM y SHAP, para trabajos futuros, argumentando que estas pueden aumentar la confianza en la aplicabilidad del modelo.

Los estudios revisados abordan el problema de la detección y clasificación de enfermedades en hojas de tomate utilizando diversas técnicas que van desde machine learning tradicional hasta deep learning. Los algoritmos de machine learning, como SVM y KNN, muestran métricas de desempeño inferiores a los modelos basados en deep learning. Entre los modelos de deep learning, las Redes Neuronales Convolucionales (CNN) y sus variaciones, como DenseNet121 y EfficientNetB5, muestran métricas superiores en términos de precisión, exactitud y F1-score.

Los métodos que incorporan imágenes sintéticas generadas mediante Redes Antagónicas Generativas Condicionales (C-GAN) y técnicas de transferencia de aprendizaje parecen ofrecer ventajas en términos de desempeño y prevención de sobreajuste. Sin embargo, la calidad de las imágenes sintéticas generadas es una variable por considerar para tareas de generalización.

La aplicabilidad en dispositivos móviles y la interpretabilidad del modelo son aspectos que se resaltan en algunos trabajos, evidenciando la importancia de estos factores en aplicaciones prácticas. Las técnicas de explicabilidad como GradCAM y LIME ofrecen posibilidades para entender las decisiones del modelo, aunque se sugiere que métodos adicionales pueden mejorar la confianza en el modelo.

Los métodos basados en deep learning muestran un desempeño superior y se destacan como el método más efectivo en la clasificación de enfermedades de la planta de tomate. Sin embargo, no han presentado innovaciones en su arquitectura recientemente. Además, no se ha investigado la aplicación de arquitecturas de visión transformer para esta problemática específica, lo cual representa un área no explorada que podría ofrecer soluciones a limitaciones como la interpretabilidad o una mayor exactitud y que por tanto justifica una investigación más exhaustiva.

# MARCO TEÓRICO

## Enfermedades de la planta de tomate

* + 1. ***Definición***

Las enfermedades en plantas de tomate son alteraciones fisiológicas o estructurales de la planta originadas por entidades biológicas conocidas como patógenos y que afectan negativamente la salud o el rendimiento de la planta. La manifestación de estas enfermedades requiere la concurrencia de tres elementos fundamentales; presencia de agentes patogénicos capaces de inducir enfermedad (por ejemplo, hongos, bacterias o virus); un huésped (la planta de tomate) que se encuentra en un estado susceptible, comúnmente debido a condiciones de estrés como sobrefertilización, salinidad del suelo, uso excesivo de pesticidas, competencia por espacio o excesiva irrigación; y por ultimo las condiciones ambientales que facilitan la acción del agente patogénico, tales como temperatura y humedad (Flores, 2012; Bernal, 2010).

### Enfermedades más comunes en la planta de tomate

Las enfermedades en tomates pueden ser causadas por una variedad de patógenos, incluidos hongos, bacterias, fitoplasmas, virus y viroides (Panno et al., 2021). Según Corrales Paredes (2021), a nivel mundial existen más de 200 patógenos que afectan a las plantas de tomate. Los de mayor importancia son Alternaria solani causante del tizón temprano, Phytophthora infestans causante del tizón tardío, Fusarium oxysporum y Ralstonia solanacearum causantes de marchitamiento y las enfermedades virales.

Algunas de las enfermedades más comunes que afectan a los tomates en la región del Mediterráneo incluyen el tizón temprano provocado por Alternaria solani, la mancha foliar por septoria por Septoria lycopersici, el moho gris por Botrytis cinerea, así como el marchitamiento y la putrefacción de la raíz y la corona causados por Fusarium oxysporum. Además del Verticillium dahliae que es el agente causal del marchitamiento por vercitilum.

En cuanto a las enfermedades bacterianas, Clavibacter michiganensis provoca el cancro bacteriano y Pseudomonas syringae causa la mancha bacteriana. Candidatus Phytoplasma solani es responsable de la enfermedad conocida como Stolbur. Diversos virus, como Tomato spotted wilt virus, Cucumber mosaic virus, Tomato yellow leaf curl virus y Tomato yellow leaf curl Sardinia virus, están asociados con enfermedades como la marchitez manchada del tomate, el rizado amarillo de las hojas y el mosaico del tomate. Viroides como Potato spindle tuber viroid causan el síndrome de crecimiento excesivo o "bunchy top".

Blanchard (2011) indica que en regiones tropicales las patologías bacterianas en tomates incluyen sarna bacteriana originada por diversas especies de Xanthomonas y moteado originado por Pseudomonas tomato. Asimismo, en estas regiones, se registran virus como Tomato yellow curl virus (TYLCV) transmitidos por la mosca Bemisia tabaci. En contextos tropicales húmedos, el marchitamiento bacteriano generado por Ralstonia solanacearum es común. En regiones tanto templadas como tropicales, Tomato spotted wilt virus (TSWV) y Pepino mosaic virus (PepMV) impactan en el cultivo de tomates. Con relación a las enfermedades fúngicas, se registran patologías causadas por Phytophthora infestans, Alternaria tomatophila, Verticillium dahliae y Fusarium oxysporum. Otros agentes patogénicos relevantes del tomate incluyen nematodos, insectos y ácaros (Panno et al., 2021).

