

Estimación de ploidía en fresa (*Fragaria* spp.) por morfología usando Inteligencia Artificial

Estimation of ploidy in strawberry (*Fragaria* spp.) by morphology using Artificial Intelligence

Viviana Belem Patiño Aguilar¹, Adrian Jauregui Ramirez², Christian Leonardo Gomez Licea³, Angel Abraham Sanchez Torres⁴, Juan Manuel Mendez Mejia⁵, Martha Julissa Diosdado Montenegro⁶, Jonathan Cepeda-Negrete^{7*}

^{1,4,5,6,7}Departamento de Ingeniería Agrícola, División de Ciencias de la Vida, Campus Irapuato Salamanca
vb.aguilarpatio@ugto.mx, aa.sancheztorres@ugto.mx, jm.mendezmejia@ugto.mx, mj.diosdadomontenegro@ugto.mx, j.cepeda@ugto.mx* (autor de correspondencia)

^{2,3}Departamento de Biología, División de Ciencias Naturales y Exactas, Campus Guanajuato
a.jauregui.ramirez@ugto.mx, cl.gomezlicea@ugto.mx

Resumen

La estimación precisa de los niveles de ploidía en las fresas (*Fragaria* spp.) es crucial para los programas de mejoramiento enfocados en mejorar el rendimiento, la resistencia a enfermedades y la calidad del fruto. Los métodos tradicionales para determinar la ploidía, como la citometría de flujo y el conteo de cromosomas, son laboriosos y requieren conocimientos y recursos significativos. En este estudio, realizado en la División de Ciencias de la Vida (DICIVA), Universidad de Guanajuato, exploramos el uso de inteligencia artificial (IA) para estimar los niveles de ploidía en fresas mediante el análisis de parámetros morfológicos de estomas y granos de polen, utilizando algoritmos de aprendizaje automático para extraer características relevantes, como el tamaño de los estomas, su densidad y las dimensiones de los granos de polen.

*Accurate estimation of ploidy levels in strawberries (*Fragaria* spp.) is crucial for breeding programs focused on improving yield, disease resistance, and fruit quality. Traditional methods for determining ploidy, such as flow cytometry and chromosome counting, are laborious and require significant knowledge and resources. In this study, carried out at the Division of Life Sciences (DICIVA), University of Guanajuato, we explore the use of artificial intelligence (AI) to estimate ploidy levels in strawberries by analyzing morphological parameters of stomata and pollen grains. Using machine learning algorithms to extract relevant features, such as stomatal size, density, and pollen grain dimensions.*

Palabras clave: ploidía, fresa, inteligencia artificial

Introducción

La fresa o frutilla, es una planta perteneciente al género *Fragaria* y de la familia Roseace. Su ciclo de vida es perenne, es de sistema radicular fibroso y tiene un tallo central, del cual emergen peciolos con hojas trifoliadas y nuevos tallos de las yemas axilares. Al alcanzar el primer año de vida, puede comenzar su ciclo de floración, el cual se distingue por ser una inflorescencia de composición floral completa, que, al ser polinizada, producirá un receptáculo con múltiples arquenos, a los que llamaremos coloquialmente Fresa (Daniel S. S/F). Se reconoce que el cultivo de fresa (*Fragaria* spp.) representa una actividad agronómica fuerte para México, con un 14.83% de las exportaciones mundiales, ubicándose como el tercer proveedor de fresa fresca al mercado internacional (SAGARPA, 2017). A su vez, a nivel nacional, los principales estados productores de fresa son Michoacán (65.9%), Baja California (18.9%) y Guanajuato (12.1%), los cuales producen las variedades *Fragaria vesca*, *chiloensis* y *Fragaria x ananassa* (SADR, 2022).

La complejidad genética del género *Fragaria* hace que su entendimiento e investigación sean arduos y rigurosos. El género *Fragaria* comprende aproximadamente 21 especies, ha mostrado una notable diversidad en sus niveles de ploidía, abarcando desde formas diploides hasta decaploides (Aguilar Tlatelpa et al., 2019)(Folta and Davis, 2006).

