

**SISTEMA DE DETECCIÓN Y CLASIFICACIÓN AUTOMÁTICA DE
GRANOS DE POLEN MEDIANTE TÉCNICAS DE PROCESADO DIGITAL
DE IMÁGENES**

**SYSTEM DETECTION AND AUTOMATIC CLASSIFICATION OF POLLEN
GRAIN APPLIES TECHNICAL DIGITAL IMAGING PROCESS**

Jorge Arroyo Hernández

jarroy@una.ac.cr

Escuela de Matemática

Universidad Nacional.

Heredia, Costa Rica

Carlos M. Travieso González

ctravieso@dsc.ulpgc.es

Instituto Universitario para el Desarrollo

Tecnológico y la Innovación en Comunicaciones,ULPGC

Jaime Ticay Rivas

jrticay@gi.ulpgc.es

Instituto Universitario para el Desarrollo

Tecnológico y la Innovación en Comunicaciones,ULPGC

Federico Mora Mora

fmoram@una.ac.cr

Escuela de Matemática

Universidad Nacional.

Heredia, Costa Rica

Oscar Salas Huertas

osala@una.ac.cr

Escuela de Matemática

Universidad Nacional.

Heredia, Costa Rica

Melvin Ramírez Bogantes

mra@una.ac.cr

Escuela de Matemática

Universidad Nacional.
Heredia, Costa Rica

Luis Sánchez Chaves
lsanchez@una.ac.cr
Centro Investigaciones Apícolas
Tropicales.
Universidad Nacional.
Heredia, Costa Rica

Recibido el 3 marzo de 2011. Corregido el 6 agosto de 2011. Aceptado el 15 de marzo de 2012

Resumen: En este artículo se presentan los avances en la construcción de un sistema informático que permitirá el reconocimiento y clasificación taxonómica de granos de polen de algunas de las plantas melíferas tropicales más importantes en Costa Rica. Se aplicaron técnicas de pre y post procesado de imágenes digitales a partir de una base de datos de referencia. El sistema digital elaborado aplica filtros a las imágenes, lo cual permite su detección y un realce de sus características y su contorno. Luego, se parametriza y, finalmente, se utiliza un sistema de redes neuronales para el reconocimiento automático de los granos de polen. A través de la implementación de programas informáticos, se pretende pasar de un paradigma cualitativo a uno cuantitativo con el empleo de distintas herramientas matemáticas e inteligencia artificial, de forma que se pueda agilizar el proceso de reconocimiento y clasificación de los granos de polen. Mediante el método de PCA y la suma en las salidas de 30 redes neuronales (AS) se logró obtener una tasa de éxito del $91,67 \pm 3,13$, lo cual es altamente promisorio para los efectos del sistema de clasificación automática.

Palabras claves: Polen, procesamiento digital de imágenes, palinología, método de componentes principales (PCA), redes neuronales.

Abstract: This paper show the current state of a computer system that will allow the recognition and taxonomic classification of pollen grains of some of the most important tropical honey plants in Costa Rica using techniques of pre and post processing of digital images. The digital system uses filters on the images allowing it to detect and highlights its features and contour. Afterwards it is parametrized and finally a system of neuronal interconnections is used for the automatic recognition of pollen grains. The idea behind the implementation of a computer program is to move from a qualitative to a quantitative paradigm, using different mathematical tools and artificial intelligence in a way that can speed the process of recognition and classification of pollen grains. Using the PCA and the Sum at the outputs (CA) of 30 networks were able to obtain a success rate of $91,67 \pm 3,13$ which is highly promising for the purpose of the automatic classification system.

Keywords: Pollen, Digital Image Processing, Palynology, Principal Components Analysis (PCA), Neural Networks.

Debido al creciente interés de la sociedad en incentivar la conservación del medio ambiente, proteger los recursos naturales y, al mismo tiempo, fomentar su uso sostenible en armonía con la naturaleza, se hace imperativa la ejecución de investigaciones innovadoras de carácter interdisciplinario. Es así como un grupo de académicos de la Escuela de Matemática y del Centro de Investigaciones Apícolas Tropicales (CINAT) de la Universidad Nacional, en cooperación con la Universidad las Palmas de Gran Canaria de España, han iniciado un proyecto de detección y reconocimiento de los granos de polen de plantas melíferas tropicales más importantes en Costa Rica, mediante el pre y post procesado de imágenes digitales.

