



**UNIVERSIDAD DE CHILE**  
**FACULTAD DE CIENCIAS VETERINARIAS Y PECUARIAS**  
**ESCUELA DE CIENCIAS VETERINARIAS**



**CAMBIOS HEMATOLÓGICOS EN AVES Y MAMÍFEROS DE  
DISTINTO REQUERIMIENTO ENERGÉTICO Y SU RELACIÓN  
CON LA CAPACIDAD DE DIFUSIÓN DE OXÍGENO EN EL  
PULMÓN**

**CARMEN SONIA DONOSO MOYA**

Memoria para optar al Título  
Profesional de Médico Veterinario  
Departamento de Ciencias Biológicas

PROFESOR GUÍA: MAURICIO CANALS LAMBARRI

**SANTIAGO, CHILE**

**2011**



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS VETERINARIAS Y PECUARIAS  
ESCUELA DE CIENCIAS VETERINARIAS



**CAMBIOS HEMATOLÓGICOS EN AVES Y MAMÍFEROS DE  
DISTINTO REQUERIMIENTO ENERGÉTICO Y SU RELACIÓN  
CON LA CAPACIDAD DE DIFUSIÓN DE OXÍGENO EN EL  
PULMÓN  
CARMEN SONIA DONOSO MOYA**

Memoria para optar al Título  
Profesional de Médico Veterinario  
Departamento de Ciencias Biológicas

NOTA FINAL: .....

	NOTA	FIRMA
PROFESOR GUÍA: MAURICIO CANALS LAMBARRI	-----	-----
PROFESOR CONSEJERO: RICARDO OLIVARES PÉREZ - MONTT	-----	-----
PROFESOR CONSEJERO: ANA MARIA RAMÍREZ KAMANN	-----	-----

SANTIAGO, CHILE

2011

## ABSTRACT

Hematological parameters of birds and mammals seem to respond to environmental requirements, such as hypoxia at high altitude and the energetic demands of locomotion and flight. In this work the hypothesis is that lung capillary hematocrit and red blood size may be influenced by the energetic requirements of flight. Also, propose that hematological parameters should vary together with the morphological parameters that determine oxygen diffusion capacity. The red blood cell size and the local characteristics of the pulmonary capillary hematocrit were analyzed correlating these with the pulmonary factors that determine the oxygen diffusion capacity. In this study were included seven species, non-flying and flying birds and mammals, with different energetic requirements. The capillary hematocrit was not different in each taxon, but the red blood cell size was smaller in flying mammals and birds than non-flying ones. Correlation of erythrocyte size with the diffusing characteristics of the lungs produced a non- phylogenetic clustering with a group constituting by the bats and *Z. auriculata*; revealing similar functional response in unrelated species. Finally, in mammals, a negative correlation between the red blood cell size and the mass-specific oxygen diffusion capacity was obtained. These results suggest that the direction of the hematological and pulmonary adjustments is governed mainly by the requirements of flight independent of phylogenetic origin of the species studied.

## RESUMEN

Los parámetros hematológicos y pulmonares parecen responder a las exigencias ambientales como la hipoxia y la alta altitud y a los requerimientos energéticos de la locomoción. En este trabajo se sometió a prueba la hipótesis que el hematocrito del capilar pulmonar y el tamaño del glóbulo rojo, pueden ser influidos por los requerimientos energéticos del vuelo. También se propuso que los parámetros hematológicos varían en conjunto con los parámetros que determinan la capacidad de difusión de oxígeno. Se analizó el tamaño del glóbulo rojo y las características locales del hematocrito capilar pulmonar, correlacionándolos con los factores pulmonares que afectan la capacidad de difusión de oxígeno. Se analizaron siete especies (aves y mamíferos), de diferentes requerimientos energéticos, corredores y voladores. El hematocrito capilar pulmonar no mostró diferencias significativas en aves ni en mamíferos. El tamaño del glóbulo rojo fue menor en los mamíferos y en aves voladoras con respecto a sus pares no voladores. La respuesta conjunta del glóbulo rojo, la superficie respiratoria y la membrana alvéolo-capilar, mostró un agrupamiento no filogenético, donde se destaca un grupo compuesto por mamíferos y aves de vuelo activo (dos murciélagos: *Tadarida brasiliensis* y *Myotis chiloensis* y la tórtola *Zenaida auriculata*). Finalmente, en mamíferos se obtiene una relación inversa entre la capacidad de difusión de oxígeno y el tamaño del glóbulo rojo. En definitiva, los hallazgos sugieren la existencia de ajustes funcionales hematológicos y pulmonares, como una respuesta conjunta a las exigencias del vuelo, independientes de su origen filogenético.