### Síntomas

Los síntomas de las enfermedades de la planta de tomate varían considerablemente y están estrechamente ligados al tipo de patógeno involucrado y a la enfermedad específica que se manifiesta. Los síntomas pueden incluir, pero no están limitados a, decoloración de hojas, marchitamiento, necrosis, manchas foliares, deformación de frutos y presencia de hongos o esporas en diversas partes de la planta. Además, la severidad y la aparición de síntomas pueden verse influenciadas por factores externos como condiciones ambientales y prácticas de manejo del cultivo. Es crucial para el manejo efectivo de la enfermedad identificar correctamente los síntomas asociados con cada patógeno o enfermedad específica (Blancard, 2011; Panno et al., 2021).

Las enfermedades que afectan la planta de tomate se pueden categorizar según los síntomas que manifiestan. El tizón temprano y la mancha foliar por septoria comparten características como defoliación y lesiones necróticas en diferentes partes de la planta. El marchitamiento por fusarium, putrefacción de la raíz y la corona y marchitamiento por verticillium como su nombre lo indica presentan síntomas de marchitamiento y pardeamiento vascular. El moho gris se distingue por síntomas como podredumbre blanda y encharcamiento de tejidos.

El cancro y la mancha bacterianos muestran lesiones en diferentes partes de la planta y enrollamiento de las hojas en el caso de la mancha bacteriana. Stolbur phytoplasma, Tomato yellow leaf curl virus y Tomato brown rugose fruit virus presentan síntomas como amarilleamiento y atrofia o escasez de hojas.

Tomato spotted wilt virus, Parietaria mottle virus y Cucumber mosaic virus incluyen síntomas de deformación foliar y lesiones necróticas. Tomato mosaic virus y Pepino mosaic virus se caracterizan por síntomas como moteado de hojas y deformación de los frutos. Potato spindle tuber viroid manifiesta una variedad de síntomas, incluyendo retraso del crecimiento y deformidad de los frutos (Panno et al., 2021).

### Métodos tradicionales de detección de enfermedades

* + - 1. La detección manual**.** Se lleva a cabo por expertos que necesitan un amplio rango de conocimientos y experiencia en diversas disciplinas. Estos conocimientos son esenciales debido a la variedad de enfermedades existentes. El diagnóstico no solo se basa en síntomas y signos, sino también en la comprensión de la biología de los agentes patógenos y el contexto en el que la enfermedad ocurre. El proceso de diagnóstico implica observaciones detalladas, preguntas dirigidas a contextualizar la enfermedad y razonamiento para priorizar posibles causas. Este enfoque es común en áreas rurales y requiere una considerable cantidad de tiempo y recursos humanos para su implementación en grandes fincas. Además, la evaluación manual es susceptible a errores humanos como sesgos o variables cognitivas y emocionales que afectan el juicio clínico (Blancard, 2011; Thangaraj et al., 2022; Garcia, 2016).
      2. Los métodos de labora**torio.** Incluyen técnicas inmunológicas, cultivo de patógenos y microscopía. Aunque estos métodos son precisos, son laboriosos, costosos y requieren tiempo, lo que puede no ser viable para un diagnóstico rápido y eficaz (Verma et al., 2018; Valdivieso, 2021).

### Desafíos en la detección de enfermedades

Dado los desafíos asociados con los métodos tradicionales de detección de enfermedades, como el tiempo, costo y la necesidad de expertos altamente calificados, existe una necesidad imperante de desarrollar nuevas estrategias para la detección y control de enfermedades en la planta de tomate. Los errores en la detección o el retardo en la intervención pueden resultar en pérdida de rendimiento y calidad del producto (Garcia, 2016; Valdivieso, 2021).

La ineficacia en la detección y control de enfermedades en la planta de tomate puede resultar en productos agrícolas que son huéspedes de patógenos, lo cual representa un riesgo para la salud pública. Asimismo, el uso indebido de pesticidas, a menudo utilizado como medida preventiva ante la incertidumbre en la detección de enfermedades, puede resultar en la acumulación de residuos químicos en los alimentos, comprometiendo así la seguridad alimentaria (Corrales Paredes, 2021).

## Seguridad alimentaria (food safety)

La seguridad alimentaria se centra en prevenir enfermedades transmitidas por alimentos a través de la gestión de toda la cadena de producción, desde el cultivo hasta el consumo. Las fuentes comunes de contaminación incluyen hongos, bacterias, virus, viroides, parásitos y sustancias químicas (Guennouni et al., 2022; FAO, 2022). Esta contaminación amenaza tanto la salud individual como pública y puede comprometer la calidad nutricional de los alimentos. Por lo tanto, es necesario implementar medidas de control en cada etapa de la cadena alimentaria (Uçar et al., 2016).

Es por eso por lo que en el ámbito de la producción de plantas de cultivo como el tomate la detección temprana de enfermedades cumple un rol fundamental para la seguridad alimentaria, velando por la salud tanto del cultivo como la de los consumidores. Ante esta necesidad, la tecnología de la visión artificial se presenta como un método efectivo para identificar enfermedades de forma automática, no destructiva y económica. Esta tecnología contribuye a la biovigilancia al permitir una identificación más rápida y precisa de microorganismos patógenos (Khan et al., 2021).

## Visión artificial

Los sistemas de visión artificial en la agricultura y la seguridad alimentaria ofrecen ventajas a comparación de los métodos tradicionales de detección tales como mayor velocidad de operación, consistencia, fiabilidad y adaptabilidad en entornos industriales (Khan et al., 2021). La visión artificial contribuye a la optimización sostenible de la producción agrícola mediante la incorporación de una nueva tecnología de identificación de plagas y enfermedades (J. Gómez-Camperos et al., 2021).