La ploidía es un termino que refiere a la cantidad total de cromosomas de un organismo y comúnmente se determina el nivel de ploidía, siendo en *fragaria* de 2n, 4n, 6n y hasta 8n según la cepa (Folta et al, 2009). La ploidía tradicionalmente se estima utilizando citometría de flujo, la cual analiza la cantidad total de ácidos nucleicos en el núcleo celular a partir

de teñir con fluoróforos los ácidos nucleicos (adenina-timina) con DAPI (4',6-diamidino-2-fenilindol) (Gutierrez y Ferrero, 2005). La ploidía se mide con la cantidad de copias totales de cromosomas, siendo mayor que $2n$ poliploides. La poliploidía es un suceso natural en plantas, es una estrategia evolutiva en la cual los descendientes a través de errores en la meiosis, dan lugar a mutaciones en el número de cromosomas lo cual altera las cantidades de genes alélicos heredados. Este incremento (poliploidía) o deleción (haploidía) de cromosomas, contribuyen a la aparición de caracteres particulares. Sin embargo, los efectos de este tratamiento son diversos e impredecibles (Gutierrez y Ferrero, 2005). Dicha ploidía hace necesario el uso de diversos métodos y técnicas para generar un correcto mejoramiento genético. La poliploidía puede ser inducida de manera artificial, utilizando colchicina por su efecto antimitótico, causante de la despolimerización del huso mitótico durante el ciclo celular, dando lugar a poliploidías o aneuploidías (Osorio et al, 2022). El mejoramiento genético actual busca comprender la variación de la ploidía y como esta altera los cambios a nivel genotípico como niveles de expresión genética o regulación epigenética, y fenotípico como variaciones en tamaño de hoja, polen, estomas y flores (Chambers et al, 2013). Esto permitiría sin duda alguna elaborar esquemas de reproducción para generar plántulas poliploides estudiadas con nuevos perfiles aromáticos, de sabor o que produzcan resistencia a plagas.

Esta diversidad natural es de gran interés, no solo para la ecología y evolución de la fresa, sino también en relación con la configuración genómica de la fresa cultivada octoploide (*F. × ananassa*). Los cambios en la ploidía pueden deberse a la producción de gametos no reducidos o a procesos de duplicación somática, como la regeneración de tejido cultivado a partir de tejido calloso, especialmente bajo la influencia de hormonas o mutágenos (Bringhurst and Gill, 1970; Zhang et al., 2014). La diversidad de niveles de ploidía en la fresa tiene importantes implicaciones para su mejoramiento genético. Tradicionalmente, los esfuerzos se han centrado en aspectos comerciales como la capacidad de envío, el rendimiento poscosecha, la resistencia a enfermedades y el tamaño del fruto, a menudo priorizando estos atributos a expensas del sabor. Sin embargo, los genotipos de baja ploidía suelen poseer características deseables como sabores y aromas superiores, pero carecen de otros atributos comerciales clave, como el tamaño y la firmeza del fruto, lo que genera una barrera genética para su integración directa en el germoplasma comercial. Afortunadamente, los recientes avances en la genómica y la bioingeniería ofrecen nuevas oportunidades para superar esta limitación. Ya varias investigaciones han mostrado interés en desarrollar octoploides sintéticos que sean fértiles con los materiales comerciales (Evans, 1977; Evans, 1982). La producción de poliploides sintéticos a partir de poliploides menos complejos con características deseables podría proporcionar una forma de incorporar genes beneficiosos en la fresa comercial, beneficiando así a toda la cadena de suministro, desde los agricultores hasta los consumidores (Preeda et al., 2007; Nathewet et al., 2009).

Dado este panorama se ha puesto en marcha una serie de iniciativas de mejoramiento y entendimiento agronómico en el genero *Fragaria*, para elevar la producción en Guanajuato. En 2014, un artículo publicado en la Revista mexicana de ciencias agrícolas propone cuatro consideraciones para mejorar la competitividad de la producción de fresa en el Bajío (León-López, 2014). Estas estrategias para la recuperación del estado de Guanajuato en la producción de fresa, sugieren: Promover la organización entre productores para adoptar sistemas de producción más rentables, lograr la independencia en la adquisición de plantas “madre”, apoyándose en instituciones nacionales de investigación para generar variedades propias, fortalecer la comercialización de la fresa, estimulando la creación de empresas que añadan valor al producto y fomentar un esfuerzo conjunto entre productores, autoridades, empresas y la ciudadanía para consolidar y fortalecer la cadena de producción de fresa y revitalizar su estatus como ícono de Irapuato, Guanajuato.

Aunque el recuento de cromosomas es el método más exacto para determinar la ploidía, las técnicas tradicionales pueden ser tediosas y exigir conocimientos especializados. El análisis morfológico y la caracterización de los hábitos reproductivos han sido tradicionalmente los enfoques primarios para estimar el nivel de ploidía en *Fragaria* (Whitaker et al., 2020). Sin embargo, estos métodos podrían ser subjetivos y requerir un análisis experto. Recientemente, los avances en las técnicas de aprendizaje automático y visión artificial han demostrado ser eficaces para la clasificación de ploidía a partir de datos visuales y morfológicos de una manera más objetiva y escalable, aunque se ha aplicado en otros productor agrícolas (Whitaker et al., 2020).