El objetivo es la creación un sistema informático de codificación para clasificación automática de granos de polen. Para esto, es necesario construir un sistema que logre medir o identificar las características que son cercanas a una familia, especie o género y lejanas a otras, para establecer patrones característicos y discriminantes entre ellas.

Al ser un proyecto interdisciplinario, permitirá una serie de beneficios para las distintas partes. En primera instancia, la existencia de una base de datos de imágenes digitales de granos de polen y un sistema de digitalización que apoye otras áreas de investigación como la apicultura, la arqueología y las ciencias médicas. Asimismo, esta colección digital de imágenes está constituida por los tipos de polen más importantes de las distintas regiones de Costa Rica, lo que permite promover redes de conocimiento y proyectos colaborativos. Luego, el fomento del rescate del valor real de las abejas en servicios de polinización en los ecosistemas tropicales, así como en los cultivos de importancia comercial, también para incentivar la producción de alimentos derivados de la miel. Finalmente, la identificación de granos de polen oportuna permite potenciar la producción de mejores mieles y sus derivados, fomentar una proyección económica para apicultores y una certificación que brindaría la posibilidad de competir con mercados internacionales.

El objetivo principal del proyecto es desarrollar un sistema de clasificación automática de granos de polen usando criterios taxonómicos asociados a la palinología de las plantas melíferas tropicales y la aplicación de técnicas de procesado digital de imágenes para su detección.

El proyecto se desarrolla en tres fases principales: la obtención de la base de datos de imágenes digitales, la cual tiene como objetivo servir de soporte para todo el protocolo de experimentación; la segunda es el pre-procesado de imágenes digitales, que tiene como objetivo extraer las imágenes de cada especie de polen brindándole el realce de sus características y eliminación de ruido; y por último, una tercer fase de parametrización que tiene como objetivo la obtención de un sistema de clasificación automático.

Este artículo presenta una descripción del problema que se desea resolver, el estado actual de la investigación, la metodología aplicada y los resultados que se han obtenido en las primeras fases de ensayo.

Marco teórico

Las plantas han sufrido un complejo proceso de evolución, el cual les ha asegurado su adaptación y permanencia en el planeta. En el transcurso de este proceso, han desarrollado una gran variedad de formas y métodos de sobrevivencia que se apoyan, en un alto porcentaje, en la polinización. Este es un fenómeno trascendental, pues de él depende, en gran parte, la vida.

Según Proctor, Yeo y Lack (1996), la polinización es un fenómeno biológico coevolutivo de gran impacto para la vida en el planeta. Consiste en la transferencia mecánica de los granos de polen de las anteras de una flor hasta el estigma de la misma flor, o de otra flor en la misma planta, o otras flores de otras plantas, pero de la misma especie. Posteriormente, estos granos pueden germinar para iniciar así el proceso de fecundación, que culmina con la fertilización del óvulo, fenómeno que desencadena en cambios fisiológicos posteriores, los cuales promueven la transformación del óvulo fecundado o rudimentos seminales fecundados en semillas y de los ovarios, y algunas reminiscencias del perianto de las flores en frutos. A través de este proceso las plantas aseguran su éxito en el ecosistema.

Por otra parte, el estudio de los granos de polen ha permitido desarrollar investigaciones en diversos campos como en la paleontología y la medicina, pues se destaca en aspectos de prevención y curación de alergias, infecciones respiratorias, ayuda a la memoria y para contrarrestar problemas de próstata (Villalvazo, 2008).

Por estas razones, la botánica le ha dado un lugar muy importante y la ha denominado Palinología, ciencia que se enfoca en el análisis de la morfología externa de los granos de polen y, por ende, en el estudio de los patrones estructurales de la exina y sus distintas variaciones.

Dentro de las características morfológicas principales están: el tamaño, las simetrías, la presencia y el número de aberturas, contornos, formas, ornamentos, etc. Esta caracterización ha permitido generar sistemas de clasificación o taxonómicos a distintos niveles: familia, géneros y especie (ver Figura 1).