La Visión artificial, también conocida como visión por computadora, es un campo de estudio interdisciplinario que se sitúa en la categoría general de inteligencia artificial. Su objetivo es habilitar a sistemas computacionales para interpretar y procesar datos visuales del entorno. Esto se logra mediante el uso de algoritmos y modelos matemáticos diseñados para analizar y extraer información relevante de imágenes y vídeos (Xu et al., 2021). La evolución continua de algoritmos y tecnologías hace que la visión artificial sea un campo en rápido desarrollo, con aplicaciones que se extienden a áreas como la detección de objetos, la clasificación y segmentación de imágenes, detección de rostros, conducción autónoma y la extracción de información útil de imágenes, documentos gráficos y vídeos (Mahadevkar et al., 2022).

En el campo de la agronomía, el uso de visión artificial se focaliza principalmente en el diagnóstico temprano de enfermedades en plantas. La detección se realiza generalmente a través del análisis de síntomas visibles en las hojas, que a menudo son los primeros indicadores de la presencia de enfermedades. Con los avances en el reconocimiento de patrones y aprendizaje automático, se han desarrollado nuevos métodos para el diagnóstico de enfermedades en plantas. Estos avances han despertado un mayor interés entre los investigadores, por lo que nuevos modelos y técnicas de visión artificial se siguen explorando e implementando (Nanehkaran et al., 2020).

### Clasificación de Imágenes

Esta tarea pertenece al ámbito de la visión artificial y es el proceso de categorizar o etiquetar una imagen en función de su contenido, seleccionada de un conjunto de categorías predefinidas. El reconocimiento, descripción y clasificación automática de las estructuras contenidas en las imágenes son esenciales en diversos dominios científicos e ingenieriles que necesitan la captura, tratamiento y transferencia de datos visuales (Vocaturo, 2021). Para llevar a cabo la clasificación, se emplean diversas técnicas, incluidas redes neuronales artificiales, redes neuronales convolucionales, máquinas de soporte vectorial, k-nearest neighbor y algoritmos de random forest. Estas técnicas permiten extraer características de las imágenes para posteriormente entrenar un modelo capaz de predecir la clase a la que pertenece una nueva imagen (Sanghvi et al., 2020).

### Enfoques en visión artificial

La visión artificial es un campo que implica el uso de diversos enfoques para permitir a las máquinas interpretar y comprender los datos visuales del mundo que las rodea. Dos de los enfoques más utilizados en la visión por ordenador son el Machine learning y el Deep learning. El machine learning, es una categoría amplia de algoritmos que permiten a las máquinas aprender de los datos y mejorar su rendimiento con el tiempo. Los algoritmos que se emplean frecuentemente son k-nearest neighbors, Bayesian classification, logistic regression, support vector machines, Decision trees y random forests, entre otros (Szeliski, 2020). Estos algoritmos son versátiles y encuentran aplicación en tareas de aprendizaje supervisado, no supervisado y de refuerzo.

Las redes neuronales profundas o deep learning, por su parte, son un subcampo del machine learning que utiliza grandes redes neuronales artificiales para modelar y resolver problemas complejos (Mahadevkar et al., 2022). Se han erigido como el mejor metodo para una amplia gama de tareas en visión por computadora en la última década. Szeliski (2020) indica que estas redes no solo son prevalentes en tareas de clasificación semántica y segmentación sino también en tareas de nivel inferior como mejora de imágenes, estimación de movimiento y recuperación de profundidad.

Tanto el machine learning como el Deep learning se han utilizado en la detección de enfermedades en los cultivos y en una gran variedad de tareas de visión artificial (Ouhami et al., 2021), pero la principal diferencia entre estas dos técnicas es que en técnicas de visión artificial basadas en machine learning, las características de las imágenes se extraen manualmente antes de proceder a la clasificación mientras que en el caso del deep learning, el algoritmo aprende de forma autónoma tanto las representaciones de nivel medio como las etapas de clasificación a partir de los datos de entrenamiento. Desde la introducción del sistema "AlexNet" en 2012, la exactitud en la clasificación de imágenes, detección de objetos y segmentación de imágenes ha mostrado una mejora continua, impulsada en gran medida por redes más profundas y algoritmos de entrenamiento mejorados (Szeliski 2020; Shorten & Khoshgoftaar, 2019).

### Visión artificial mediante Deep learning

El enfoque de deep learning en visión artificial es integral y se centra en la optimización de cada etapa del proceso de aprendizaje automático. Este enfoque requiere que la función de pérdida sea una función diferenciable de todos los parámetros involucrados, permitiendo así una búsqueda factible de los parámetros que minimizan la pérdida durante el entrenamiento. Las redes neuronales profundas proporcionan esta arquitectura de cómputo uniforme y diferenciable (Szeliski, 2020).

Este enfoque intenta imitar las redes neuronales biológicas y el interés por explorarlo ha tenido fluctuaciones desde finales de los años 50. Durante ese tiempo, varias arquitecturas de redes neuronales fueron desarrolladas, incluidas aquellas que usaban unidades estocásticas como las Máquinas de Boltzmann y las Máquinas de Boltzmann Restringidas. En la actualidad se han vuelto populares las redes neuronales profundas deterministas y discriminativas con activaciones de valor real, entrenadas mediante descenso de gradiente (Szeliski, 2020).