En este trabajo, se propone un enfoque moderno y de bajo costo para la estimación de la ploidía en fresa utilizando técnicas de procesamiento de imágenes e inteligencia artificial. Para ello, es necesario recopilar un conjunto de datos de imágenes de granos de polen y estomas de plantas de fresa con diferentes niveles de ploidía. Adicionalmente se desarrollará un algoritmo de procesamiento de imágenes para extraer características morfológicas relevantes de los granos de polen y estomas. En un trabajo futuro, estos rasgos morfológicos se utilizarán para entrenar un modelo de aprendizaje automático mediante una app que permita estimar con precisión el nivel de ploidía de una muestra de fresa dada. Finalmente, el desempeño del modelo desarrollado se validará en comparación con los métodos tradicionales de determinación de ploidía, como el recuento de cromosomas y la citometría de flujo.

Materiales y métodos

En esta fase se llevó a cabo una amplia investigación de antecedentes previos de métodos como la citometría de flujo y conteo de cromosomas, para conocer su efectividad y complicaciones, tanto en fresa como en otras especies. Posteriormente se desarrollaron ambos procedimientos en el Laboratorio de Genética Vegetal que se encuentra en las instalaciones de DICIVA, siguiendo protocolos anteriormente evaluados; con el objetivo de poder determinar ventajas y desventajas, y así mismo tener resultados para posteriormente compararlos con el modelo IA a entrenar.

Citometría de flujo

La citometría de flujo es una técnica avanzada que mide la cantidad de ADN en las células vegetales. En este proceso, las células se tiñen con un fluorocromo que se une específicamente al ADN. Luego, estas células teñidas se pasan a través de un láser en un citómetro de flujo, donde la fluorescencia emitida se cuantifica. Este método permite una rápida y precisa estimación del contenido de ADN y, por ende, del nivel de ploidía de la muestra. Sin embargo, la citometría de flujo requiere equipos costosos y personal capacitado, lo que puede limitar su accesibilidad y uso en algunos laboratorios.

El conteo de cromosomas, por otro lado, es un método más directo pero también más laborioso. Consiste en la observación y conteo de los cromosomas en las células en división, generalmente en la fase de metafase de la mitosis. Este proceso implica la preparación de las muestras, el uso de tinciones específicas y la observación bajo un microscopio óptico de alta resolución. Aunque este método proporciona información detallada y precisa, es extremadamente laborioso y requiere una gran cantidad de tiempo y habilidad técnica.

En contraste con estos métodos tradicionales, el análisis fotográfico mediante microscopía ofrece una alternativa prometedora para la estimación de ploidía basada en parámetros morfológicos. Este enfoque se centra en el análisis de imágenes de alta resolución de estomas y granos de polen, obtenidas de diferentes variedades de fresa. Los estomas, que son pequeños poros en la superficie de las hojas, y los granos de polen, presentan características morfológicas que pueden correlacionarse con el nivel de ploidía.

La obtención de estomas se realiza en el área foliar, colocando esmalte transparente en el envés de la hoja, unos minutos después y sin dejar secar por completo, se coloca cinta opaca, la cual se retira cuidadosamente y se fija en un portaobjetos, posteriormente se es observado bajo el microscopio. Por otro lado, los granos de polen son obtenidos de las anteras, colocando el polen recolectado bajo el microscopio y seleccionando cuidadosamente aquellos granos completos que se observen.

Generación de una base de datos de imágenes

Esta fase de recopilación de datos a partir de imágenes no hubiera sido posible sin ayuda de la empresa BGI (Berrie Gene Innovation) quien proporcionó muestras representativas de planta de fresa con diferentes niveles de ploidía y variabilidad genética. Estas muestras fueron cuidadosamente etiquetadas y documentadas para garantizar la trazabilidad y la precisión en el análisis que se realizará posteriormente. Esta metodología se realizó en tres fases.

La primer fase consistió en la selección y obtención de muestras de diversas variedades de plantas de fresa, seleccionadas específicamente por su variabilidad en los niveles de ploidía y su importancia en la industria. Las variedades y sus respectivos niveles de ploidía pueden apreciarse en la Tabla 1.

