

Valor taxonómico de las características morfométricas microscópicas de las plumas en 23 especies de aves rapaces presentes en Cuba

Alejandro L. MICHELENA^{1*} y Dennis DENIS ÁVILA²

1. Instituto de Ecología y Sistemática, Carretera de Varona 11 835 e/ Oriente y Lindero Calabazar, Boyeros. La Habana 19, C. P. 11 900, Cuba.

2. Facultad de Biología, Universidad de La Habana, Cuba.

Autor para correspondencia: michelena@ecologiaku

Resumen: La microestructura de las plumas de las aves ha probado tener valor identificador y se ha empleado en estudios ecológicos, arqueológicos y forenses, sobre todo en accidentes aéreos. Al no existir en Cuba ninguna colección de referencia de plumas de aves, ni estudios previos de este tipo. En el presente trabajo se presenta la descripción de la microestructura de las plumas de contorno de 23 especies cubanas de rapaces diurnas y nocturnas, y la determinación de su valor para la identificación taxonómica. A partir de 169 muestras de plumas del pecho de pieles de estudio de 23 especies de los órdenes Strigiformes, Accipitriformes y Falconiformes, se midieron al microscopio óptico la longitud de la bárbula, la cantidad de nodos por bárbula, las distancias internodales, el grosor de los nodos y la longitud de la célula basal. La capacidad identificatoria se evaluó por análisis discriminante lineal y árboles de clasificación. Entre diferentes conjuntos de especies existieron diferencias interespecíficas significativas en algunas de las variables, pero ninguna por sí sola fue suficiente para la identificación de las familias o especies. Las variables tomadas mostraron un patrón de correlaciones internas y un escalado multidimensional no métrico mostró que analizar todas las variables simultáneamente permitía diferenciar algunas especies pero las demás se superponían marcadamente. Con árboles de clasificación y regresión (CART) se logró una identificación correcta de las familias en el 93,2 % de los casos y de las especies en el 87,3 %. *Asio flammeus*; *Circus cyaneus*; *Pandion haliaetus* y *Tyto alba* fueron clasificadas correctamente en todos los casos. En el resto de las especies, excepto *Buteo jamaicensis*, las clasificaciones correctas empleando la microestructura de las plumas estuvieron por encima del 80 % de la muestra. Estos resultados, aunque preliminares, demuestran la capacidad de emplear estas estructuras para la identificación de las especies de rapaces.

Palabras clave: pluma de contorno, bárbulas, nodos, CART, discriminación por especies

Abstract: Feather's microstructure in birds has been used to identify species in ecological, archeological and forensic studies, mostly in aircraft accidents. There are no reference scientific collection of bird feathers in Cuba nor previous researches on this topic. Current paper presents the description of contour feather microstructure in 23 Cuban diurnal and nocturnal raptor bird species, to assess its value for taxonomic identification. From 169 contour feather samples from bird skins at museum collections, belonging to 23 species of Strigiformes, Accipitriformes and Falconiformes, we measured using a microscope barbule length, number of nodes per barbule, internodal distances, nodal thickness and basal cell length. Among different sets of species some variables shown statistical differences but none was individually sufficient to identify neither the family nor the species. All variables shown an internal correlation pattern and a nonmetric multidimensional scaling show that some species can be differentiated but others present a significant overlap. CART Classification trees achieve a correct family identification in 93.2 % of the cases and identify the species in 87.3 % of individuals. The species *Asio flammeus*; *Circus cyaneus*; *Pandion haliaetus* and *Tyto alba* were correctly identified in all cases. In the rest of the species, but *Buteo jamaicensis*, correct classifications using feather microstructure was over 80 % of the sample. These preliminary results demonstrate the capacity of using those structures to species identification in Cuban raptors birds.

Keywords: Contour feather, barbule, node, CART, species discrimination

INTRODUCCIÓN

Las plumas son complejas proyecciones epidérmicas queratinizadas que constituyen caracteres únicos de la clase Aves. El plumaje tiene diversas funciones: provee la superficie y el diseño requerido para el vuelo, constituye un aislante térmico y tiene un rol fundamental en la reproducción y el camuflaje (Podulka *et al.*, 2004). La microestructura de las plumas como una herramienta taxonómica fue estudiada por primera vez por Chandler (1916), quien fue uno de los primeros en examinar y describir la variación microscópica de las bárbulas en varios grupos de aves. Estas estructuras contienen una secuencia regular de nodos que pueden mostrar un mayor o menor desarrollo, pueden tener diversas formas (engrosadas, triangulares, acampanadas) y presentar estructuras como puntas, lóbulos o anillos. Estas características, combinadas con los tamaños de las bárbulas y el patrón de su secuencia de aparición, pueden permitir la identificación de grupos o especies de aves (Wattel, 2000).

El análisis de la microestructura de las plumas ha sido utilizado para identificar muestras recuperadas de sitios arqueológicos (ej.: Hargrave, 1960; Dove y Peurach, 2002; Dove *et al.*, 2005), para analizar tendencias adaptativas a diferentes requerimientos ecológicos (ej.: Dove y Agreda, 2007), para identificar restos de alimentación de depredadores (Day, 1966), pero sobre todo en estudios forenses para investigar accidentes aéreos producidos por colisiones con aves (ej.: Dove, 2000 y Christidis *et al.* 2006). El reconocimiento mundial de este método se incrementó luego de la creación, en la década del 60, del programa de Ornitología Forense, en el Instituto Smithsonian, por Roxie Laybourne, con este objetivo (Laybourne y Dove, 1994). Este método se complementa con estudios más tradicionales, como la identificación basada en caracteres macroscópicos, o a través del ADN, pero no siempre es posible obtener muestras del tamaño requerido o en condiciones adecuadas para estos tipos de análisis que además, en el segundo caso, son costosos y requieren de amplias bases de secuencias de comparación que pueden no existir para todas las especies (Brom, 1992; Dove, 1997; Shamoun-Baranes, 2002).

Entre las aves habitualmente identificadas en accidentes relacionados con aviones se encuentran las rapaces, por su gran tamaño y su capacidad de vuelo a gran altura. Este grupo genérico incluye a los miembros de los órdenes Accipitriformes, Falconiformes y Strigiformes, que presentan orígenes filogenéticos diferentes, pero que han convergido evolutivamente por sus similares hábitos de alimentación. Las rapaces diurnas (Accipitriformes y Falconiformes) son las mejor representadas en Cuba con

14 especies pertenecientes a las familias Accipitridae, Falconidae y Pandionidae, mientras que las nocturnas (Strigiformes) sólo presentan siete especies, distribuidas en dos familias, Tytonidae y Strigidae (Garrido y Kirkconnell, 2000).