## ÍNDICE

1. Introducción.....	5
2. Revisión Bibliográfica.....	8
2.1. Características de los eritrocitos.....	8
2.2. Hematocrito.....	9
2.3. Respuestas Hematológicas.....	10
2.4. Características biológicas de las especies estudiadas.....	11
A) Roedores.....	11
B) Quirópteros.....	16
C) Aves.....	20
3. Hipótesis.....	23
4. Objetivo General.....	23
5. Objetivos Específicos.....	23
6. Material y Métodos.....	24
6.1. Modelos Animales.....	24
6.2. Diseño experimental.....	24
6.3 Análisis.....	27
7. Resultados.....	28
8. Discusión.....	39
9. Conclusiones.....	43
10. Bibliografía.....	45

## 1. INTRODUCCIÓN

Los requerimientos energéticos varían de acuerdo al modo de vida, características del hábitat y distribución de cada especie. Esto se traduce en una serie de adaptaciones específicas que se manifiestan como cambios en la fisiología de los individuos que les permitan sobrevivir en su medio ambiente y desenvolverse en él.

Los animales endotermos dependen del metabolismo aeróbico, por lo que el oxígeno es vital desde su adquisición hasta su entrega en los tejidos. Los valores de los parámetros hematológicos de aves y mamíferos responden a las exigencias medioambientales, tales como la hipoxia en la altura y a las exigencias energéticas de la locomoción y el vuelo (Novoa *et al.*, 2003). Por ejemplo, se ha reportado un menor volumen de masa promedio de eritrocitos, para mamíferos pequeños de alta altitud (*Thomomys*), en relación con mamíferos que habitan ambientes a nivel del mar (Lechner, 1976). Del mismo modo Rosenmann y Ruiz (1993), informan que *Abrothrix andinus*, que habita a más de 2.000 m.s.n.m., presenta un alto recuento de glóbulos rojos, alta concentración de hemoglobina en la sangre y disminución significativa del volumen celular durante las temporadas de alto requerimiento energético, mientras que el hematocrito se mantiene constante durante todo el año. Asimismo, el hematocrito de las especies de alta altitud parece ser similar al de especies que habitan en altitudes bajas (Morrison *et al.*, 1963a, 1963b; Rosenmann y Ruiz, 1993). Por otra parte, fetos de ovejas gestantes que habitan ambientes de alta altitud, presentan menor crecimiento fetal y menor peso al nacimiento, que los fetos de hembras de baja altitud, aunque el peso de la placenta es mayor en los fetos de hembras de alta altitud (Parraguez *et al.*, 2005).

En aves, con alta tolerancia a la hipoxia (Novoa *et al.*, 1991), la respuesta hematológica a gran altura todavía es motivo de controversia. Las aves nativas de alta

altitud poseen mayor concentración de hemoglobina, mayor recuento globular y mayor volumen globular aglomerado (VGA), que aquellas de baja altitud (Carey y Morton, 1976; Keys *et al.*, 1986). Sin embargo, otros autores han comunicado valores de parámetros hematológicos similares, pero con diferencias en la afinidad oxígeno-hemoglobina (Black y Tenney, 1980). Carpenter (1975) y Viscor *et al.*, (1985), argumentaron que el hematocrito de las aves se relaciona más con la altitud de vuelo que con su distribución.

Los valores de los parámetros hematológicos no responden a las demandas ambientales y energéticas aisladamente, sino en conjunto con las modificaciones respiratorias y cardiovasculares (Carey y Morton, 1976; Viscor *et al.*, 1985; Viscor y Fuster, 1987).

En relación a las demandas del vuelo, las aves presentan varias adaptaciones tales como, un eficiente sistema de corriente cruzada en su vía aérea, elevado volumen corriente, bajos tiempos de circulación, maximizando la utilización de los factores hematológicos en la adquisición de oxígeno, grandes superficies respiratorias y finas barreras aire-sangre (Maina 1998, 2000a, 2000b; Figueroa *et al.*, 2007). En forma similar los murciélagos muestran numerosos refinamientos en el diseño cardiovascular y respiratorio. Estos incluyen: gran corazón y elevado volumen expulsivo (Canals *et al.*, 2005a; Jürgens *et al.*, 1981), pequeño tamaño de eritrocitos (Wolk y Bogdanowics, 1987; Neuweiler, 2000), altas concentraciones de hemoglobina y alta capacidad de transporte de oxígeno (Wolk y Bogdanowics, 1987); y la optimización de parámetros estructurales del pulmón como volumen pulmonar, densidad de superficie respiratoria y grosor de la barrera alvéolo-capilar (Lechner, 1985; Maina 1998, 2000a, 2000b; Maina *et al.*, 1991; Canals *et al.*, 2005b; Figueroa *et al.*, 2007).