Figura 1. *Microfotografía de la especie Malacra fasciata (Familia Malvaceae), conocida como Malva peluda. Se aprecian los ornamentos tipo espínula en la exina.*

Sin embargo, en la práctica, es un proceso lento y su clasificación está sujeta a la determinación de las características de los granos observados en el microscopio y depende de la experiencia, principalmente de especialistas en morfología del polen, con ayuda de libros y claves de referencia, así como catálogos de imágenes en línea.

En recientes investigaciones como la de Rodríguez, Cernadas, Fernández y De Sa-Otero (2006), se realizó un sistema de detección y clasificación de granos de polen basado en las formas y texturas. Es importante mencionar que, en este estudio, la extracción del contorno del grano de polen fue implementada de tres formas, usando los algoritmos de Edge, Snake y Convex-Hull. En otro trabajo, Rodríguez, Cernadas, Formella y De Sa-Otero (2004) propusieron un sistema de clasificación de granos de polen basados en la combinación de parámetros de forma y luminosidad. El sistema desarrollado consistió en una detección del grano de polen, reconocimiento del grano de polen, extracción de características y clasificación. Estos autores usaron descriptores de características geométricas, momentos estadísticos, descriptores de Fourier estadísticos de segundo orden y características de luminosidad.

En general, las técnicas analíticas de procesamiento de imágenes tienen su fundamento teórico en los *Análisis de componentes principales* (PCA, por sus siglas en inglés). Mediante este procedimiento, se reduce la dimensionalidad de una lista de datos, lo cual permite considerar un gran número de variables interrelacionadas. Esto retiene, en lo máximo posible, la variación presente en la lista de datos. Se logra mediante la transformación de una nueva lista de variables, los componentes principales (PCs), que están correlacionados y los cuales son ordenados de tal modo que tan solo algunos pocos datos de los primeros retienen la mayoría de la variación presente en todas las variables originales (Jolliffe, 2002).

De este modo, y como respuesta a la necesidad planteada, se implementó esta propuesta de investigación novedosa, que consistió en diseñar e implementar una primera versión de un sistema de detección y de clasificación taxonómico digital de granos de polen, mediante técnicas de pre y post procesado de las imágenes digitales.

Metodología

Creación de la base de datos de imágenes digitales

El proyecto se inició con la construcción de la base de datos de imágenes digitales a partir de la colección de granos de polen del CINAT. Se eligió una muestra de 60 especies de tipos de polen de plantas melíferas de importancia alimenticia para las abejas en Costa Rica.

Para esta fase se trabajó en un sistema de prueba con una muestra de 11 tipos de granos (ver Tabla 1). Cada tipo de grano posee, aproximadamente, 15 capturas por medio de una cámara, en un microscopio de luz con un adaptador mecánico.

Tabla 1

Lista de granos de polen de especies melíferas utilizadas para referencias fotográficas

Clase	Familia	Género	Especie
1	<i>Asteraceae</i>	<i>Tridax</i>	<i>procumbens</i>
2	<i>Bombacaceae</i>	<i>Bombacopsis</i>	<i>quinata</i>
3	<i>Fabaceae</i>	<i>Cassia</i>	<i>grandis</i>
4	<i>Comvulvulaceae</i>	<i>Ipomea</i>	<i>batatas</i>
5	<i>Fabaceae</i>	<i>Cassia</i>	<i>fistula</i>
6	<i>Fabaceae</i>	<i>Miroespermyn</i>	<i>frutesens</i>
7	<i>Fabaceae</i>	<i>Enterolobium</i>	<i>cyclocarpun</i>
8	<i>Malpighiaceae</i>	<i>Bunchosin</i>	<i>cornifolia</i>
9		<i>Cardioespermu</i>	
	<i>Sapindaceae</i>	<i>n</i>	<i>grandiflorus</i>
10	<i>Verbenaceae</i>	<i>Lantana</i>	<i>camara</i>
11	<i>Sapindaceae</i>	<i>Melicocca</i>	<i>bijuga</i>

Se usó un protocolo de captura de las imágenes para construir una base de referencia por cada especie analizada. En primera instancia, se usó el microscopio con una lente con aumento de 100x y aceite de inmersión, para la grabación de cada fotografía con luminosidad controlada.