En Cuba no existe ninguna colección de referencia de plumas de aves y la mayor parte de las colecciones científicas de pieles de aves datan de mediados del pasado siglo, con lo cual la coloración de las plumas se ha degradado dificultando la identificación de muestras pequeñas por comparación visual. Tampoco existe ninguna investigación relacionada con la microestructura de las plumas en este grupo, lo cual es una desventaja para la identificación taxonómica de muestras pequeñas que no se puedan identificar macroscópicamente. Por estas razones, en el presente trabajo se presenta la descripción de la microestructura de las plumas de contorno de 23 especies cubanas de rapaces diurnas y nocturnas, y la determinación de su valor para la identificación taxonómica.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se tomaron 169 muestras de plumas de contorno (extraídas del área del pecho) de pieles de 23 especies de aves rapaces, seis del orden Strigiformes y el resto Accipitriformes y Falconiformes (las especies de mayor tamaño de muestra aparecen en la Tabla 1), depositadas en las colecciones científicas del Museo Felipe Poey de la Universidad de La Habana, del Museo Charles Ramsdem de la Universidad de Oriente y del Museo Nacional de Historia Natural. De varias especies los ejemplares disponibles fueron muy escasos, pero se incluyeron también con fines comparativos, sin tenerlos en cuenta en los análisis estadísticos. Entre estas estuvieron el Aura Tiñosa (*Cathartes aura*) y el Sijú de Sabana (*Athene cunicularia*) (ambos con n=3), y el Gavilancito (*Accipiter striatus*), el Gavilán Caguarero (*Chondrohierax wilsonii*) y el Halcón Peregrino (*Falco peregrinus*) (con n=2). También se incluyó una muestra del Zopilote (*Coragyps atratus*), del Gavilán Cola de Tijera (*Elanoides forficatus*) y otra del Búho (*Asio otus*).

Las plumas se limpiaron cuidadosamente y se trataron con tres baños de alcohol al 90 % por 15 minutos cada uno, para eliminar impurezas, fundamentalmente orgánicas, siguiendo una variante del método desarrollado por Laybourne y Dove (1994) y Sabo y Laybourne (1994) para análisis de muestras de accidentes aéreos por colisiones con aves. Este paso es importante ya que las partículas extrañas, como polvo, aceite, suciedad y el polvillo de plumón que suelen tener las plumas recién removidas, a menudo pueden entorpecer la visualización de la

morfología de las barbas sueltas (Laybourne *et al.*, 1992). Luego del lavado se secaron al aire y se emplearon pinzas de punta fina para seleccionar varias barbas individuales que se montaron en portaobjetos (en seco) para su observación al microscopio.

Se utilizó un microscopio clínico, con aumentos de 10x a 40x equipado con una cámara digital MDCE-5A con la cual se tomaron las fotografías y una escala micrométrica. Las imágenes fueron procesadas con el programa *Image Tool 3.0* para *Windows*, y se obtuvieron las siguientes variables (Fig. 1):

- Tamaño de la bárbula: la distancia entre la zona apical de la bárbula y la zona en la que se inserta en la barba.
- Cantidad de nodos por bárbula: Número de nodos por barba individual.
- Distancia internodal 1: Distancia entre el primer y el segundo nodo de la bárbula.
- Distancia internodal 2: Distancia entre dos nodos de la zona del centro de la bárbula.
- Distancia internodal 3: Distancia entre los dos nodos más cercanos a la zona apical de la bárbula.
- Grosor de los nodos: distancia desde un borde lateral hasta el otro del nodo de mayor tamaño aparente en la bárbula.
- Longitud de la célula basal: Medición de la longitud de la célula basal de cada bárbula.

A partir de las tres distancias internodales de cada barba se calcularon otras dos variables derivadas:

- Distancia internodal media: Variable derivada que representa el promedio de las tres distancias internodales para cada individuo.

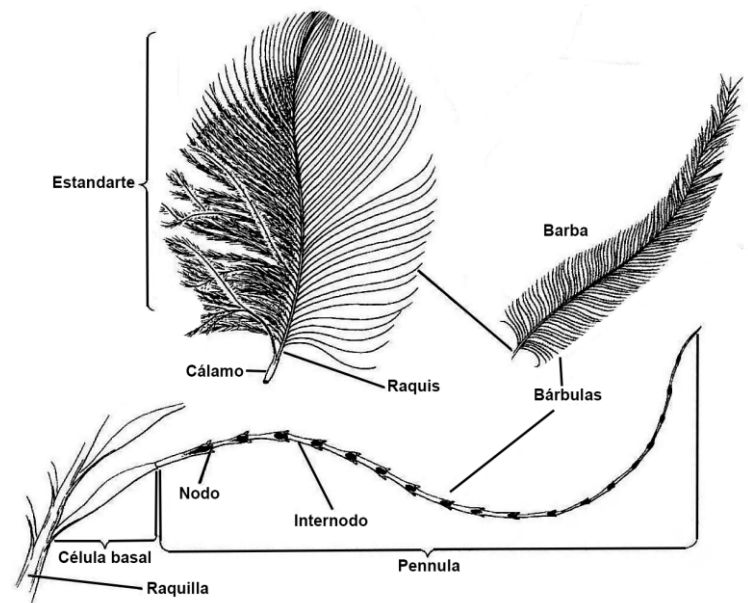


Figura 1. Estructura básica de una pluma de contorno donde se muestran los elementos utilizados como diagnóstico para diferenciar las especies de rapaces estudiadas (modificado de Dove 1997).

Figure 1. Basic structure of a contour feather showing the elements used as diagnostic to differentiate raptor bird species involved in the study.

- Porcentaje de reducción de la distancia internodal: Variable derivada que representa el porcentaje de reducción de la distancia internodal desde la distancia internodal 1 hasta la distancia internodal 3.

Tabla 1. Lista y tamaños de muestra (N) de las especies de las aves rapaces cubanas de mayor cantidad de muestras utilizadas en el estudio del valor taxonómico de la microestructura de las plumas.

Table 1. List and sample size (n) of Cuban raptor bird species with higher sample size used to assess taxonomic value of contour feather microstructure.