En el pulmón los parámetros hematológicos pueden variar por la particularidad natural del paso de la sangre a través de una compleja red de capilares (Baumgartner *et al.*, 2004) y por las diferencias en la velocidad relativa del plasma y de los eritrocitos (Rapaport *et al.*, 1996; Hsia *et al.*, 1999). Se ha reportado además un aumento progresivo de dos a tres veces la capacidad de difusión pulmonar del reposo al ejercicio (Hsia *et al.*, 1995, 1999).

En esta memoria de título, se propone como hipótesis, que el hematocrito capilar pulmonar y el tamaño del glóbulo rojo, pueden ser influenciados por el requerimiento energético del vuelo. Además, que los parámetros hematológicos pueden variar en conjunto con los parámetros morfológicos, que determinan la capacidad de difusión de oxígeno.

## **2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA**

### **2. 1. Características de los eritrocitos:**

La sangre es un tejido conectivo especializado que se compone de distintos elementos como glóbulos rojos o eritrocitos, glóbulos blancos o leucocitos y plaquetas que se encuentran suspendidos en el plasma. En animales endotermos, la sangre aporta a cada célula agua, oxígeno, electrolitos, nutrientes y hormonas necesarias para su funcionamiento normal y a su vez transporta gases hacia los órganos de excreción.

Los glóbulos rojos de los mamíferos son discos redondos, y levemente bicóncavos, a excepción de los camélidos que tienen glóbulos rojos ovalados (Schmidt-Nielsen, 1997). El diámetro del eritrocito es característico para cada especie, en los mamíferos está entre 5 a 10  $\mu\text{m}$  (Schmidt-Nielsen, 1997), no existiendo relación entre el tamaño corporal y el tamaño del eritrocito. El eritrocito de los mamíferos carece de núcleo, todos los demás vertebrados tienen glóbulos rojos nucleados (Schalm, 1964) y son generalmente ovalados y de mayor tamaño que en los mamíferos.

Su principal función es el transporte de hemoglobina para entregar a los tejidos el oxígeno necesario para su funcionamiento metabólico adecuado. En su interior la hemoglobina está en un ambiente de pH ligeramente más ácido que el plasma, lo que aumenta su eficacia como pigmento respiratorio. Además, el eritrocito contribuye al volumen sanguíneo participando en la dinámica de la circulación sanguínea. Este último, en vertebrados como anfibios, reptiles, aves y mamíferos, en general, representa entre 5 a 10% del peso corporal (Randall *et al.*, 1998).

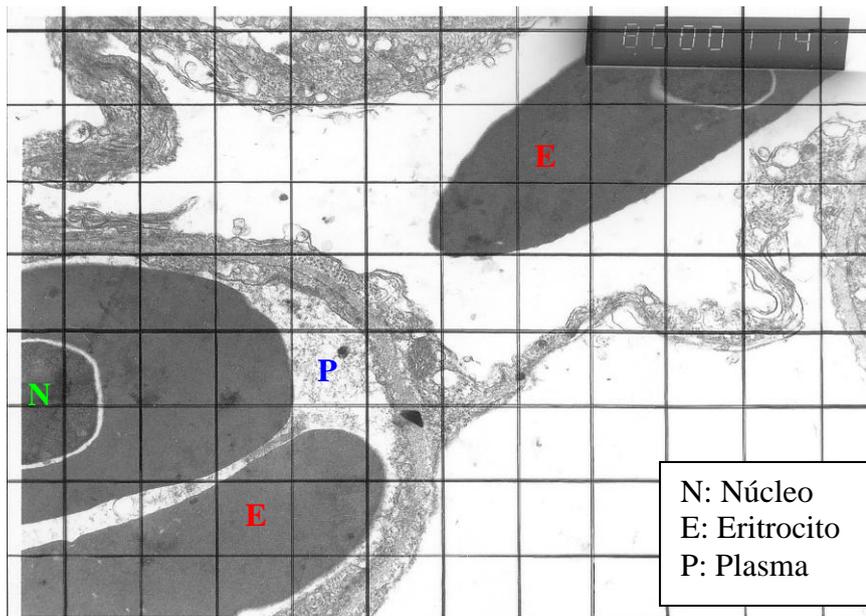
En aves y mamíferos existe una división del corazón y separación entre circulación sistémica y pulmonar, con grandes diferencias de presión entre ambos circuitos. La circulación pulmonar difiere de la sistémica, en que la resistencia total es