Comparado con otras técnicas de aprendizaje automático que generalmente dependen de varias etapas de preprocesamiento para extraer características, los enfoques de deep learning suelen estar entrenados de extremo a extremo, pasando directamente de píxeles en bruto a las salidas deseadas finales, este enfoque contribuye a la eficacia en las tareas complejas de reconocimiento visual y clasificación de imágenes (Szeliski, 2020).

Diversos modelos de aprendizaje profundo se emplean en la clasificación de imágenes en visión artificial. Entre estos, las redes neuronales convolucionales (CNN) son las más comunes y han mostrado un rendimiento destacado en tareas de clasificación de imágenes (Shah & Harpale, 2018). Modelos bayesianos de aprendizaje profundo también se han utilizado en estas tareas y son capaces de modelar tanto incertidumbres aleatorias como epistémicas (Szeliski, 2020). Los Vision Transformers (ViT) representan una arquitectura más reciente basada en transformadores, utilizada en tareas de visión por computadora. Estos modelos han emergido como alternativas competitivas a las CNN, especialmente en su capacidad para manejar dependencias a largo plazo, y se han aplicado en tareas como la clasificación, segmentación de imágenes y detección de objetos (Amjoud & Amrouch, 2023).

## Redes Neuronales Convolucionales (CNN)

Las redes neuronales convolucionales (CNN) son una variante de las redes neuronales artificiales tradicionales (ANN, por sus siglas en inglés). Ambos tipos de redes contienen neuronas que se optimizan a través del aprendizaje. En una CNN, cada neurona recibe una entrada y realiza una operación, tal como un producto escalar seguido de una función no lineal, similar a una red neuronal tradicional. La red completa expresa una única función de puntuación perceptiva, relacionada con los pesos de la red. La última capa de la CNN contiene funciones de pérdida asociadas a las clases del problema que se está resolviendo (O’Shea & Nash, 2015).

La principal diferencia entre CNN y redes neuronales tradicionales es la especialización de las CNN en el reconocimiento de patrones dentro de imágenes. Esto se logra codificando características específicas de las imágenes en la arquitectura de red, lo que permite reducir el número de parámetros necesarios para configurar el modelo. Esta especialización permite a las CNN manejar de forma más eficiente la complejidad computacional asociada con el procesamiento de datos de imágenes, que puede ser problemática para las ANN. Por ejemplo, un conjunto de datos como MNIST, que tiene imágenes con dimensiones de 28x28 píxeles, suele ser computacionalmente manejable para las redes neuronales artificiales tradicionales. Pero si se consideran imágenes a color de mayor tamaño, como 64x64, la cantidad de pesos en una sola neurona de la primera capa oculta aumenta significativamente, lo que eleva los requisitos computacionales. Los CNN ofrecen una solución más eficiente para tratar con este tipo de datos de alta dimensionalidad (O’Shea & Nash, 2015).

Szeliski (2020) describe que, en las redes neuronales convolucionales, cada capa se organiza en mapas de características en lugar de conectar todas las unidades en una capa a todas las unidades en una capa anterior. En una capa convolucional, las sumas ponderadas se realizan solo dentro de una pequeña ventana local denominada kernel. Los pesos dentro de un kernel son idénticos para todos los píxeles de una capa y canal dado, lo que resulta en un menor número de pesos a entrenar en comparación con las capas completamente conectadas. Durante la retropropagación, las actualizaciones del peso del kernel se suman en todos los píxeles de una capa/canal. Este enfoque permite la construcción de características locales que luego se combinan de diferentes maneras para producir características más discriminativas y semánticamente significativas.

Las CNN se han convertido en una técnica dominante en el campo de la clasificación de imágenes, detección de objetos, segmentación semántica e identificación de enfermedades de las plantas (Xiao et al., 2022; Nanehkaran et al., 2020). Han mostrado avances significativos en su arquitectura y han superado a otros métodos de clasificación comunes como k-NN, SVM, Naives Bayes, Linear Regression y ANN (Sood y Singh 2021; Xiao et al, 2022). Sin embargo, aunque las CNN son eficientes para el procesamiento de imágenes, presentan ciertas limitaciones. Una de estas limitaciones, según Szeliski (2020), radica en los sesgos inductivos inherentes a las operaciones convolucionales, que asumen que los píxeles cercanos son más importantes que los píxeles distantes. Estos sesgos pueden limitar el progreso a medida que crecen los conjuntos de datos, los modelos y el poder computacional.

En este contexto, los Vision Transformers (ViTs) emergen como una solución que aborda estas limitaciones. Inicialmente desarrollados para aplicaciones en procesamiento de lenguaje natural, los ViTs adaptan la arquitectura de los transformers para tareas de visión computacional. A diferencia de las CNN, que operan con un sesgo de localidad espacial, los ViTs son capaces de operar en toda la secuencia de entrada a la vez, permitiendo una atención más globalizada de la imagen. Esto los ha llevado a superar a las CNN en diversas evaluaciones de referencia en el ámbito de la visión computacional (Szeliski, 2020; Jamil et al., 2023)."