Orden	Familia	Nombre Científico	Nombre común	Siglas	N
Accipitriformes	Accipitridae	<i>Rostrhamus sociabilis</i>	Gavilán Caracolero	Rso	12
		<i>Buteo platypterus</i>	Gavilán Bobo	Bpl	10
		<i>Accipiter gundlachi</i>	Gavilán Colilargo	Agu	7
		<i>Buteogallus gundlachi</i>	Gavilán Batista	Bgu	7
		<i>Buteo jamaicensis</i>	Gavilán de Monte	Bja	6
		<i>Circus cyaneus</i>	Gavilán Sabanero	Ccy	6
		<i>Pandion haliaetus</i>	Guincho	Pha	4
Falconiformes	Falconidae	<i>Falco sparverius</i>	Cernícalo	Fsp	41
		<i>Falco columbarius</i>	Halconcito de Palomas	Fco	11
		<i>Caracara cheriway</i>	Caraira	Cch	10
		<i>Glaucidium siju</i>	Sijú Platanero	Gsi	13
		<i>Asio flammeus</i>	Cárabo	Af	8
Strigiformes	Strigidae	<i>Margarobyas lawrencii</i>	Sijú Cot unto	Mla	7
		<i>Asio stygius</i>	Siguapa	Ast	5
		<i>Tyto alba</i>	Lechuza	Tal	7

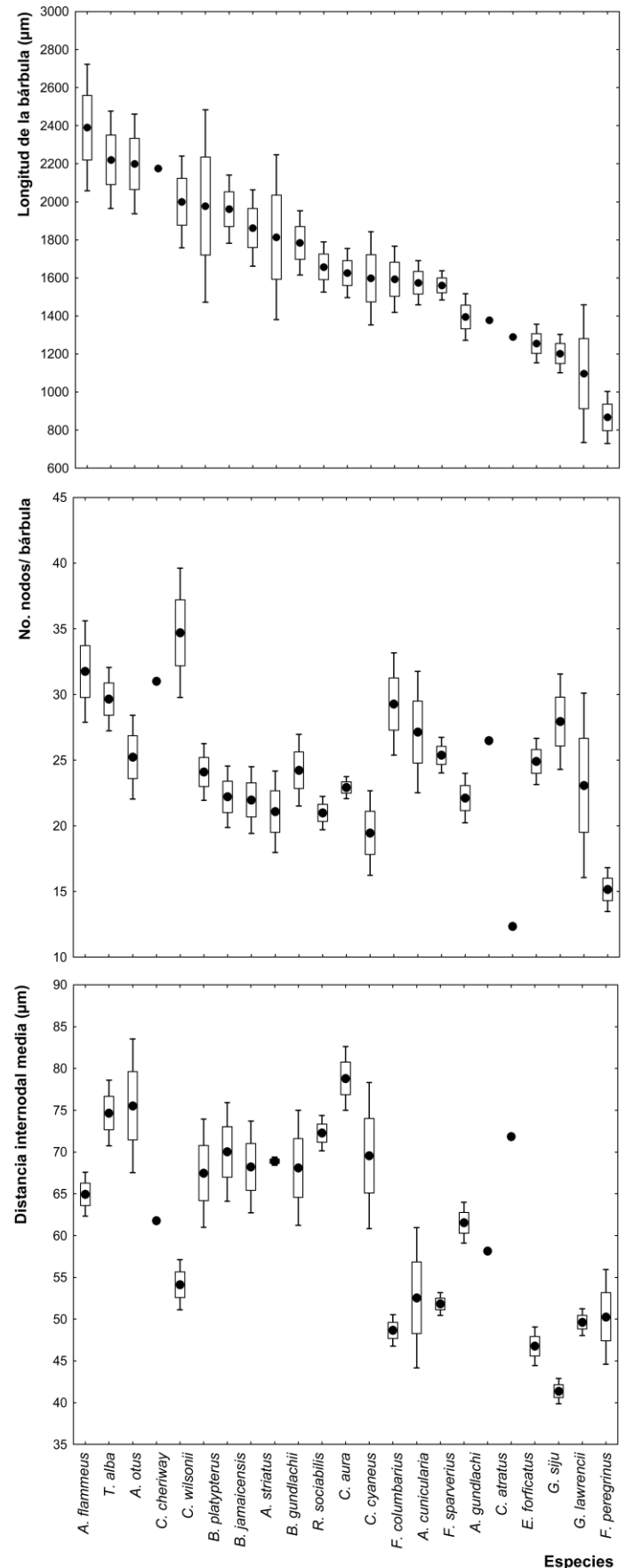
Se obtuvieron los estadísticos descriptivos por especie para cada variable (media y error estándar), mediante el programa *Statistica* v. 8.0 y con el *PopTools* v1.3, aplicación (*add ins*) del MS Excel, se obtuvieron los límites de confianza por el método de Montecarlo. A pesar de la pequeña muestra, no existieron evidencias de ausencia de normalidad en los datos por lo que se calculó la matriz de correlación de Pearson entre todas las variables. Para la exploración general se realizó un Escalado Multidimensional no Métrico, utilizando las distancias euclidianas, en el programa *Past* y un análisis de agrupamiento con el método de Ward. La significación estadística de las diferencias globales se evaluó con un Permanova con 10000 aleatorizaciones. Se realizó, además, un Análisis de Función Discriminante Lineal (AFD) por especies, para emplear su matriz de confusión y seleccionar las especies con mayor porcentaje de discriminación potencial (mayor que el 50 %) con las cuales posteriormente se confeccionó un árbol de clasificación y regresión (CART). El AFD se realizó en el programa *Infostat* y el CART en el *SPSS* v19. De estos análisis estadísticos se excluyeron las especies con tamaños de muestra menores de cinco individuos. Este análisis también se realizó por familias, excluyendo a las familias Pandionidae y Cathartidae.

RESULTADOS

Las especies de rapaces estudiadas mostraron diferencias en la longitud de la bábula, así como en el número de nodos por bábula y en la distancia internodal promedio (Fig. 2). Las especies con las bábulas mayores fueron del orden Strigiformes (*A. flameus*, *T. alba* y *A. otus*). De este mismo orden fueron dos de las tres de menores longitudes (*G. siju* y *M. lawrenci*) aunque la de menor talla de todas fue *F. peregrinum*. Las especies *B. platypterus* y *A. striatus* mostraron variabilidades muy superiores en esta variable. La tendencia general en la cantidad de nodos por barba y la distancia internodal no fue consistente con la tendencia de las longitudes, sino que las especies de

Figura 2: Longitud de la bábula (A), número de nodos por bábula (B) y distancia internodal promedio (C) en las plumas de contorno de 21 especies de aves rapaces cubanas (orden Accipitriformes, Strigiformes y Falconiformes) (Se representa la media, el error estándar y los límites de confianza al 95 %).

Figure 2: Barbule length (A), number of node per barbule (B) and average internodal distances (C) in the contour feather of 21 species of raptor bird species (orders Accipitriformes, Strigiformes and Falconiformes). (Mean, standard error and confidence limits at 95 %).



mayores distancias internodales fueron de la familia Accipitridae. *Chondroierax wilsonii* mostró una cantidad más alta de la tendencia esperada en la cantidad de nodos, con la consecuente reducción de las distancias internodales, aunque su tamaño de muestra fue muy reducido.