Luego, se tomaron fotografías en transectos individuales de avance por toda la superficie de la lámina. De esta forma, se aseguraba la captura de las imágenes digitales en las mismas condiciones experimentales.

Pre-procesado de las imágenes digitales

Una vez que las imágenes fueron capturadas, se ejecutó un detector automático para evaluar solamente la información del grano de polen. Como primer paso, se incrementó el contraste de las imágenes con el fin de aumentar la definición de los contornos. Luego, se aplicó el método *decorrelation stretching* explicado con detalle en investigaciones realizadas por Cambell (1996) y Amanatiadis, Kaburlasos, Gasteratos y Papadakis (2009), donde la idea principal del método consiste en hacer un realce, por medio de la equalización de la varianza.

La imagen del grano de polen es representada por una matriz I de dimensiones $M \times N \times 3$, donde $M \times N$ representa el tamaño de la imagen de cada canal de color. De esta forma, los píxeles de las imágenes están representados por el vector $x \in \mathbb{R}^I$. Se escribe V como la matriz de correlación o covarianza de x y el análisis de autovectores asociado con las componentes principales como:

$$V = U E U^T$$

donde

U denota los autovectores y los elementos de la diagonal de la matriz.

E los autovalores correspondientes (Amanatiadis et al., 2009).

Aplicando la transformación U^T , el vector x es transformado a un vector cuyos datos vienen dados por $y = U^T x$, se reduce la redundancia de los datos y se optimiza la información.

El escalado aplicado para equalizar las varianzas en este nuevo espacio se consigue dividiendo cada valor de y por su desviación estándar $e_i^{1/2}$ correspondiente, se obtiene así la matriz w como:

$$w = E^{-1/2} U^T x$$

donde

$$E = \text{diag}(e_1, e_2, e_3)$$

La transformación al espacio original se obtiene de la siguiente forma:

$$z = U E^{1/2} U^T x$$

Con el método *decorrelation stretching* aplicado se procede a transformar esta imagen al modelo de color HSV (*Hue, Saturation, Value*). Se toma el canal S para aprovechar la diferencia de intensidades entre el grano de polen y el fondo. A continuación se realiza una equalización de histograma el cual se multiplica por el factor f :

$$f = \frac{S - \min(S)}{\max(S) - \min(S)}$$

donde

m es la media del canal S , la cual asegura que la ecualización se realiza en el rango adecuado.

Parametrización y reducción de características

La extracción de las características discriminantes se ha realizado en dos fases:

- a) Extracción de características geométricas: las características geométricas han sido utilizadas en la mayoría de trabajos relacionados con la clasificación de granos de polen. Los parámetros seleccionados en este trabajo han sido el área, el área convexa y el perímetro, debido a que proporcionan una cantidad considerable de información básica de la forma de los granos de polen. El área se ha calculado como el número de píxeles de la región considerada. El área convexa se ha calculado como el número de píxeles de la imagen binaria que especifica la envoltura convexa. El perímetro es calculado como la distancia entre cada par de píxeles adyacentes del contorno del grano de polen.
- b) Descriptores de Fourier: Los descriptores de Fourier representan la forma del grano de polen en el dominio de frecuencia (Amanatiadis et al., 2009; Rodríguez et al., 2004). Cada punto del contorno del grano de polen puede ser representado por un número complejo. Con el objetivo de eliminar el efecto de desplazamiento, el centroide de la forma del grano de polen se introduce en la representación del contorno en su equivalente complejo:

$$s = e^{-x} + j y$$

El contorno ha sido muestreado cada 2 grados (su equivalente en radianes) utilizando la transformación de coordenadas cartesianas a coordenadas polares. Los descriptores de Fourier se definen como el espectro de potencia de la Transformada Discreta de Fourier de s . En este trabajo se aplicó la Transformada Discreta del Coseno (TDC) a la transformación resultante de s para seleccionar los descriptores de Fourier más significativos. Se han tomado las primeras 8 componentes.