## Vision Transformer

Las arquitecturas de Vision Transformer (ViTs) se han destacado en tareas de clasificación de imágenes, estableciendo un nuevo estado del arte en benchmarks como ImageNet (Papers With Code, 2023). Estos modelos adaptan la arquitectura de transformers, que fueron inicialmente diseñados para aplicaciones en procesamiento de lenguaje natural, a tareas de visión artificial. La metodología central consiste en dividir una imagen en parches, aplanarlos y procesarlos a través de capas de transformers para captar relaciones de largo alcance en la imagen (Alexey Dosovitskiy et al., 2020).

Según Szeliski (2020), el componente fundamental de un transformer es el mecanismo de auto-atención, que se forma a partir de aplicar atención a cada una de las N activaciones unitarias en una capa determinada de la red. La operación de auto-atención produce un conjunto de vectores de salida basados en todas las entradas. Esto se diferencia de las capas completamente conectadas y convolucionales, donde los pesos son fijos y se aplica una atención más localizada.

La atención se calcula utilizando la atención de producto escalar, en la que se realiza el producto escalar entre vectores de query y key, se escala según la raíz cuadrada de la dimensión de estos vectores y finalmente se aplica la función softmax. El bloque de transformer se compone tanto de un bloque de encoder como de un bloque de decoder, aunque ambos comparten muchos de los mismos componentes. En muchas aplicaciones, el encoder puede utilizarse sin el decoder y viceversa. Durante la fase de entrenamiento, una diferencia significativa en el bloque de decoder es el enmascaramiento de algunos de los vectores de entrada a la auto-atención. Este enmascaramiento permite el entrenamiento paralelo en tareas de predicción autorregresiva, optimizando la eficiencia computacional (Szeliski, 2020).

Los ViTs son capaces de considerar toda la secuencia de entrada simultáneamente, lo que permite una atención más globalizada de la imagen. Esto los ha llevado a superar a las CNN en diversas evaluaciones de referencia en el ámbito de la visión computacional (Szeliski, 2020; Jamil et al., 2023).

Sin embargo, los ViT tienen ciertas limitaciones, una de las principales dificultades de aplicar transformers al dominio de las imágenes radica en el tamaño de la entrada de imagen. En términos de complejidad computacional, el número de operaciones en punto flotante (FLOPs) necesarias para la auto-atención es del orden de , donde N es la longitud de la entrada y D es el número de dimensiones de cada entrada. En comparación, las FLOPs para una operación de convolución es del orden de donde K representa el tamaño del núcleo de la convolución. En este caso, la operación de convolución resulta significativamente más eficiente en términos de FLOPs que la auto-atención. (Szeliski, 2020).

Estas limitaciones hacen que los Vision Transformers requieran grandes cantidades de datos y recursos computacionales para el entrenamiento desde cero. Además, la eficiencia computacional de la atención global utilizada en los ViTs puede no ser óptima, especialmente para imágenes de alta resolución (Alexey Dosovitskiy et al., 2020; Touvron et al., 2021). Esta problemática conduce a la búsqueda de alternativas más eficientes, como la arquitectura Swin Transformer.

Diagrama

Descripción generada automáticamente

**Figura 1:** Model overview of the first visual transformer (Alexey Dosovitskiy et al., 2020)

## Swin Transformer

Swin Transformer, que significa "Shifted Window Transformer", introduce una arquitectura innovadora que aborda las limitaciones de los ViTs y las CNN tradicionales. Comienza dividiendo la imagen en parches y utiliza la atención de ventanas deslizantes en lugar de atención global, lo que reduce significativamente la complejidad computacional. Además, implementa una estructura piramidal para procesar imágenes a diferentes resoluciones, permitiendo capturar características a diferentes escalas (Liu et al., 2021).

### Architecture of the Swin Transformer

The Swin Transformer, which stands for "Shifted Window Transformer," addresses the limitations of ViTs by introducing two key concepts: sliding windows and pyramid structure.

The Swin Transformer, like other Vision Transformers (ViTs), starts by dividing an image into non-overlapping patches using a splitting module. Each patch is considered a "token" and its feature is set by concatenating the RGB values of the raw pixels. In the Swin Transformer implementation, a patch size of 4x4 is used, resulting in a feature dimension of 48 (4 × 4 × 3). These features are subsequently projected to an arbitrary dimension (denoted as *C*) by means of a linear embedding layer.

The term "Stage" refers to the different stages of image processing through the architecture. In the Swin Transformer, the image resolution is successively reduced, from "Stage 1" to "Stage 4". This hierarchical structure is similar to traditional convolutional neural networks such as VGG and ResNet, where features are processed at different resolutions.

### Sliding Windows

Instead of performing global attention over the entire image (which would have a quadratic complexity with respect to the number of tokens), the Swin Transformer introduces the concept of attention within non-overlapping local windows. This significantly reduces the computational complexity (Liu et al., 2021).

Imagen de la pantalla de una ventana

Descripción generada automáticamente con confianza media

**Figura 2.** The shifted window approach to computing self-attention in the proposed Swin Transformer architecture.

Equations (1) and (2) show the difference in complexity between global care and window-based care. Window-based attention is scalable and computationally more efficient (Liu et al., 2021).

(1)

(2)

However, in order not to lose the ability to model relationships between patches in different windows, the Swin Transformer introduces the idea of windows shifted in successive blocks. This strategy alternates between two partitioning configurations in consecutive blocks of transformers, allowing each patch to relate to patches in neighboring windows.

Equations (3) show how features are computed in successive blocks using different window-based attention configurations (Liu et al., 2021).