Las distancias internodales en la base, centro y extremo de las bárbulas, así como su disminución a lo largo de la estructura no mostró una tendencia consistente con la longitud de la bárbula (Fig. 3), sino que se hallaron

patrones distintos, casi especie específicos. Lo mismo sucedió con las longitudes de la célula basal y del grosor de los nodos (Fig. 4). Cada una de estas variables, por si sola, diferenciaba algunas especies de otras pero no tenían valor identificatorio absoluto al semejarse también con otro grupo de especies. Los valores exactos de los estadísticos descriptivos de cada variable para cada especie se ofrecen en el Anexo 1.

La longitud de la bárbula estuvo correlacionada con todas las demás variables, excepto con el porcentaje de

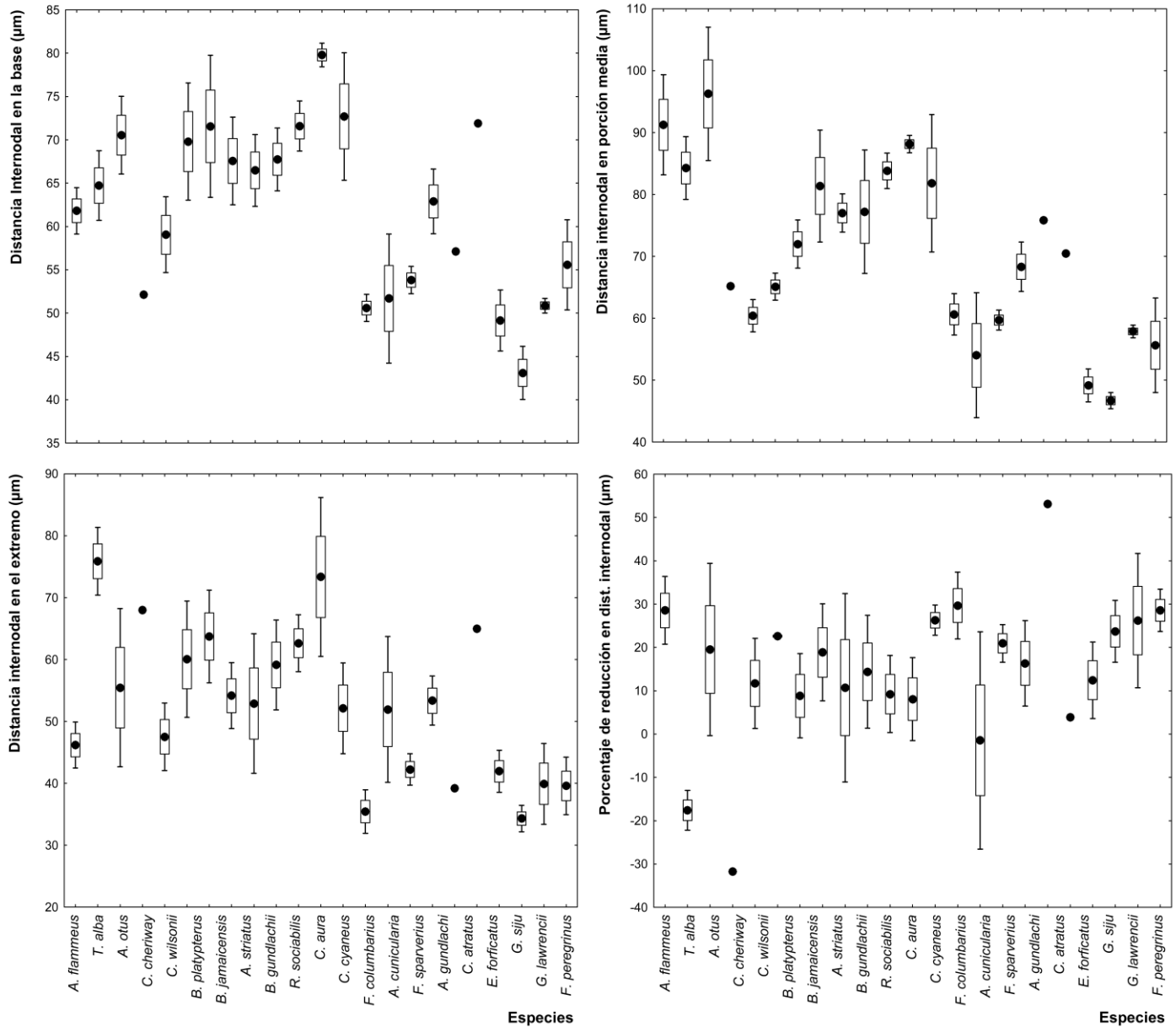


Figura 3. Comparación de las distancias internodales en la base, centro y extremo de las bárbulas, y su disminución longitudinal en porcentaje, en las plumas de contorno de 21 especies de aves rapaces (orden Strigiformes, Falconiformes y Accipitriformes). (Se representa la media, el error estándar y los límites de confianza al 95 %).

Figure 3. Comparison among internodal distances in the base, center and tip of barbules, and its longitudinal diminish expressed in percentage, in feathers of 21 raptor bird species (orders Accipitriformes, Strigiformes and Falconiformes). (Mean, standard error and confidence limits at 95 %).

reducción de la distancia internodal (Tabla 2). Las distancias internodales en las diferentes secciones estuvieron también correlacionadas entre sí y con su reducción a lo largo de de la bárbula. El número de nodos también se correlacionó con su grosor. La longitud de la célula basal no se asoció al grosor de los nodos pero sí a su número y distancia promedio.

El Escalado Multidimensional no Métrico permite explorar el valor identificatorio del patrón resultante a partir del análisis simultáneo de todas las variables analizadas (Fig. 5), que para mejor visualización fue desglosado por subconjuntos de especies, aunque todas están en el mismo espacio de ordenamiento. Las muestras de *R. sociabilis*, *P. haliaetus*, *M. lawrencii* y *A. stygius* no mostraron superposición entre ellas. Las dos primeras de estas especies también se diferenciaron de *F. columbaris*, *A. flammeus* y *B. platypterus*. El resto de las especies mostró niveles de superposición entre los ordenamientos de sus individuos, indicando que tampoco el empleo conjunto de todas las variables medidas en las plumas sería válido para lograr una identificación precisa.

El análisis de agrupamiento entre especies (Fig. 6) mostró la formación de dos grupos, que a su vez se

subdividían en dos grupos menores. Cuatro de las siete especies de rapaces nocturnas estudiadas formaron un único grupo (*A. flammeus*, *A. stygius*, *T. alba* y *A. otus*) quedando dispersos en otros grupos las tres restantes (*G. siju*, *M. lawrencii* y *A. cunicularia*). Las especies dentro de cada grupo tienden a presentar bajas distancias euclidianas entre ellas y los grupos formados son los que tienden a minimizar la varianza interna y maximizarla entre grupos, y podrían exhibir patrones similares en sus variables, pero también los valores de las variables pudieran compensarse entre ellas. Esto queda demostrado por la evaluación estadística de las diferencias por el análisis de varianza por permutaciones (Tabla 3).