menor, la presión sanguínea puede entonces ser más baja y las arterias pulmonares tienen paredes más delgadas (Schmidt-Nielsen, 1997).

## **2.2. Hematocrito:**

El Hematocrito es el método utilizado para obtener el volumen globular aglomerado o VGA. El término hematocrito corresponde al porcentaje de volumen de los eritrocitos en la sangre (Schmidt-Nielsen, 1997; Randall *et al.*, 1998). Este es considerablemente inferior al valor calculado con los datos sobre volumen plasmático y con el hematocrito de la sangre venosa (Schalm, 1964). La sangre de los vasos pequeños arrojan un hematocrito capilar inferior a la del corazón o los grandes vasos (Schalm, 1964; Randall *et al.*, 1998). Por ejemplo, se han encontrado los siguientes valores de hematocrito en diversos órganos y tejidos del perro, con hematocrito de sangre venosa de 43%; bazo, 80%; hígado 40%; pulmones, 35%; corazón y músculos esqueléticos, 20-25%; riñón, vías gastrointestinales y cerebro 15-20 % (Schalm, 1964).

El método común para la determinación del hematocrito es el Hematocrito de *Wintrobe* (Schalm, 1964), sin embargo, existen otras técnicas como el microhematocrito, cuyas ventajas son obtener valores de volumen globular más exactos y constantes, menor tiempo de obtención de resultados y menor cantidad de sangre requerida para la muestra. El hematocrito es un procedimiento exacto y práctico para medición del hematocrito venoso o capilar (Schalm, 1964). Además, existen parámetros morfométricos para la determinación del hematocrito, a través de microscopía electrónica por métodos estereológicos. A través de conteo de puntos aleatorios que caen sobre los eritrocitos (Pe) y sobre el plasma (Ppl) podemos estimar el hematocrito intracapilar mediante la fórmula (Figura 1):  $Hc = Pe / (Pe + Ppl) = Pe / Pc$  (Weibel, 1970/1971).



**Figura 1.-** Glóbulos rojos en el capilar pulmonar de un ave (8.000X).

### **2.3. Respuestas Hematológicas:**

Las diferentes exigencias metabólicas entre los individuos se relacionan en gran medida al ambiente en que se desarrollan y al tipo de actividad que estos desempeñan. El tamaño corporal, el vuelo y la altitud, influyen en los requerimientos energéticos de los individuos (Canals *et al.*, 2005b; Schmidt-Nielsen, 1997).

En ambientes de alta altitud, la presión parcial de oxígeno ( $pO_2$ ) disminuye como consecuencia de la disminución de la presión barométrica (Novoa *et al.*, 2003).

La presión crítica de oxígeno ( $P_c$ ), puede ser modificada por varios factores tanto exógenos como endógenos, entre ellos el  $pO_2$  ambiental, la temperatura ambiente, el efecto de ésta sobre la temperatura corporal y el consumo de  $O_2$ . La  $P_c$  se relaciona con el hábitat de los animales, por ejemplo, animales que viven en ambientes con altas presiones parciales de oxígeno, tienen mayor metabolismo que aquellos que habitan ambientes con menor  $pO_2$  (Novoa *et al.*, 2003).

En murciélagos y mamíferos no voladores se observa una buena correlación entre el diámetro de los eritrocitos y el tamaño corporal en ambos grupos. Mientras más pequeño el animal, más pequeños serán los glóbulos rojos (Jürgens *et al.*, 1981). Una correlación inversa entre tamaño y número de eritrocitos se ha reportado previamente en peces, anfibios, mamíferos y reptiles, lo que lleva a concluir que esta relación es común para los vertebrados (Ruiz *et al.*, 1993).