(3) Texto

Descripción generada automáticamente

In this context,  and  represent the resulting characteristics from the (S)W-MSA module and the MLP module corresponding to block . W-MSA and SW-MSA refer to window-based multi-head self-attention utilizing standard and shifted window partitioning setups, respectively.

Relative position bias is introduced to account for spatial relationships between patches within a window. This bias significantly improves model performance and is preferable to absolute position embeddings.

### Pyramid Structure

The Swin Transformer processes images in a series of resolutions, similar to a pyramid. It starts with small windows at a higher resolution and gradually clusters patches while reducing the resolution, allowing the model to capture features at different scales (Liu et al., 2021).

Gráfico, Diagrama

Descripción generada automáticamente

**Figure 3.** Comparison of the pyramidal structure method used by Swin tranformer and the method used by Vit.

### Architectural Details of Swin Transformer

**Tokenization and Embeddings:** Like other ViTs, the Swin Transformer starts by dividing the image into patches, which are then flattened and converted into embeddings through a linear layer (Liu et al., 2021).

**Attention within Windows:** The attention layer in Swin Transformer operates only within sliding windows, using standard attention mechanisms. After each attention layer, the windows are scrolled to ensure coverage of the entire image (Liu et al., 2021).

**Swin Transformer Block:** A Swin Transformer block is a fundamental unit in the architecture. It is where the shifted window-based attention occurs, which is essential for the efficiency and effectiveness of the model.

**MSA (Multi-Head Self-Attention):** a type of attention mechanism that allows the model to pay attention to different parts of the input simultaneously. It is essential to the transformer's ability to capture long-range relationships.

**Ω(MSA) and Ω(W-MSA):** These are notations to represent the computational complexity of global attention and window-based attention, respectively.

**GELU:** GELU, or Gaussian Error Linear Unit, is a nonlinear activation function. It is used in neural networks to introduce nonlinearities into the model. In the Swin Transformer block, the GELU is used as an activation function in the 2-layer multilayer perceptron (MLP).

**LN (LayerNorm):** LN, or Layer Normalization, is a normalization technique that is applied to features in a specific layer, rather than to a specific mini-batch. In Swin Transformer, LayerNorm is applied before each auto-tuned multi-head attention module (MSA) and each MLP. Normalization helps stabilize and accelerate training.

**MLP (Multi-Layer Perceptron):** Refers to a fully connected neural network. In the context of transformers, MLPs are used to transform features after layers of attention.

**Residual Connection:** In deep networks, residual connections help avoid the gradient fading problem by allowing activations to skip one or more layers. In the Swin Transformer, a residual connection is applied after each attention module and MLP.

**Resolution Reduction and Upscaling:** After processing the image at one resolution, the Swin Transformer reduces the resolution by grouping tokens and processing them in larger windows. This process is repeated several times, forming the pyramidal structure of the model (Liu et al., 2021).

**Patch Merging:** "Patch Merging" is a technique used in the Swin Transformer to reduce the spatial resolution of the feature map and simultaneously increase the feature dimension, allowing the model to capture more abstract representations as it goes deeper. It works by aggregating information from neighboring patches and creating a new patch with a higher feature dimension.

Diagrama, Esquemático

Descripción generada automáticamente

**Figure 4.** On the left is the architecture of a Swin transformer (Swin-T) and on the right are two successive blocks of the Swin transformer W-MSA and SW-MSA which are multihead self-attention modules with regular and offset window configurations, respectively.

### Advantages of the Swin Transformer

* **Computational Efficiency:** By avoiding global focus on the entire image, the Swin Transformer is significantly more efficient than traditional ViTs, especially for high-resolution images.
* **Modeling Capability:** The pyramidal structure allows the Swin Transformer to capture features at different scales, which can be crucial for tasks such as plant disease detection where patterns can vary in size.
* **Benchmarking:** Tests have shown that Swin Transformer performs very well and better on various data sets, outperforming other ViTs and CNN in several benchmarks.

## Dataset

## Dataset de plantVillage y plantDoc

Para entrenar modelos de detección de enfermedades del tomate, es esencial contar con un conjunto de datos de alta calidad. El dataset PlantVillage proporciona una variedad de clases de enfermedades del tomate y refleja la complejidad de la detección en el campo. La calidad de los datos etiquetados es fundamental para el éxito de la capacitación de modelos.

### Clases del dataset de plantVillage:

Tomato Yellow Leaf Curl Virus (YLCV)

Tomato Bacterial Spot (Bctsp)

Tomato Late Blight (TLB)

Tomato Septoria leaf spot (SptL)

Tomato Two Spotted Spider Mite (SpdM)

Tomato Target Spot (TISS)

Tomato Early Blight (TEB)

Tomato Leaf Mold (LMld)

Tomato Mosaic Virus (MscV)

Tomato healthy (Hlth)

## Aumento de datos

## **Métricas de Evaluación**

Parámetros que cuantifican la calidad de un modelo en tareas específicas. Se definen matemáticamente como:

* Verdaderos Positivos (TP): Casos positivos correctamente identificados.
* Verdaderos Negativos (TN): Casos negativos correctamente identificados.
* Falsos Positivos (FP): Casos negativos incorrectamente identificados como positivos.
* Falsos Negativos (FN): Casos positivos incorrectamente identificados como negativos.
* 
* 
* 
* 

## Matriz de Confusión

Es una tabla que presenta el rendimiento de un algoritmo de clasificación. Las filas y columnas representan las clases reales y las clases predichas, respectivamente.