El resultado de este análisis rindió una probabilidad de igualdad conjunta de 0,0001 ($F=16,49$). De las 105 comparaciones entre pares de especies, que se pueden establecer con la muestra estudiada, el 62 % (72 parejas) resultaron significativamente distintas teniendo en cuenta todas las variables analizadas simultáneamente, lo que podrían sustentar su capacidad de identificación. Este resultado también mostró que en un mismo grupo del dendrograma, entre especies con muy pequeña distancia euclidea entre ellas, las diferencias podían ser

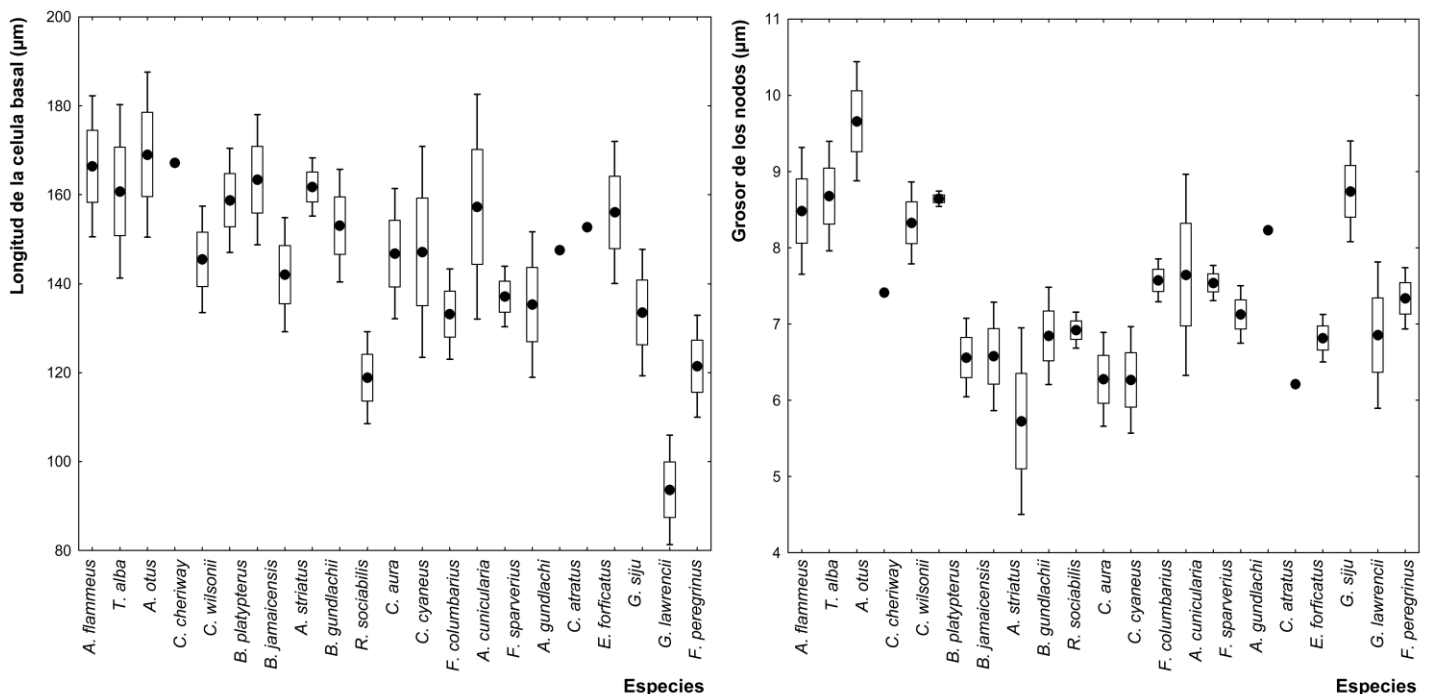


Figura 4. Comparación de la longitud de la célula basal (A) y del grosor de los nodos (B) de las bárbulas, en las plumas de contorno de 21 especies de aves rapaces (orden Accipitriformes, Strigiformes y Falconiformes). (Se representa la media, el error estándar y los límites de confianza al 95 %).

Figure 4. Comparison among basal cell length (A) and node thickness (B) of barbules, in the contour feather of 21 raptor bird species (orders Accipitriformes, Strigiformes and Falconiformes). (Mean, standard error and confidence limits at 95 %).

Tabla 2. Matriz de correlaciones de Pearson entre las variables de la microestructura de las plumas, evaluadas por su capacidad identificatoria de las especies de rapaces estudiadas.

Table 2. Matrix of Pearson's correlations among microstructural variables of feathers, assessed for its species identification capacity among studied raptor birds.

Variables	b	c	d	e	f	g	h	i
a) Longitud de la bábula	0,53*	0,29*	0,24*	0,44*	0,57*	0,34*	0,51*	-0,11
b) No. nodos/ bábula		0,12	0,35*	-0,17*	-0,12	-0,20*	-0,23*	0,08
c) Longitud de la célula basal			0,11	0,20*	0,12	0,14	0,16*	-0,06
d) Grosor de los nodos				-0,15*	0,05	-0,05	-0,07	-0,05
e) Distancia internodal en la base					0,72*	0,66*	0,87*	-0,03
f) Distancia internodal en el medio						0,62*	0,88*	-0,19*
g) Distancia internodal en el extremo							0,87*	-0,72*
h) Distancia internodal promedio								-0,38*
i) Porcentaje de reducción de la dist. internodal								

* Correlaciones estadísticamente significativas (p<0,05)