Tabla 1. Variedades de plantas de fresa y sus niveles de ploidía usados en el proyecto.

| Especie | Variedad | Nivel de ploidía | Ejemplo visual |
|----------------------|-----------------|------------------|--|
| <i>F. vesca</i> | Fresa silvestre | 2n |  |
| <i>F. chiloensis</i> | PBI | 2n |  |
| <i>F. chiloensis</i> | Ivory | 4n |  |
| <i>F. x ananassa</i> | Camino real | 8n |  |
| <i>F. x ananassa</i> | Frida | 8n |  |

Para la preparación de las muestras de observación de estomas, se aplica un barniz transparente en el envés de las hojas de fresa. Una vez seco, se coloca una cinta opaca sobre el barniz, que se retira junto con la película de estomas. Posteriormente, esta cinta se transfiere a un portaobjetos para su examen microscópico. Este proceso se puede ver ilustrado en la Figura 1.



Figura 1. Proceso para la preparación de las muestras y observación de estomas en hojas de plantas de fresa.

Mediante el uso de microscopía, se pueden capturar imágenes detalladas de los estomas y los granos de polen. La densidad de los estomas, por ejemplo, tiende a variar con el nivel de ploidía, con poliploides típicamente presentando estomas más grandes y menos densos. Del mismo modo, el tamaño de los granos de polen puede proporcionar indicaciones sobre la ploidía, con granos de polen más grandes generalmente asociados a niveles más altos de ploidía.

La segunda fase consistió en la captura extensiva de imágenes de distintos parámetros de fresa, bajo el Microscopio VE-BC3PLUS que se encuentran en el Invernadero de Genética. Los granos de polen y estomas se capturan a una amplificación óptica de 100x. Al final, las imágenes se capturarán utilizando la cámara de un teléfono móvil Xiaomi Redmi Note 12 Pro de 108 MP, garantizando una resolución adecuada para el análisis de característica posteriormente. La iluminación se controla con el microscopio, utilizando el nivel máximo disponible (nivel 7). Y se toman aproximadamente 10 imágenes de cada muestra para tener un total aproximado de 1000 imágenes, 200 de cada variedad y de las diferentes partes de la planta de fresa.

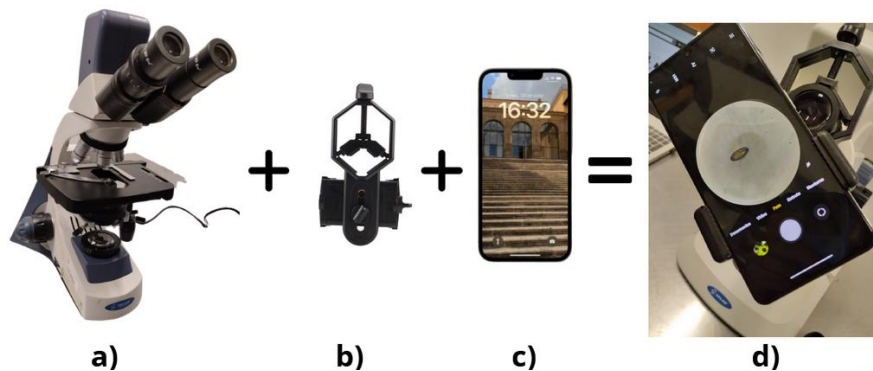


Figura 2. Armado completo del sistema de captura de imágenes. a) Microscopio VE-BC3PLUS, b) Adaptador para smartphone y microscopio, c) Smartphone Xiaomi Redmi Note 12 Pro, y d) Sistema completo final.

La configuración final para la captura de imágenes se muestra en la Figura 2. En esta figura se describe el montaje del teléfono móvil necesario para adquirir imágenes digitales. El proceso requiere un adaptador instalado en el ocular de un microscopio óptico convencional. Una vez montado el adaptador, se coloca el teléfono móvil seleccionado en el adaptador para completar el sistema de captura. Los ajustes de posición se realizan moviendo los tornillos correspondientes del adaptador para abarcar la mayor área posible del campo de visión. Para enfocar adecuadamente las imágenes del polen y los estomas, se utilizan los controles macrométricos y micrométricos del microscopio. Sin embargo, dado que el adaptador se ajusta manualmente al microscopio, este sistema tiene la limitación de no tener una ubicación fija, lo que puede resultar en pequeñas variaciones.

Procesamiento de imágenes digitales

La tercera fase consistió en la segmentación de los objetos de interés para su posterior análisis de características. Para ello se procedió a realizar las siguientes etapas de procesamiento digital de imágenes.

1. Conversión a Escala de Grises

Las imágenes originales capturadas se transforman a escala de grises para simplificar su procesamiento y análisis. Este paso reduce la complejidad de la imagen al eliminar la información de color, reteniendo únicamente la intensidad de luz.