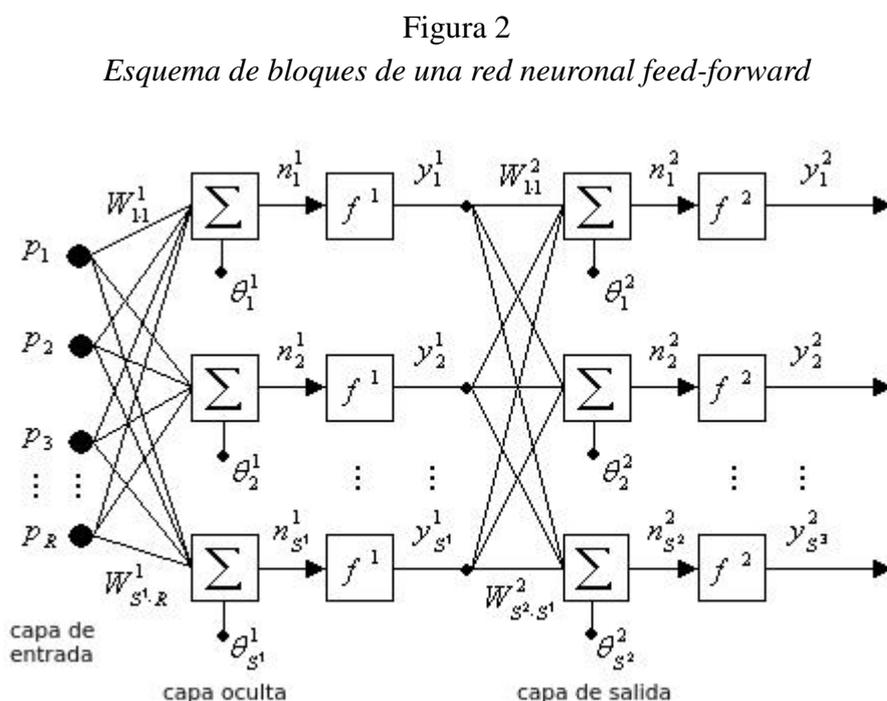
La reducción de características se realizó mediante la técnica PCA. Dado que existe una alta correlación entre las variables de entrada, una posibilidad es utilizar este método (PCA) para llevar a cabo esta reducción (Bishop, 1996). Para estudiar las relaciones que se presentan entre n variables correlacionadas (que miden información común) se puede transformar el conjunto original de variables en otro conjunto de nuevas variables correlacionadas entre sí (que no tenga repetición o redundancia en la información), llamado conjunto de componentes principales. Las nuevas variables son combinaciones lineales de las anteriores y se van construyendo según el orden de importancia en cuanto a la variabilidad total que recogen de la muestra. De modo ideal, se buscan dos variables m, n donde $m < n$ sean combinaciones lineales de las P originales y estén

correlacionadas, de manera que se recoge la mayor parte de la información o variabilidad de los datos. Esta técnica construye una transformación lineal que escoge un nuevo sistema de coordenadas para el conjunto original de datos. En este sistema, la varianza de mayor tamaño del conjunto de datos es capturada en el primer eje (primera componente principal); la segunda varianza más grande es el segundo eje, y así sucesivamente. Existen diferentes métodos para el cálculo de PCA, como por ejemplo el método de covarianza o el de SVD (Bishop, 1996).

Clasificación automática

Para resolver este problema, la metodología de la identificación usada consistió en clasificación supervisada. Por lo tanto, se tiene un sistema con dos modos: entrenamiento y testeo.

Las redes neuronales artificiales se han utilizado en varios trabajos, con buenos resultados (Li y Flenley, 1999; Rodríguez-Damian, Cernadas, Formella, Fernández-Delgado y De Sa-Otero, 2006). En algunos de estos trabajos se han empleado redes neuronales tipo Perceptron Multi-Capa (ver Figura 2) con el algoritmo de entrenamiento de retroalimentación (*Multi-Layer Perceptron, Back-Propagation, MLP-BP*). La función de activación utilizada en las neuronas fue de tipo hiperbólica tangencial sigmoidal. El número de neuronas en la capa de entrada es el mismo que el número de características seleccionadas. Según nuestros experimentos, el mejor número de neuronas en la capa oculta oscilaba entre 20 y 80, se determinó que el número adecuado era de 50 neuronas. El número de neuronas en la capa de salida 11; es decir, el número de clases. Se realizaron 5000 iteraciones en la fase de entrenamiento.