## Interpretabilidad en Modelos de Visión Artificial

La interpretabilidad en modelos de visión artificial es crucial para evaluar la calidad de las decisiones del modelo en la clasificación de enfermedades de los tomates. Esta interpretabilidad permite comprender cómo se llega a cada decisión y puede guiar acciones correctivas.

# REFERENCIAS

Collins, E.J.; Bowyer, C.; Tsouza, A.; Chopra, M. Tomatoes: An Extensive Review of the Associated Health Impacts of Tomatoes and Factors That Can Affect Their Cultivation. Biology 2022, 11, 239.

Agarwal, Mohit, et al. “ToLeD: Tomato Leaf Disease Detection Using Convolution Neural Network.” *Procedia Computer Science*, vol. 167, no. 293–301, 2020, pp. 293–301, https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.03.225.

Abbas, A., Jain, S., Gour, M., & Vankudothu, S. (2021). Tomato plant disease detection using transfer learning with C-GAN synthetic images. Computers and Electronics in Agriculture, 187(106279). https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106279

Chen, H.-C., Widodo, A. M., Wisnujati, A., Rahaman, M., Lin, J. C.-W., Chen, L., & Weng, C.-E. (2022). AlexNet Convolutional Neural Network for Disease Detection and Classification of Tomato Leaf. Electronics, 11(6), 951. https://doi.org/10.3390/electronics11060951

Bhandari, M., Shahi, T. B., Neupane, A., & Walsh, K. B. (2023). BotanicX-AI: Identification of Tomato Leaf Diseases Using an Explanation-Driven Deep-Learning Model. Journal of Imaging, 9(2), 53. https://doi.org/10.3390/jimaging9020053

FAO. (2021). Crops and livestock products. Www.fao.org. https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL

Caruso, A. G., Bertacca, S., Parrella, G., Rizzo, R., Davino, S., & Panno, S. (2022). Tomato brown rugose fruit virus: A pathogen that is changing the tomato production worldwide. Annals of Applied Biology, 181(3), 258–274.

Panno, S., Davino, S., Caruso, A. G., Bertacca, S., Crnogorac, A., Mandić, A., Noris, E., & Matić, S. (2021). A Review of the Most Common and Economically Important Diseases That Undermine the Cultivation of Tomato Crop in the Mediterranean Basin. Agronomy, 11(11), 2188. https://doi.org/10.3390/agronomy11112188

Singh, V. K., Singh, A. K., & Kumar, A. (2017). Disease management of tomato through PGPB: current trends and future perspective. 3 Biotech, 7(4). https://doi.org/10.1007/s13205-017-0896-1

Zahangir Alom, Taha, T. M., Yakopcic, C. G., Westberg, S., Sidike, P., Nasrin, Mst Shamima, Esesn, V., Abdul, & Asari, V. K. (2018). The History Began from AlexNet: A Comprehensive Survey on Deep Learning Approaches. ArXiv E-Prints, 2. https://doi.org/10.48550/arxiv.1803.01164

Boulent, J., Foucher, S., Théau, J., & St-Charles, P.-L. (2019). Convolutional Neural Networks for the Automatic Identification of Plant Diseases. Frontiers in Plant Science, 10. https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00941

Li, E. Y. (2020, August 1). 10 Papers You Should Read to Understand Image Classification in the Deep Learning Era. Medium. https://towardsdatascience.com/10-papers-you-should-read-to-understand-image-classification-in-the-deep-learning-era-4b9d792f45a7

Rawat, V., Singh, N., Kaur, B., & Bora, S. (2022). Tomato Leaf Disease Classification Using Supervised Learning Techniques: Contrasting Analysis. 2022 International Conference on Advances in Computing, Communication and Materials (ICACCM), 1(2642-7354). https://doi.org/10.1109/icaccm56405.2022.10009617

Liu, Z., Lin, Y., Cao, Y., Hu, H., Wei, Y., Zhang, Z., Lin, S., & Guo, B. (2021). Swin Transformer: Hierarchical Vision Transformer using Shifted Windows. 2021 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV), 2. https://doi.org/10.1109/iccv48922.2021.00986

Z. Liu et al., "Swin Transformer: Hierarchical Vision Transformer using Shifted Windows," 2021 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV), Montreal, QC, Canada, 2021, pp. 9992-10002, doi: 10.1109/ICCV48922.2021.00986.

Boulent, J., Foucher, S., Théau, J., & St-Charles, P. L. (2019). Convolutional neural networks for the automatic identification of plant diseases. Frontiers in plant science, 10, 941.

Gadade, H. D., & Kirange, D. D. (2020). Machine learning approach towards tomato leaf disease classification. International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering, 9(1), 490-495.

Abbas, A., Jain, S., Gour, M., & Vankudothu, S. (2021). Tomato plant disease detection using transfer learning with C-GAN synthetic images. Computers and Electronics in Agriculture, 187, 106279.

Uppada, R., & Kumar, D. R. (2023). Computer-aided fusion-based neural network in application to categorize tomato plants.Springer-Verlag London Ltd., part of Springer Nature 2023, 1-9.

Dosovitskiy, A., Beyer, L., Kolesnikov, A., Weissenborn, D., Zhai, X., Unterthiner, T., ... & Houlsby, N. (2020). An image is worth 16x16 words: Transformers for image recognition at scale.