2. Binarización Usando el Método de Otsu

La imagen en escala de grises se binariza utilizando el método de Otsu. Este método selecciona automáticamente un umbral de intensidad óptimo para separar los objetos de interés (granos de polen, estomas, hojas o flores) del fondo.

3. Negativo de la Imagen

Por la naturaleza de la imagen de entrada, el proceso de binarización suele dejar como el potencial objeto de interés de color negro y el fondo blanco. Esto es debido a que se usa un tono más claro como fondo con respecto a los granos del polen, hojas o demás partes de interés. Para destacar cualquier objeto de interés en este caso, se invierte la imagen binarizada. Este paso convierte los píxeles blancos en negros y viceversa.

4. Eliminación de Objetos Pequeños

Para eliminar los objetos pequeños y ruidos que no son de interés, se aplican operaciones morfológicas de dilatación y erosión. Estas operaciones ayudan a limpiar la imagen y resaltar los objetos de interés.

Este procesamiento se aplica tanto a las imágenes de granos de polen, estomas, hojas y flores de las plantas de fresa, permitiendo extraer características morfológicas relevantes para la estimación del nivel de ploidía. Las imágenes procesadas resaltan los elementos de interés, facilitando su análisis y comparación. Un resultado final como ejemplo para un posible objeto de interés se puede verificar en la Figura 3.

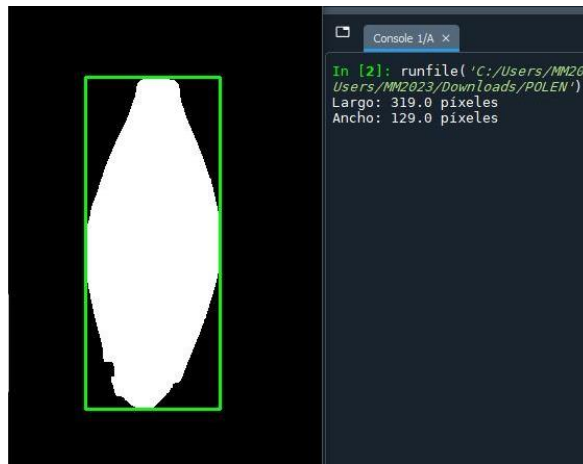


Figura 3. Ejemplo de imagen esperada al efectuar los procesamientos de aislamiento del objeto a analizar.

El análisis fotográfico de estos parámetros, cuando se combina con técnicas de inteligencia artificial y aprendizaje automático, permite el desarrollo de modelos predictivos precisos. Estos modelos pueden ser entrenados con datos de ploidía conocidos para predecir la ploidía de nuevas muestras de manera rápida y eficiente, ofreciendo una alternativa accesible y menos costosa a los métodos tradicionales

Resultados y discusión

El tamaño de un grano de polen se ha venido relacionando como indicador de nivel de ploidía en las plantas y la fresa (*Fragaria* spp.) no ha sido una excepción. Tomando como referencia otros estudios e investigaciones las diferencias en la morfología del polen entre las especies de *Fragaria* y otros cultivares de su género aparentemente se corresponden con los niveles de ploidía de las especies. Tomando fotografías y utilizando un microscopio óptico común las mediciones cuantitativas del diámetro de los granos de polen mediante análisis de imágenes mostraron que existe una gran variación dentro y entre los diferentes cultivares de fresa estudiados. Generalmente, los granos de polen de *Fragaria x ananassa* son esféricos, de contorno elipsoidal a triangular cuando están secos, pero absorben muy fácilmente humedad y se expanden, volviéndose achatados y de contorno angular.

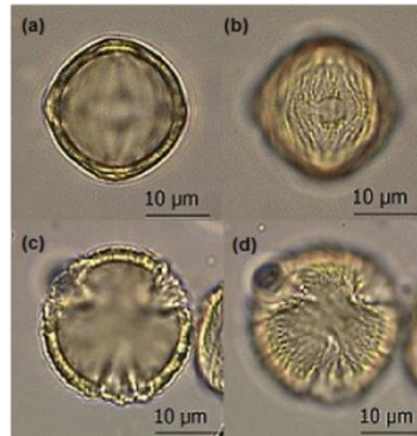


Figura 4. Grano de polen de *Fragaria Anamassa*.

Hasta hace poco el género *Fragaria* no había sido lo suficientemente estudiado para describir adecuadamente sus especies estudios previos sobre la morfología del polen de *Fragaria* ilustraron que el diámetro del grano de polen en fresa está estrechamente relacionado con la ploidía con una mayor variación en el tamaño del polen entre clones pentaploides que entre clones diploides y tetraploides. Es decir, si una planta tiene cinco juegos completos de cromosomas (pentaploides) el tamaño del polen será mucho más variado que si solo son dos o cuatro.