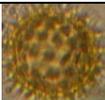
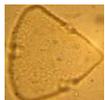
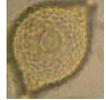
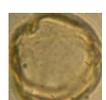
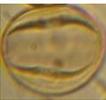
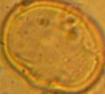
Dado que el peso de inicialización de las neuronas se realiza de forma aleatoria, se utilizaron 30 redes neuronales para efectuar la decisión de clases. Dos métodos fueron aplicados: clase más votada (CMV) y fusión de resultados mediante la suma (AS). El primero selecciona el resultado más repetido de las 30 neuronas. Estos resultados se calculan en cada red neuronal como el índice que contiene el valor máximo de los resultados, el cual corresponde a la clase. En AS se suman las salidas de las 30 redes neuronales antes de seleccionar el valor máximo.

Resultados

En la etapa de pre-procesamiento de las imágenes, se presentaron conglomeraciones de granos de polen e imágenes desenfocadas. Para eliminar este problema, se desarrolló un algoritmo de captura semiautomática, con el objetivo de garantizar mayor precisión en la fase de parametrización y extracción de características individuales de las especies analizadas. Como resultado de este proceso, se lograron extraer las imágenes estandarizadas y depuradas que aparecen en la figura 3.

Figura 3

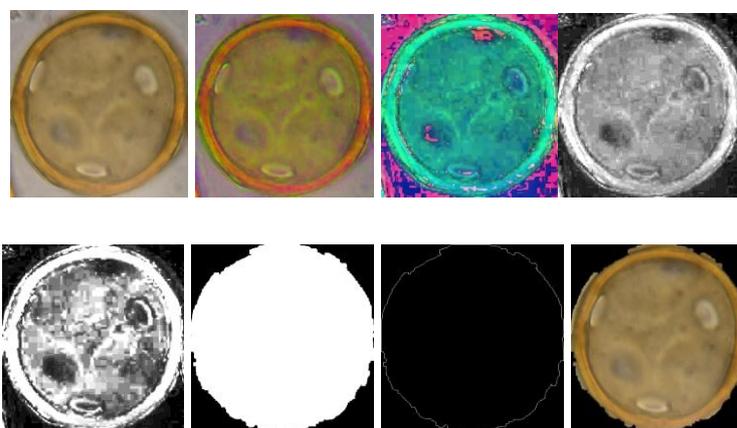
Imágenes de los granos de polen de las especies extraídas en la fase de pre-procesamiento

Especie	Imagen	Especie	Imagen
Tridax procumbens		Enterolobium cyclocarpum	
Bombacopsi s quinata		Bunchosia cornifolia	
Cassia grandis		Cardiosperm um grandiflorus	
Ipomea batatas		Lantana camara	
Cassia fistula		Melicocca bijuga	
Myrosperm um frutescens			

Otro resultado alcanzado en la fase de pre-procesamiento digital se observa en la figura 4, donde posterior a la aplicación de los filtros, se logra una depuración de la imagen y los contrastes buscados. De esta forma, en el proceso de análisis con la imagen ajustada, se llevó a cabo su binarización con un nivel fijado a 0,45. Se aplicaron las operaciones morfológicas, tales como close, erode, dilate, etc., para considerar y procesar solo el área donde está localizado el polen; de esta forma se obtienen las imágenes con la extracción depurada esperada.

Figura 4

Imágenes obtenidas posterior a la aplicación de filtros para la extracción de granos de polen



Una vez que se concluyó la etapa de pre-procesamiento de las imágenes, se continuó con la fase de experimentación con el clasificador automático explicado en la sección anterior correspondiente. En esta etapa se trabajó con dos grupos de muestras: una de entrenamiento y otra de control. El grupo de entrenamiento permitió generar resultados que fueron contrastados y comprobados con el grupo de control. Este proceso sirvió para retroalimentar y mejorar el sistema de clasificación.

Además del conjunto de parámetros mencionados, un segundo conjunto de parámetros fue obtenido aplicando PCA a los parámetros originales. Respecto a la clasificación CMV y AS, estas fueron aplicadas de forma independiente. Además, los resultados de ambos conjuntos fueron fusionados utilizando la técnica AS.