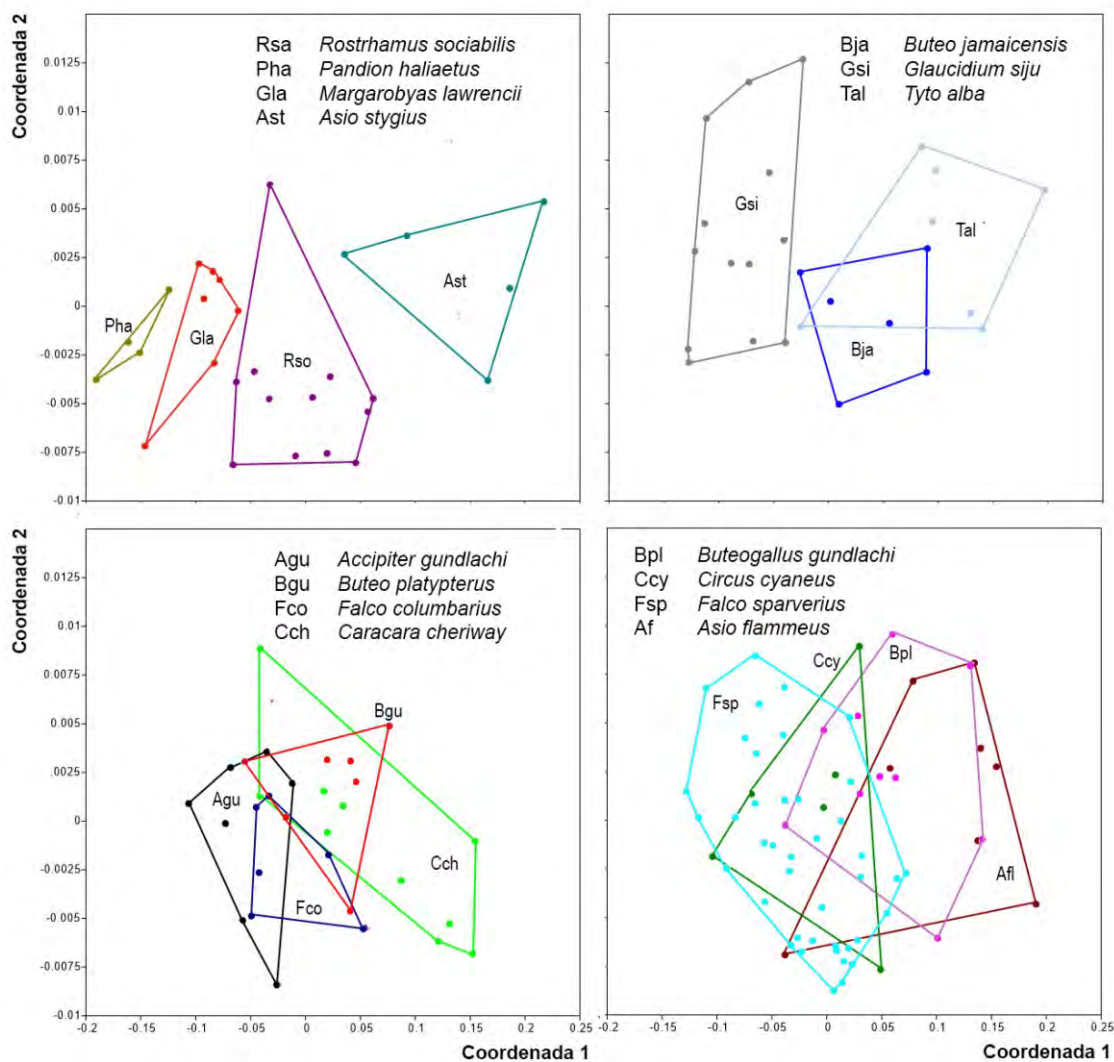


Figura 5. Escalado Multidimensional no Métrico a partir de las distancias euclidianas entre especies de los órdenes Accipitriformes, Falconiformes y Strigiformes, utilizando variables de la microestructura de las plumas de contorno.

Figure 5. Non metric multidimensional scaling representing Euclidean distances among species of orders Accipitriformes, Falconiformes and Strigiformes, using microstructural feather characteristics.

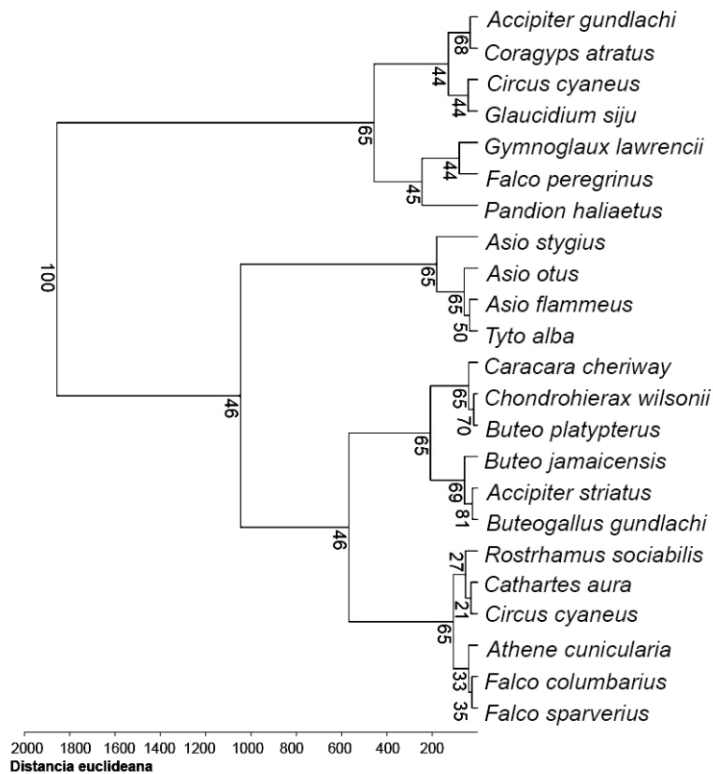


Figura 6. Análisis de agrupamiento de las 23 especies de rapaces estudiadas a partir de los caracteres microestructurales de las plumas de contorno (método de Ward). Los números representan el resultado del *bootstrap* del árbol con 1000 iteraciones. El patrón de agrupamiento tuvo un coeficiente de correlación cofenético de 0,68.

Figure 6. Cluster Analysis of 23 studied raptor bird species from feather microstructural characteristics (Ward's method). Numbers represent the result of a tree bootstrap with 1000 iterations. Grouping pattern achieve a cophenetic correlation coefficient of 0.68.

significativas, a la vez que podían ser semejantes con especies agrupadas en otras ramas.

Un Análisis de Función Discriminante rindió un total de 78,3 % de clasificaciones correctas (Lambda de Wilks= 0,006; $F(108,9) = 8,13$; $p < 0,0001$) y solo una especie (*T. alba*) fue clasificada correctamente al 100%. Tres especies dieron porcentajes de clasificación correcta por debajo del 50 % (*F. columbarius*; *A. gundlachi*; *B. jamaicensis*) y otras cuatro por debajo del 80 % (*C. cheriway*; *B. platypterus*; *C. cyaneus* y *B. gundlachii*). El resto fue superior en este porcentaje. Sin embargo, las variables empleadas están estadísticamente correlacionadas y ello puede influir de manera negativa en este método multidimensional de clasificación u ordenamiento. Por esta razón, y por las otras premisas estadísticas de este método, de difícil cumplimiento o verificación, se optó por desarrollar el CART, cuyo resultado resultó ser significativamente superior en capacidad predictiva.