La poliploidía es un fenómeno biológico ampliamente estudiado por su impacto en el fitomejoramiento, particularmente en relación con la fotosíntesis y otras funciones celulares cruciales como en los estomas.

El potencial de la poliploidización para mejorar la eficiencia fotosintética y, por lo tanto, el rendimiento de las plantas, este conocimiento no solo amplía nuestra comprensión de los mecanismos fisiológicos detrás de la poliploidización en plantas, sino que también destaca su relevancia para el desarrollo de variedades mejoradas en la agricultura.

En un artículo se observó un tejido epidérmico y esponjoso más desarrollado, acompañado de una ultraestructura de cloroplastos notablemente alterada. Los cloroplastos de los tetraploides mostraron laminillas de tilacoides más gruesas y una disposición más regular, junto con un incremento en los contenidos de clorofila y carotenoides. Estos cambios indican una adaptación para una mayor captación y uso de luz solar que va relacionado con los estomas ya que son los encargados de realizar la fotosíntesis.

Las microfotografías analizadas pertenecen a gránulos de polen *Fragaria albion* (8n) y estomas de *Fragaria WT* (2n), *frida* (8n) y Camino real (8n). Es posible observar que tanto en la Figura 5 en (a) como en (b), correspondientes a la variedad *albion* octaploide, existen similitudes entre los gránulos de polen en color y simetría, lo que podría ser una característica interesante a analizar para distinguir la ploidía en diversas variedades de fresa. Comparando estomas de plantas con diferentes niveles de ploidía como *fragaria camino real* y *fragaria WT*, Figura 5 (d) y (e), se observa una diferencia morfológica siendo esta una menor densidad estomática y estomas más cortos conforme aumenta el nivel de ploidía. Al comparar las microfotografías de los estomas de *fragaria frida* y *fragaria camino real*, ambos octaploides, Figura 5 (c) y (e), podemos observar medidas similares en los tamaños de los estomas, aunque hay que mencionar que la microfotografía de *fragaria camino real* fue tomada con los estomas cerrados, lo cual puede afectar a priori la comparación entre las características morfológicas de distintas plantas con diferentes o el mismo nivel de ploidía.

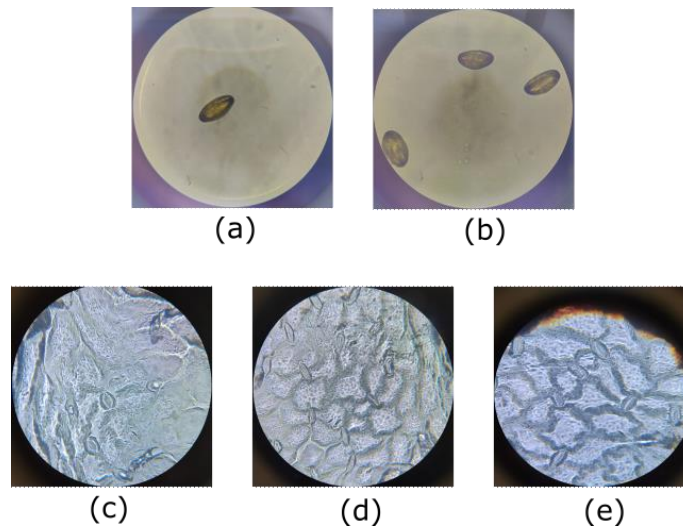


Figura 5. Fotogramas de ejemplo analizados. (a) 1 gránulo de polen *Fragaria albion* (8n). (b) 3 gránulos de polen *Fragaria albion* (8n). (c) Estomas *Fragaria frida* (8n). (d) Estomas *Fragaria Wild type* (2n). (e) *Fragaria Camino real* (8n).

Es posible reconocer al aparato estomático como el encargado de regular las cantidades de agua en la planta y de controlar el intercambio gaseoso. El aparato estomático está constituido por células guarda, células accesorias y el estoma. El estoma es la célula encargada de formar un poro estomático a través de la hoja; a través del poro estomático se crea un conducto de intercambio gaseoso donde se libera H₂O gaseoso y entra CO₂ (Torres et al, 2018)(Calixto, 2004). Los estomas están dispuestos a lo largo del envés de la hoja y la cantidad de estomas puede variar entre 15 y 5000 por mm². El número de estomas así como la distribución de estos y ciertas características morfológicas pueden variar por factores ambientales como la disponibilidad de luz en la hoja, condiciones de crecimiento e incluso dentro de una misma especie, puede existir una fuerte influencia genética que determina variación entre diferentes cultivos o ecotipos (Torres et al, 2018). Las variaciones morfológicas relacionadas con diferentes niveles de ploidía pueden explicarse como eventos de evolución cromosómica, Ramírez-Godina et al., (2013) determinó que en plantas *Physalis ixocarpa*; presentaron tetraploides con estomas más grandes que en plantas diploides, determinando que la densidad estomática está directamente relacionada con el nivel de ploidía (Caiza et al, 2018)(Kamneva et al, 2017).