Las aves nativas de alta altitud poseen mayor concentración de hemoglobina, mayor recuento globular y mayor porcentaje de hematocrito que aquellas de baja altitud, Carey y Morton (1976), han reportado porcentajes de hematocrito en general sobre 50% para aves salvajes. Sin embargo, en las aves otros factores afectan también estos parámetros, como es el nivel de actividad y la deshidratación durante el vuelo, las bajas temperaturas ambientales e incluso diferencias sexuales en los niveles de hemoglobina y hematocrito, que podrían tener relación con la temporada reproductiva (Novoa *et al.*, 2003).

Finalmente, a nivel hematológico, aves y mamíferos comparten rasgos semejantes. Especies de alta y de baja altitud presentan valores similares en la mayoría de los parámetros hematológicos, sin embargo, en ambos grupos la afinidad de la hemoglobina por oxígeno parece jugar un rol preponderante, ya que generalmente es mayor en especies de altura (Novoa *et al.*, 2003).

#### **2.4. Características biológicas de las especies estudiadas:**

##### **A) ROEDORES:**

Son el orden de mamíferos más abundante. Se caracterizan por presentar dos dientes incisivos en el maxilar inferior, con un amplio espacio entre éstos y los molares, que les permiten roer (Muñoz-Pedrerros, 2000).

a) *Abrothrix andinus* (Laucha Andina).



<http://www.fotonaturaleza.cl/data/media/2/raton-andino.jpg>

**Figura 2.-** *Abrothrix andinus*

**Biología y fisiología:** Es un roedor de pequeño tamaño (Figura 2). En condiciones de exposición al frío y con baja calidad de alimento, ocurren cambios rápidos en la morfología de su tracto digestivo. En su ambiente natural aumenta tanto su metabolismo energético peso independiente, como el tamaño de sus cámaras digestivas, en fase con los meses de invierno, posiblemente por un mecanismo compensatorio de alta plasticidad que impide un desbalance de materia y energía. De esta forma el alto costo metabólico bajo condiciones invernales, se compensaría con el alto consumo de alimento, asociado al gran desarrollo de las cámaras digestivas, a los altos requerimientos de energía y/o a la baja calidad de la dieta. Así durante el invierno presenta una significativa disminución de la masa corporal (Muñoz-Pedrerros, 2000).

**Distribución:** Se distribuye desde la IV Región hasta la Región Metropolitana.

**Hábitat:** Zonas andinas arenosas o rocosas con vegetación baja, alta altitud, entre los 3.500 y 4.600 msnm, es un visitante ocasional del matorral esclerófilo del centro de Chile (Canals *et al.*, 2005b).

**b) *Abrothrix olivaceus*** (Laucha Olivácea).



[http://www.fotonaturaleza.cl/data/media/2/IMG\\_0162\\_2.jpg](http://www.fotonaturaleza.cl/data/media/2/IMG_0162_2.jpg)

**Figura 3:** *Abrothrix olivaceus*.

**Biología y fisiología:** Pequeño roedor, su cola es más pequeña que su cuerpo, tiene orejas pequeñas y ojos medianos, su pelaje es fino, de color grisáceo, pesa  $30,3\text{g} \pm 3,0\text{g}$  (Figura 3).

**Distribución:** Se encuentra en el norte y centro de Chile, desde Tarapacá (I Región) a Tierra del Fuego (XII Región).

**Hábitat:** Praderas, montes, bosques y áreas pedrosas desde 2.500 msnm (Canals *et al.*, 2005b).

**Comportamiento:** Es omnívoro. Se alimenta de frutos que caen de los árboles (Peumo, Belloto), insectos u otros invertebrados. Invade las construcciones humanas rurales, atacando las siembras de granos y sus depósitos. Se mimetiza con el ambiente cuando se siente perseguido; entre sus reacciones de defensa destacan reflejos automáticos de muerte simulada (inmovilización). Su mayor actividad diurna es en verano (45%), disminuyendo en otoño y haciéndose mínima en invierno (27%). Prefiere cuevas subterráneas, áreas protegidas o bajo grandes rocas (Muñoz-Pedrerros, 2000).

c) *Phyllotis darwini* (Lauchón Orejudo de Darwin).



<http://www.ecuadorciencia.org/images/zoologia/phyllotis-darwini2.jpg>

**Figura 4.-** *Phyllotis darwini*.

**Biología y fisiología:** Roedor robusto con cola larga, ojos y pabellones auriculares grandes (más de 20 mm). Molares bajos. El pelaje es largo y sedoso con un claro dominio de los pigmentos de color café. El dorso es de tonalidad bruna con importancia variable de las eumelaninas negras, según edad y subespecie. En general, los juveniles son grisáceos y los adultos café-ocres. El pecho y abdomen son muy claros, amarillentos u ocráceos. En el matorral esclerófilo de Santiago los adultos pesan  $61,5 \pm 3,1$ g (Figura 4).