En el caso de las familias, el árbol de clasificación logró una identificación correcta de la familia a la que pertenecían las plumas, en el 91,3 % de los casos (Anexo 2A). El 100 % de los ejemplares de Pandionidae fueron correctamente identificados. La segunda familia con mayor éxito de identificación fue Falconidae con un 98,2 %, seguida de Accipitridae con un 89,6 % de clasificación correcta. Strigidae fue la familia de peor rendimiento, con 18,2 % de errores de clasificación.

Las reglas de clasificación del CART desarrollado para la identificación de las especies resultaron en un promedio de

81,5 % de clasificaciones correctas por especie (Tabla 4, Anexo 2B), aunque este valor está sesgado por el caso de *F. columbarius* donde la clasificación falló totalmente en los seis individuos muestreados. Si esta se excluye del cálculo, el porcentaje de clasificaciones correctas asciende a 87,3 %. Cuatro de las especies fueron clasificadas correctamente en todos los casos (*A. flammeus*; *C. cyaneus*; *P. haliaetus* y *T. alba*). Solo en *B. jamaicensis* las clasificaciones correctas fueron de la mitad de los casos (50 %), pero en el resto de las especies, estuvieron por encima del 80 % de los ejemplares.

DISCUSIÓN

El análisis de las variables de la morfometría microscópica de la pluma de manera individual mostró que algunas especies poseen valores extremos en algunas de ellas, suficientes para su identificación (por ej. la distancia internodal de *G. siju*, el bajo número de nodos por bárbula en *F. peregrinum* o el marcado cambio en la distancia internodal entre la base y el ápice de las bárbulas en *T. alba*). Sin embargo, en la mayoría de los casos el análisis univariado es insuficiente para identificar la mayoría de las especies y se debe recurrir a métodos multidimensionales, ya que quedaron demostradas las diferencias en la mayoría de las especies según el MANOVA.

Esto no sucede de igual forma con las variables macroscópicas ya que las plumas de las aves presentan marcadas diferencias en la forma, el tamaño y el color, que produce un índice de identificación muy elevado por la vía

Tabla 3. Resultados del MANOVA de clasificación simple por permutaciones, entre las especies de rapaces estudiadas, según las características microestructurales de las plumas de contorno (cuadrante superior: valores de p sin la corrección de Bonferroni; cuadrante inferior: los asteriscos indican diferencias significativas para $p < 0,05$).

Table 3. Simple classification permutational MANOVA results, among studied raptor bird species compared by contour feather microstructural characteristics (upper quadrant: uncorrected p-values; lower quadrant: dots indicate statistical significant differences by $p < 0,05$).

Especies	A.	B.	C.	D.	E.	F.	G.	H.	I.	J.	K.	L.	M.	N.	O.
A. <i>Accipiter gundlachi</i>		0,01	0,00	0,00	0,15	0,02	0,00	0,09	0,10	0,00	0,00	0,00	0,03	0,11	0,00
B. <i>Buteogallus gundlachi</i>	*		0,56	0,19	0,23	0,24	0,20	0,14	0,03	0,00	0,02	0,01	0,00	0,00	0,03
C. <i>Buteo jamaicensis</i>	*			0,48	0,14	0,11	0,45	0,07	0,01	0,01	0,07	0,03	0,00	0,00	0,07
D. <i>Buteo platypterus</i>	*				0,03	0,01	0,75	0,02	0,00	0,00	0,11	0,03	0,00	0,00	0,15
E. <i>Circus cyaneus</i>				*		0,60	0,05	0,81	0,66	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01
F. <i>Rostrhamus sociabilis</i>	*			*			0,02	0,48	0,19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
G. <i>Caracara cheriway</i>	*				*	*		0,04	0,00	0,00	0,22	0,09	0,00	0,00	0,28
H. <i>Falco columbarius</i>				*			*		0,76	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01
I. <i>Falco sparverius</i>		*	*	*			*			0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
J. <i>Pandion haliaetus</i>	*	*	*	*	*	*	*	*	*		0,00	0,01	0,00	0,00	0,00
K. <i>Asio flammeus</i>	*	*			*	*		*	*	*		0,43	0,00	0,00	0,81
L. <i>Asio stygius</i>	*	*	*	*	*	*		*	*	*			0,00	0,00	0,39
M. <i>Margarobyas lawrencii</i>	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*		0,48	0,00
N. <i>Glaucidium siju</i>		*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*		0,00
O. <i>Tyto alba</i>	*	*			*	*		*	*	*			*	*	

comparativa tradicional. Sin embargo, las limitaciones que imponen la necesidad de una muestra lo suficientemente grande, con las plumas características (Brom, 1986), ha impulsado una búsqueda de métodos alternativos de identificación. Los análisis realizados demuestran que se pueden lograr identificaciones parciales o totales con restos de plumas o muestras muy pequeñas que no pueden ser identificadas por otra vía.

Según los resultados obtenidos, las identificaciones correctas se incrementan cuando se emplean clasificadores multivariados, y menores subconjuntos de especies, aunque el porcentaje de clasificaciones correctas osciló entre el 78 % y el 81 % en el nivel de especies y hasta más de un 90% en caso de las familias. Los resultados, sin embargo, son solamente parciales y preliminares, ya que debe tenerse en cuenta que las plumas muestran variaciones en dependencia de la región del cuerpo donde se encuentren (Gilroy, 1987), y las propias barbas pueden variar de acuerdo a la posición de la pluma en el ave y entre regiones de la propia pluma (Dove, 1997). Esto sugiere que los estudios de la microestructura de las plumas aún deben profundizarse mucho más, incluyendo la evaluación de los cambios durante el crecimiento y las posibles diferencias sexuales (registradas por Lee *et al.* (2009) en *Corvus macrorhynchos*).

Las diferencias entre especies, no solo pueden estar reflejando patrones filogenéticos o taxonómicos, sino que pueden estar siendo influidas por las condiciones ambientales. Dove y Agreda (2007) demostraron la correspondencia entre la cantidad y el grosor de estructuras nodales y la capacidad de sumergirse de varias

especies de patos, donde se observó que las especies que más profundo se zambullían presentaban menos bárbulas con nodos expandidos y menos nodos expandidos por bárbula. La capacidad del plumaje de atrapar y retener aire puede ser una inconveniencia ya que el aire atrapado puede ralentizar o dificultar la salida del ave a la superficie, a pesar de que es una ventaja termorreguladora (Podulka *et al.*, 2004). Situaciones similares podrían presentarse en especies de hábitos semiacuáticos, como *Pandion haliaetus* cuyas características separaron a sus plumas del resto de las especies, lo cual pudiera relacionarse con la capacidad de inmersión para la pesca.