Con el objetivo de obtener resultados válidos, se utilizaron una serie de métodos de validación cruzada en cada tratamiento. Para este efecto, se aplicaron 30 iteraciones utilizando validación cruzada hold-out al 50 % (50- HO), k carpetas (folds) con $k=3, 4, 5$ (3-, 4-, and 5-folds). La tabla 2 muestra los resultados obtenidos.

Tabla 2

Resultados obtenidos al utilizar la validación cruzada hold-out al 50%

PCA	Fusión	50-HO	3-folds	4-folds	5-folds
No	CMV	67.07% ± 2.70	67.07% ± 2.61	68.25% ± 4.50	65.96% ± 3.34
Yes	CMV	87.01% ± 2.64	89.98% ± 2.37	88.10% ± 6.59	88.26% ± 1.84
No	AS	67.41% ± 2.58	67.28% ± 2.96	69.40% ± 3.61	67.17% ± 5.98
Yes	AS	88.40% ± 2.54	89.55% ± 2.07	90.09% ± 3.79	88.66% ± 4.38

Posteriormente, se fusionaron los dos conjuntos de parámetros, tanto los originales como los originales más PCA. Los resultados obtenidos en este procedimiento se muestran en la tabla 3.

Tabla 3

Datos obtenidos de la fusión de parámetros mediante AS

Parámetro	Fusión	50-HO	3-folds	4-folds	5-folds
s					
Original y	AS	91.59% ± 1		91.55% ± 3.	91.47% ± 3
Original+P		.87	92.10% ± 3.7	41	.48
CA			9		

Finalmente, se hizo una comprobación con expertos para contrastar la información obtenida y se fijó el éxito alcanzado como la media de la fusión de resultados mediante AS; es decir, se logró alcanzar 91,67% de éxito.

Discusión

El método actual para la clasificación de granos de polen es un proceso cualitativo, por observación y discriminación de características de la exina del grano de polen. Este procedimiento, depende de la experiencia del experto en analizar la morfología de este grano y saber utilizar e interpretar las guías y claves palinológicas (Roubik y Moreno, 1991). A pesar de su efectividad, el proceso es lento y se debe invertir gran cantidad de tiempo y recursos, lo cual limita los procesos de investigación, pues estos dependen, en gran medida, de la disponibilidad del experto. Además, actualmente no existe un soporte en el plano cuantitativo para la clasificación de los granos de polen. Por tanto, automatizar este proceso de forma segura y precisa agiliza el reconocimiento, la identificación y potencia los procesos de investigación en esta área.

En la figura 1, se muestran los resultados de la fase de pre-procesamiento. En esta etapa, se logró depurar y extraer con éxito las imágenes de los granos de polen de las 11 especies melíferas utilizadas en el experimento. Además, se pudo apreciar que el método *decorrelation stretching* fue efectivo en alcanzar el realce y nitidez de las imágenes a través de la aplicación de la ecualización de la varianza. Estos resultados concuerdan con los obtenidos por Amanatiadis et al. (2009).

El éxito en el pre-procesamiento en las muestras analizadas permitió continuar con la aplicación de los filtros para la extracción de las imágenes depuradas, tal como lo muestra la figura 2. Además, se logró comprobar que la combinación de características geométricas y los descriptores de Fourier son un excelente conjunto de parámetros para la clasificación de granos de polen. Esto se debe a que las características geométricas aportan la información general y básica de los granos de polen; mientras que los descriptores de Fourier permiten más detalles según la frecuencia estudiada. Los descriptores de frecuencias más bajas contienen la información sobre las características generales de la forma; los descriptores de alta frecuencia, la información sobre los detalles más finos. Dado que un subconjunto de los descriptores generados es suficiente para describir las características de la forma, se ha utilizado la Transformada Discreta del Coseno (TDC) para extraer las componentes más significativas.