**Distribución:** Perú, Bolivia y Argentina. En Chile, desde Tarapacá (I Región) hasta Malleco (IX Región), desde el nivel del mar hasta 4.800 m de altitud.

**Hábitat:** Vive siempre en zonas con vegetación baja.

**Comportamiento:** Es de gran actividad nocturna, por su capacidad de correr, trepar a las ramas y desplazarse en un amplio radio de acción. Su tracto intestinal está adaptado para una gran variedad de alimentos. De gran actividad y extenso radio de acción. Es un animal de gran vivacidad y velocidad de reacción. Busca la protección de piedras y rocas. Posee estrategias termorreguladoras conductuales, condicionadas por su pequeño

tamaño (alto gasto de energía / peso-específico), hábitat climáticamente variable, condición de especie no migratoria, buena oferta alimentaria que permite la coexistencia intraespecífica. Estas estrategias conductuales le impulsan a agruparse y construir nidos en condiciones de baja temperatura. Por el contrario, no se agrega ni ocupa nidos a temperaturas altas. Construye un nido esférico de fibras vegetales en una rendija rocosa, que le sirve además de refugio para los adultos. Suele ocupar galerías abandonadas de Cururo (*Spalacopus cyanus*) y Degu (*Octodon degus*).

El período reproductivo se presenta entre agosto y febrero en Fray Jorge y entre septiembre y marzo en Concepción. El tamaño de camada fluctúa entre cuatro y ocho crías. En el matorral esclerófilo se establece una densidad promedio de 20,7 ind/há, donde es el micromamífero más abundante. Es una especie esencialmente herbívora, pero en primavera consume una pequeña porción de insectos, la que incrementa en verano. Fuertemente depredado, aparecen sus restos en forma muy frecuente en regurgitados de aves rapaces nocturnas (Lechuza Común, *Tyto alba* y Pequeño, *Athene cunicularia*) y en heces de Zorros (*Pseudolapex spp*). También, es consumido por el Quique (*Galictis cuja*). Es parasitado por el oxiurido *Syphacia phyllotios*. Su éxito en hábitat xéricos pareciera explicarse, no sólo por adaptaciones etológicas y ecológicas, sino que también por especializaciones fisiológicas eficientes en la conservación de agua corporal (evaporación pulmocutánea: 2,34 mg H<sub>2</sub>O/g·h). Posee una capacidad de concentración renal que implica un alto grado de especialización fisiológica de la vía renal (concentración urinaria mínima 850 mOsm/kg). Su estado de conservación es sin problemas (Muñoz-Pedrerros, 2000).

**Subespecies:** Existen unas ocho subespecies, cuatro de ellas en Chile: *Phyllotis darwini rupestris*, *Phyllotis darwini darwini*, *Phyllotis darwini boedeckeri* y *Phyllotis darwini fulvescens*. *P. d. rupestris*, se distribuyen en el sur de Perú, suroeste de Bolivia, oeste de

Argentina; en Chile entre la Primera Región y las provincias de El Loa y Antofagasta (II Región); *P. d. darwini*, desde la Provincia de Choapa (IV Región) hasta la Región Metropolitana. *P. d. boedeckeri* ha sido capturado en las provincias de Cauquenes (VII Región) y Ñuble (VIII Región); *P. d. fulvescens* en la provincia de Malleco (IX Región) (Mann, 1978).

## B) QUIRÓPTEROS:

El nombre Chiroptera significa literalmente "manos aladas". Únicos mamíferos que tienen la capacidad de volar y además desenvolverse sin ningún problema en la oscuridad, gracias a un sistema de radar que se los permite. Son los conocidos murciélagos, que en Chile son pequeños y se alimentan de insectos o sangre.