Por otra parte, se dice que el tamaño del polen está influenciado por factores genéticos y ambientales. Al ser una de las estructuras anatómicas responsables de la reproducción en las plantas, esta sufre durante la embriogénesis, una gran cantidad de cambios a nivel celular, molecular y genético, lo que supondrá que, en caso de fallos o cambios dentro de estos, habrá diferencias sustanciales dentro del nuevo organismo hijo, pudiendo ser uno de estos la alteración en el nivel de ploidía (Jacob y Pierret, 1998). Los gránulos de polen tiene características morfológicas muy similares según la variedad de *Fragaria* que se analiza. Al observar gránulos de polen de *Fragaria albion* es posible identificar con claridad que comparten similitud en tamaño y forma. El análisis de ANOVA de una vía realizado por Ramírez-Godina et al., (2013); demuestra que el diámetro de los gránulos de polen podría servir para determinar los niveles de ploidía, pues al comparar distintas variedades de fresa con los mismos niveles de ploidía (2n, 4n, 6n y 8n), estas tienden a mantener medias similares en diámetro: Sin embargo, este suceso no es del todo repetible, pues también se analizan medias de otras variedades con la misma ploidía, pero con rangos de tamaño distintos.

Suele ser de importancia mencionar que la ploidía en el género *Fragaria*, está íntimamente ligada a los hábitos reproductivos, a la forma de reproducción de cada variedad, la biogeografía y al patrón de ocurrencia de alopoliploidía (hibridación de 2 especies separadas) o autopoliploidía (duplicación del genoma dentro de la especie). El análisis filogenético de Kamneva et al., (2017) a más de 30 variedades de *Fragaria* hace posible entender que la aparición de la poliploidía en *Fragaria* tiene una historia evolutiva inicial en la etapa cretácico-paleogeno, en la que la exposición al estrés causado por el cambio drástico en el clima, incentivo la aparición de nuevas características capaces de resistir dichos cambios. Aunado a esto, también es importante recalcar como algunos clados (*Ej. vesca*) se propagaron en distintas regiones del mundo, lo que incentivo a una mayor variedad por diversos procesos de hibridación. De este modo la presencia de variación en la poliploidía en variedades de fresa que se cultivan al día de hoy en Guanajuato (*Ej. camino real, frida, albion*) podría estar relacionada con sus ancestros y el tipo de ploidía que tuvieron en su momento, y a su vez, la aparición de dichos rasgos ancestrales dentro de las variedades que hoy se cultivan. Entonces, al ser la poliploidía un

mecanismo evolutivo en plantas silvestres que se genera mediante la duplicación total del genoma, este contribuye a la obtención de rasgos inmediatos en su descendencia. Estos rasgos varían en función fisiológica, expresión génica y morfológica como mayor tamaño celular; estos rasgos son de vital importancia para hacer frente a condiciones ecológicas, sin embargo cabe recalcar que la poliploidía no siempre garantiza que la obtención de estos rasgos sean relevantes para una mejor competitividad. Esta poliploidía se puede enmarcar como microevolución, sin embargo la redundancia genética puede permitir que a largo plazo la obtención de estas características diferencie a los organismos (Ramírez-Godina et al, 2013). La inducción de poliploides artificialmente con agentes mitóticos han registrado pérdida de viabilidad en los granos de polen a su vez que el tamaño de estos mismos se incrementa. Esta es una muestra de que los cambios inmediatos, a costa de la autopoloidia pueden ser decisivos para establecer un organismo, mientras que a su vez puede tener efectos negativos a alguna condición necesaria para el organismo (Ramírez-Godina et al, 2013)(Parisod, 2010).

Conclusión

La aplicación de inteligencia artificial para la estimación de ploidía en fresas a través del análisis de imágenes de estomas y polen representa un avance significativo en la genética y el mejoramiento de este cultivo. Al entrenar modelos de IA con fotografías de polen y estomas de diversas variedades de fresa, es posible automatizar y agilizar la determinación de los niveles de ploidía. Este enfoque no solo facilita procedimientos costosos como la citometría de flujo, sino que también reemplaza métodos laboriosos y prolongados como el conteo de cromosomas.