Según Rodríguez et al. (2006), para la extracción del contorno del grano de polen se implementaron tres variables, usando los algoritmos de Edge, Snake y Convex-Hull. Posteriormente, para la extracción de las características de forma y textura, los autores trabajaron con parámetros invariantes asociados a la morfología y la ornamentación, así como con momentos estadísticos que dan información sobre el contorno y la textura en escala de grises. Estas variables también se implementaron exitosamente en nuestro estudio. De igual manera se utilizaron los descriptores de Fourier, estadísticos de primer y segundo orden, y características de textura.

Asimismo, los resultados experimentales, mostrados en la tabla 2, indican que el uso de PCA como selector de características sobre la combinación de ambos conjuntos de características, mejora significativamente el rendimiento del sistema. Esto es coherente con el hecho de que la transformación PCA proyecta los datos sobre las dimensiones que contienen más información, maximizando la varianza.

Finalmente, con la fusión de los resultados de los parámetros transformados con PCA y los parámetros sin transformación, utilizando la técnica AS, se obtuvo un tasa de éxito de $91,67 \pm 3,13$. El éxito alcanzado es similar al 89% de éxito que reportaron otros trabajos como el de Rodríguez et al. (2004). Estos autores utilizaron, para la clasificación de los granos de polen, categorías taxonómicas basadas en clasificadores de la mínima distancia; también integraron patrones para clasificación con redes neuronales de multicapas y *perceptron*, lo cual concuerda con nuestro trabajo. Alternativamente y como discriminante final, los autores anteriormente citados utilizaron

herramientas de soporte vectorial. Es importante mencionar que en nuestro estudio el número de especies clasificadas fue mayor que el realizado en trabajos previos. Por ejemplo, en el trabajo de Rodríguez et al. (2004), la clasificación de polen se circunscribió a una muestra de especímenes de la familia Urticaceae.

Según los resultados obtenidos, a través de todo el proceso y el nivel de éxito generado con el análisis del polen de las especies melíferas, en especial posterior a la parametrización con PCA y los valores de AS, se concluye que la creación de un sistema informático para la detección y clasificación automática de granos de polen es viable y puede ser una herramienta muy importante de apoyo al trabajo en la Palinología.

Referencias

- Amanatiadis, A., Kaburlasos, V. G., Gasteratos, A. y Papadakis, S. E. (2009). A comparative study of invariant descriptors for shape retrieval. *Imaging Systems and Techniques [Estudio comparativo de descriptores invariantes para la recuperación de formas]. IST 2009 - International Workshop on Imaging Systems and Techniques. IEEE International Workshop on*, (pp. 391-394). Shenzhen, China.
- Bishop, C. (1996). *Neural Networks for Pattern Recognition [Redes neuronales para reconocimiento de patrones]*. Oxford University Press. Clarendon, UK.
- Cambell, N. (1996). The decorrelation stretch transformation. *Int. J. Remote Sensing*, vol. 17, 1939-1949.
- Jolliffe, I.T. (2002). *Principal Component Analysis [Análisis de componentes principales]*. (2^o ed.). Berlin: Springer-Verlag
- Li, P. y Flenley, J. (1999). Pollen texture identification using neural networks [Identificación de la textura de polen usando redes neuronales]. *Grana* 38 (1), 59-64.
- Proctor, M., Yeo, P., y Lack, A. (1996) *The Natural History of Pollination [La historia natural de la polinización]*. Oregon: Timber Press, Inc
- Rodríguez, M., Cernadas, E., A., Fernandez, M. y De Sa-Otero, P. (2006). Automatic detection and classification of grains of pollen based on shape and texture [Detección automática y clasificación de granos de polen basado en forma y textura]. *Systems, Man and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews* 36, 531-542.

- Rodríguez, M., Cernadas, E., Formella, A. y De Sa-Otero, P. (2004). Pollen classification using and shape-based descriptors. *Pattern Recognition [Clasificación de polen usando descriptores basados en brillo y la forma]. Proceedings of the 17th International Conference on 2*, 212-215.
- Roubik, D. W. y Moreno, J. E. (1991). *Pollen and Spores of Barro Colorado Island [Polen y esporas de la isla de Barro Colorado]*. Missouri: Missouri Botanical Garden.
- Villalvazo, R. (2008) La próstata y el uso del polen. *Revista Pronat*. Recuperada de http://www.pronat.com.mx/Temas/polen_prostata.htm