### a) *Myotis chiloensis* (Murciélago Oreja de Ratón).



[http://3.bp.blogspot.com/\\_ymTzcYSL6Bw/R2Fa-0HkLyI/AAAAAAAAA4/pqCk4kg6ngg/s1600/myotis+chiloensis.jpg](http://3.bp.blogspot.com/_ymTzcYSL6Bw/R2Fa-0HkLyI/AAAAAAAAA4/pqCk4kg6ngg/s1600/myotis+chiloensis.jpg)

**Figura 5.-** *Myotis chiloensis*.

**Biología y fisiología:** Pertenece a la familia Vespertilionidae. Es un murciélago pequeño, endémico de Chile, aproximadamente de 9 cm de largo y 6 g de peso corporal (Mann 1978, Gantz y Martínez, 2000). Entre las características craneanas cobran especial importancia diagnóstica los 38 dientes, cuyo número es el máximo que aparece en los murciélagos. En el sedoso pelaje de este pequeño murciélago chileno, predominan pigmentos brunos y ocre, del grupo de las feomelanina. El color de los especímenes varía entre límites muy amplios de acuerdo con las condiciones

ambientales de su área de vida. Su cola larga se encuentra incluida totalmente en el uropatagio (Figura 5).

**Distribución:** *Myotis chiloensis* se distribuye a lo largo de todo Chile continental, desde la frontera con el Perú hasta el estrecho de Magallanes (Mann, 1978). Endémico de nuestro país, *M. ch. atacamensis* se distribuye desde el sur del Perú y norte de Chile, hasta la IV Región. *M. ch. chiloensis* desde la IV hasta la XII Región.

**Hábitat:** Se encuentra en vegetación cercana a cursos de agua, en zonas áridas (*M. chiloensis atacamensis*) y semiáridas o en matorrales, sabanas y bosques húmedos preferentemente en zonas costeras del sur de Chile (*M. chiloensis chiloensis*). Se supone que es bastante abundante en Tierra del Fuego, pero sus hábitos nocturnos y su presencia en el bosque, hacen que no haya un gran volumen de información acerca de esta especie.

**Comportamiento:** Su actividad diaria se traduce en un período de alimentación y vuelo de tres horas, y otro de permanencia en su refugio de aproximadamente 21 horas. Durante el día se refugia en las fisuras de la corteza de los árboles, techos de construcciones y cuevas rocosas en la zona costera del área septentrional de su distribución. Debido a su reducido tamaño corporal y una tasa metabólica más baja que la línea de la endotermia, caería en sopor diariamente. Posee superficies alares cortas y anchas (baja carga alar), lo que se traduce en un vuelo lento y de alta maniobrabilidad. Esto facilita la captura de sus presas en vuelo. La dieta es exclusivamente insectívora, depredando en el sur de Chile preferentemente sobre dípteros del grupo Nematocera. Ponen una sola cría (característica propia del género).

**Subespecies:** Chile posee dos subespecies: *M. ch. atacamensis*, actualmente reconocida como especie plena y *M. ch. chiloensis*. *M. ch. chiloensis* es clasificada como de Menor

Riesgo casi amenazado, es decir se aproxima a ser Vulnerable. *M. ch. atacamensis* es clasificada como Vulnerable (Gantz y Martínez, 2000).

b) *Tadarida brasiliensis* (Murciélago Coludo).



[http://www.ifcc.cl/webfm\\_send/58](http://www.ifcc.cl/webfm_send/58)

**Figura 6.-** *Tadarida brasiliensis*.

**Biología y fisiología:** Pertenece a la Familia Molossidae, es un microquiróptero neotropical de tamaño grande, con un tamaño de 105 mm y un peso promedio de 13,8 g. Tiene como característica, el extremo de su cola liberado de la membrana uropatagial; de ahí el nombre de murciélago de “cola libre”. El pelaje es corto y sedoso, de un color general café oscuro grisáceo. La longitud total de este murciélago puede llegar a 95 mm, donde la cola mide hasta 36 mm (Figura 6).

**Distribución:** Se distribuye en la región neotropical, está presente en Centro América (de Costa Rica al sur) y Sudamérica hasta Chile y Argentina. En Chile se distribuye desde Arica hasta Valdivia.

**Hábitat:** Se caracteriza por estar fuertemente relacionado con el hombre, usualmente coloniza edificios urbanos (Canals *et al.*, 2005b; Gantz y Martínez, 2000; Mann, 1978), vive en los tejados y piezas abandonadas, también en árboles huecos y cuevas, desde la

costa hasta los 1.000 msnm en la Cordillera de los Andes. *T. brasiliensis* ha sido reportado volando sobre los 3.000 msnm durante migración (Canals *et al.*, 2005b).