Touvron, H., Cord, M., Douze, M., Massa, F., Sablayrolles, A., & Jégou, H. (2021, July). Training data-efficient image transformers & distillation through attention. In International conference on machine learning (pp. 10347-10357). PMLR.

Flores, C. (2012). Enfermedades de tomate: Guía de consulta (S. Buono & S. Giorgioni, Eds.; 1st ed.). Ediciones Instituto Nacional De Tecnología Agropecuaria De Argentina INTA.

Bernal, R. (2010). Enfermedades de tomate (lycopersicum esculentum mill.) en invernadero en las zonas de salto y bella unión. Serie Técnica. INIA. Montevideo, Editorial Hemisferio Sur SRL, 181, 1–71.

Thangaraj, R., Anandamurugan, S., Pandiyan, P., & Kaliappan, Vishnu Kumar. (2022). Artificial intelligence in tomato leaf disease detection: a comprehensive review and discussion. *Journal of Plant Diseases and Protection*, *129*, 3.

Garcia, J. (2016). A review on the main challenges in automatic plant disease identification based on visible range images. Biosystems Engineering, 144, 52–60.

Valdivieso. (2021). Estudio comparativo de las técnicas de inteligencia artificial para el diagnóstico de enfermedades en la agricultura.

Blancard, D. (2011). Enfermedades del tomate. Mundi-Prensa Libros.

Verma, S., Chug, A., & Singh, A. P. (2018). Prediction models for identification and diagnosis of tomato plant diseases. IEEE, 1557–1563.

Corrales Paredes, J. (2021). *Uso de depredadores, parasitoides y entomopatógenos para el control biológico de plagas y enfermedades de hortalizas con énfasis en tomate (Solanum lycopersicum l.)* (p. 105) [MSc Thesis].

Gómez-Camperos, J., Jaramillo, H., & Guerrero-Gómez, G. (2022). Técnicas de procesamiento digital de imágenes para detección de plagas y enfermedades en cultivos: una revisión. Ingeniería Y Competitividad, 24, 1.

Guennouni, M., Admou, B., Bourrhouat, A., El Khoudri, Noureddine, Zkhiri, W., Talha, I., Hazime, R., & Hilali, A. (2022). Knowledge and practices of food safety among health care professionals and handlers working in the kitchen of a moroccan university hospital. Journal of Food Protection, 85, 4.

Uçar, A., Yilmaz, M. V., & Çakiroglu, Funda Pinar. (2016). Food safety–problems and solutions. Significance, Prevention and Control of Food Related Diseases, 3.

Nanehkaran, Y., Zhang, D., Chen, J., Tian, Y., & Al-Nabhan, N. (2020). Recognition of plant leaf diseases based on computer vision. In Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing (pp. 1–18). Springer.

Khan, R., Kumar, S., Dhingra, N., & Bhati, N. (2021). The use of different image recognition techniques in food safety: a study. Journal of Food Quality, 2021, 1–10.

Mahadevkar, S. V., Khemani, B., Patil, S., Kotecha, K., Vora, D. R., Abraham, A., & Gabralla, L. A. (2022). A Review on Machine Learning Styles in Computer Vision—Techniques and Future Directions. IEEE Access, 10, 107293–107329. https://doi.org/10.1109/access.2022.3209825

Sood, S., & Singh, H. (2021). Computer vision and machine learning based approaches for food security: A review. Multimedia Tools and Applications, 80, 18.

Jamil, S., Md. Jalil Piran, & Kwon, O.-J. (2023). A Comprehensive Survey of Transformers for Computer Vision. Drones, 7(5), 287–287. https://doi.org/10.3390/drones7050287

Shorten, C., & Khoshgoftaar, T. M. (2019). A survey on Image Data Augmentation for Deep Learning. Journal of Big Data, 6(1). https://doi.org/10.1186/s40537-019-0197-0

Xiao, Z., Wang, J., Han, L., Guo, S., & Cui, Q. (2022). Application of machine vision system in food detection. *Frontiers in Nutrition*, *9*, 888245.

Papers With Code. (2023). *Papers with Code - ImageNet Benchmark (Image Classification)*. Paperswithcode.com. https://paperswithcode.com/sota/image-classification-on-imagenet. (Accessed on September 2023).

Xu, S., Wang, J., Shou, W., Ngo, T., Sadick, A.-M., & Wang, X. (2021). Computer vision techniques in construction: a critical review. *Archives of Computational Methods in Engineering*, *28*, 3383–3397.

Ouhami, M., Hafiane, A., Es-Saady, Y., El Hajji, Mohamed, & Canals, R. (2021). Computer vision, IoT and data fusion for crop disease detection using machine learning: A survey and ongoing research. *Remote Sensing*, *13*, 13.

Szeliski, R. (2020). *Computer Vision: Algorithms and applications.* (2nd ed.). Springer Nature.

Vocaturo, E. (2021). Image classification techniques. In *Handbook of Research on Disease Prediction through Data Analytics and Machine Learning* (pp. 22–49). IGI Global.

Sanghvi, K., Aralkar, A., Sanghvi, S., & Saha, I. (2020). A survey on image classification techniques. In *Available at SSRN 3754116*.

Shah, U., & Harpale, A. (2018). A review of deep learning models for computer vision. In *2018 IEEE Punecon* (pp. 1–6). IEEE.

Amjoud, A. B., & Amrouch, M. (2023). Object detection using deep learning, CNN and vision transformers: A review. *IEEE Access*, *11*(35479-35516).