La implementación de esta tecnología permitirá a los investigadores y mejoradores de plantas optimizar recursos, reducir tiempos de análisis y acelerar el desarrollo de nuevas variedades de fresas con mejores características agronómicas y de calidad. En última instancia, la integración de IA en estos procesos representa un paso adelante hacia la modernización y eficiencia de los programas de mejoramiento genético en fresas.

Referencias

- M.I., Ibrahim. (1999) "Pollen Morphology of some Cultivated Varieties of Strawberry." <https://qspace.qu.edu.qa/bitstream/handle/10576/9790/Pollen%20morphology%20of%20some%20cultivated%20varieties%20of%20strawberry.pdf?sequence=10&isAllowed=y>.
- Gao, S., Yan, Q., Chen, L., Song, Y., Li, J., Fu, C., & Dong, M. (2017). Effects of ploidy level and haplotype on variation of photosynthetic traits: Novel evidence from two *Fragaria* species. *PLoS One*, 12(6), e0179899.
- Cao, Q., Zhang, X., Gao, X., Wang, L., & Jia, G. (2018). Effects of ploidy level on the cellular, photochemical and photosynthetic characteristics in *Lilium* FO hybrids. *Plant Physiology And Biochemistry*, 133, 50-56.
- Cires, E., & Cuesta, y. C. (n.d.). *Una herramienta eficaz en el estudio de la Botánica: la citometría de flujo*. Core.ac.uk. Retrieved February 21, 2024
- Daniel. S. (S/F). *Cultivo de fresa: Características botánicas, fisiología y tipos de variedades de fresa*. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). Argentina.
- SAGARPA. (2017). Planeación agrícola nacional 2017-2030. Café mexicano.
- SADR (2022). <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/que-quiere-la-nina-fresa-mexico-y-su-produccion-nacional>
- León López, L., Guzmán-Ortíz, D. L. A., García Berumen, J. A., Chávez Marmolejo, C. G., & Peña-Cabiales, J. J. (2014). Consideraciones para mejorar la competitividad de la región " El Bajío" en la producción nacional de fresa. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 5(4), 673-686

- Folta, K. M., & Gardiner, S. E. (Eds.). (2009). Genetics and genomics of Rosaceae (Vol. 6, pp. 411-506). New York: Springer.
- Gutierrez, L. G., & Ferrero, V. M. (2005). Análisis de ploidia por citometría de flujo de callos embriogénicos de aliso andino (*alnus acuminata hbk*). *Scientia et Technica*, 11(28), 205-209.
- Osorio German, J. A. (2002) Inducción de poliploidía en plantas de agave marmorata Roezl mediante el uso de 3 colchicina, como estrategia de mejoramiento genético.
- Chambers, A. H., Pollard, H., & Folta, K. M. (2013). Limitations of morphological ploidy estimation methods in *Fragaria*. *Journal of Berry Research*, 3(3), 135-149.
- Torres, A., Cué, J., & Héctor, E. (2018). Fisiología Vegetal Volumen I: Nutrición hídrica y mineral de las plantas. Ediciones UTM Universidad Técnica de Mnaabí.
- Calixto Flores, Raúl. (2004). Formas de explicación del proceso de respiración de las plantas. *Perfiles educativos*, 26(105-106), 125-142.
- Caiza, J. C., Vargas, D., Olmedo, C., Arboleda, M., Boada, L., Acurio, O., ... & Segovia-Salcedo, M. (2018). Morfometría y morfología de estomas y de polen como indicadores indirectos de poliploidía en especies del género *Polylepis* (Rosaceae) en Ecuador. *Ecología Austral*, 28(1), 175-187.
- Kamneva, O. K., Syring, J., Liston, A., & Rosenberg, N. A. (2017). Evaluating allopolyploid origins in strawberries (*Fragaria*) using haplotypes generated from target capture sequencing. *BMC evolutionary biology*, 17, 1-19.
- Jacob, Y., & Pierret, V. (1998). Pollen size and ploidy level in the genus *Rosa*. In XIX International Symposium on Improvement of Ornamental Plants 508 (pp. 289-292).
- Ramírez-Godina, F., Robledo-Torres, V., Foroughbakhch-Pournavab, R., Benavides-Mendoza, A., & Alvarado-Vázquez, M. A. (2013). Viabilidad de polen, densidad y tamaño de estomas en autotetraploides y diploides de *Physalis ixocarpa*. *Botanical Sciences*, 91(1), 11-18.
- Parisod, C., Holderegger, R., & Brochmann, C. (2010). Evolutionary consequences of autopolyploidy. *New phytologist*, 186(1), 5-17.