La inclusión de otras variables cuantitativas o cualitativas, como la forma de los nodos o la presencia de pigmentos, detectables con microscopios de mayor resolución, pueden ser incluidas en futuros trabajos para mejorar la capacidad identificatoria. En otros estudios estos caracteres han sido importantes para la discriminación entre especies (Dove, 1997).

El uso de la microestructura de las plumas como herramienta taxonómica o para análisis ecológicos es infrecuente y sólo en contados lugares se ha empleado (ej.: Shamoun y Yom-Tov, 1995; Lei *et al.* 2002), no existiendo precedentes en Cuba. Sin embargo, puede constituir un refuerzo para los métodos ornitológicos existentes y extender el estudio de la ecomorfología más allá de la simple descripción de las dimensiones externas de las especies. A pesar del limitado tamaño de muestra, en la presente contribución, se demuestra que este método puede llegar a ser una importante fuente de información y potencialmente permite identificaciones relativamente

Tabla 4. Matriz de confusión del Árbol de Clasificación y Regresión (CART) confeccionado para la identificación de 15 especies de aves rapaces a partir de características microestructurales de las plumas de contorno. La mitad diagonal superior contiene los errores de omisión y la inferior los de comisión.

Table 4. Confusion matrix for the classification tree (CART), build for species identification among raptor bird species using feather microstructural characteristics. Upper half contains the omission errors and the lower half contains comission errors.

Real\Predicha	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	% correcto	Error omisión	Error comisión
A. <i>Asio flammeus</i>	8															100,0%	0	2
B. <i>Accipiter gundlachi</i>		6											1			85,7%	1	1
C. <i>Asio stygius</i>	1		4													80,0%	1	0
D. <i>Buteogallus gundlachi</i>				6		1										85,7%	1	2
E. <i>Buteo jamaicensis</i>		1		1	3		1									50,0%	3	1
F. <i>Buteo platypterus</i>						9	1									90,0%	1	1
G. <i>Caracara cheriway</i>				1		1	8									80,0%	0	0
H. <i>Circus cyaneus</i>								6								100,0%	0	1
I. <i>Falco columbarius</i>									0	6						0,0%	6	0
J. <i>Falco sparverius</i>					1					40						97,6%	0	2
K. <i>Margarobyas lawrencii</i>											6	1				85,7%	1	0
L. <i>Glaucidium siju</i>										2		11				84,6%	0	0
M. <i>Pandion haliaetus</i>													4			100,0%	0	0
N. <i>Rostrhamus sociabilis</i>	1								1					10		83,3%	0	0
O. <i>Tyto alba</i>															7	100,0%	0	0

confiables de las familias en el caso de las aves rapaces, y potencialmente de las especies. Las muestras de plumas de colecciones tienen limitaciones en cuanto a nivel de conservación y a un tamaño de muestra fijo y restringido. Dado que en la actualidad son frecuentes las investigaciones que involucran manipulación de ejemplares, como es el caso de los estudios de anillamiento, la ampliación de este estudio con otras especies posibilitará profundizar en el conocimiento de las aves cubanas.

LITERATURA CITADA

- Brom, T. G. 1986. Microscopic identification of feathers and feather fragments of Palearctic birds. *Bijdragen tot de Dierkunde* 56:181-204.
- Brom, T.G. 1992. Collecting efforts and identification standards in relation to bird strike statistics. *Bird Strike Committee Europe* 21/WP 19:163-174.
- Chandler, A. C. 1916. A study of feathers, with reference to their taxonomic significance. *University of California Publications in Zoology* 13:243-446.
- Christidis, L., J. A. Norman, R. A. Johnson y S. Lindsay. 2006. Forensic identification of aviation bird strikes in Australia. *Australian Transport Safety Bureau, Canberra, Australia*.
- Day, M. F. 1966. Identification of hair and feather fragments in the guts and faeces of stoats and weasels. *Journal of Zoology* 148:201-217.
- Dove, C. J. 1997. Quantification of microscopic feather characters used in the identification of north american plovers. *The Condor* 99:47-57.
- Dove, C. J. 2000. A descriptive and phylogenetic analysis of plumulaceous feather characters in Charadriiformes. *Ornithological Monographs* 51:1-163.
- Dove, C. J. y A. Agreda. 2007. Differences in plumulaceous feather characters of dabbling and diving ducks. *The Condor* 109(1):192-199.
- Dove, C. J., P. G. Hare y M. Heacker. 2005. Identification of ancient feather fragments found in melting alpine ice patches in Southern Yukon. *Arctic* 58(1):38-43.
- Dove, C. J. y S. C. Peurach. 2002. Microscopic analysis of feather and hair fragments associated with human mummified remains from Kagamil Island, Alaska. *Ethnographical Series* 20.
- Garrido, O. H. y A. Kirkconnell. 2000. *Field guide to the birds of Cuba*. Comstock Publishing Associates, New York. 253 pp.
- Gilroy, B. A. 1987. Microscopic variation in plumulaceous barbules of the Rock Dove, *Columba livia* (Aves: Columbidae) [Inédito]. M.Sc. thesis. George Mason University. Fairfax. VA.
- Hargrave, L. L. 1960. Identification of Archeological Feathers from Glen Canyon, Utah. *University of Utah Anthropological Papers* 44.
- Laybourne, R. C. y C. J. Dove. 1994. Preparation of bird strike remains for identification. In *Proceedings and*

- working papers of the Bird Strike Committee Meeting Europe* 22:531-534.
- Laybourne, R., B. A. Sabo y A. Morningstar. 1992. Basic technique for preparation of down for examination with the scanning electron microscope. *Auk* 109:195-197.
- Lei, F., Y. Qu, Y. Gan, A. Gebauer y M. Kaiser. 2002. The feather microstructure of Passerine sparrows in China. *Journal of Ornithology* 143:205-213.
- Podulka, S., R. W. Rohrbaugh y R. Bonney. 2004. *Handbook of bird biology*. Princeton Univ. Press.
- Sabo, B. A. y R. C. Laybourne. 1994. Preparation of avian material recovered from pellets and as prey remains. *Journal of Raptor Research* 28:192-193.
- Shamoun, J. y Y. Yom-Tov. 1995. *The microstructure of feathers of Israeli birds*. Publ. Tel Aviv University. 302 pp.
- Shamoun-Baranes, J. 2002. Expanding the Bird Remains Identification System: An innovative tool for identifying feather remains. Department of Zoology, Tel Aviv University. 1-8.
- Wattel, J. 2000. Which bird? *Amsterdam: International Bird Strike Committee* (IBSC25/WP-I1, 17-21) 411-416.

Recibido el 24 de agosto de 2016 y aceptado el 15 de noviembre de 2016. Editor asociado: Carlos A. Mancina