**Comportamiento:** Mamífero de hábitos notablemente gregarios, es frecuente en ciudades y poblados. Es un murciélago social, que se caracteriza por formar grandes colonias, que pueden llegar a 154.000 individuos en una caverna, en Colorado, Estados Unidos. Son principalmente insectívoros aunque en cautiverio pueden adquirir hábitos frugívoros. Su dieta consiste en pequeñas polillas y escarabajos, los que atrapa al vuelo en áreas abiertas. Las hembras dan a luz una cría, entre agosto y noviembre. Cae en sopor durante los meses de invierno, en el centro y sur de Chile, probablemente por las bajas temperaturas ambientales y/o la baja disponibilidad de insectos durante el período invernal. También presenta adaptaciones morfológicas y fisiológicas (mantención de caracteres primitivos en las extremidades posteriores), que le permiten una locomoción cuadrúpeda, siendo esta característica, distintiva para esta especie. Sus alas son angostas y largas lo que representa una adaptación para vuelos directos de alta velocidad y baja maniobrabilidad. Estas características de vuelo le permiten desplazamientos migratorios y/o moverse desde las zonas de descanso hasta sus lugares de alimentación. Vuela grandes distancias durante su alimentación nocturna, aunque permanece períodos breves de tiempo en vuelo. El establecimiento de las poblaciones de *T. brasiliensis* en hábitat xéricos, se posibilita por presentar adaptaciones de la estructura renal, que le permiten mayores concentraciones de orina, conservando mejor el agua corporal. Presentando además mayor tolerancia a la privación hídrica, reduciendo la pérdida de agua por evaporación durante el descanso y vuelo, al seleccionar lugares de reposo más fríos y húmedos (Gantz y Martínez, 2000).

### C) AVES:

#### a) *Nothoprocta perdicaria* (Perdiz).



<http://www.avesdechile.cl/0jpgn/064.jpg>

**Figura 7.-** *Nothoprocta perdicaria*.

**Biología y fisiología:** Ave de tamaño mediano (30 cm de largo, 410 g de peso corporal), corpulenta, de color café grisáceo, con alas cortas y casi sin cola (Figura 7).

**Distribución:** Desde el río Huasco a Llanquihue.

**Hábitat:** Matorrales y pastizales.

**Comportamiento:** Prefiere caminar a volar, pasa gran parte del tiempo entre los matorrales y pastizales. Vuela sólo cuando se siente amenazada, haciéndolo a distancias cortas y baja altura, mientras lanza gritos fuertes y repetidos. Se alimenta de semillas, frutos secos e insectos. Se reproduce en primavera, construyendo un nido en el suelo, bajo arbustos espesos en los que pone ocho a diez huevos de color café oscuro brillante. El macho los incuba. Los polluelos son autófalos, salen a días de nacidos del nido para seguir a los padres y alimentarse por sí solos. Su estado de conservación es sin problemas. Esta ave es endémica de Chile (Hoffmann y Lazo, 2002).

b) *Zenaida auriculata* (Tórtola).



<http://www.ricardomollerjensen.com/data/media/59/328--Torcaza-Zenaida-auriculata-Venado-Tuerto-10-2008-2-b.jpg>

**Figura 8.-** *Zenaida auriculata*.

**Biología y fisiología:** Paloma de tamaño mediano (26-27 cm de largo, 150 g de peso), de color gris con manchas negras (Figura 8).

**Distribución:** Desde Arica a Tierra del Fuego. Es muy abundante en Chile central, desde la costa hasta la cordillera.

**Hábitat:** Zona costera, valles, campos y bosques hasta unos 2.000 msnm.

**Comportamiento:** Es frecuente en jardines y calles arboladas. Generalmente se le encuentra en parejas o bandadas pequeñas. El período reproductivo coincide con el inicio de la primavera hasta mediados de verano. Durante estos meses, lleva a cabo dos y hasta tres posturas de dos huevos cada una. Anida generalmente en arbustos o árboles bajos, cercanos a una fuente de agua, construyendo una base de palitos muy básica. Los huevos son blancos, lisos, y de tamaño promedio de 29 x 22 mm. A comienzo del otoño, cuando los pichones ya vuelan, se pueden ver grandes bandadas familiares de hasta 200 pájaros cruzando los campos de un lugar a otro en busca de su alimento, consistente principalmente en semillas que encuentran en el suelo. Es un ave de vuelo

rápido, con gran capacidad de maniobrabilidad y muy desconfiada. Su estado de conservación es sin problemas (Hoffmann y Lazo, 2002).

### **3. HIPÓTESIS**

Los parámetros hematológicos (tamaño y concentración de glóbulos rojos) de aves y mamíferos, cambiarán de acuerdo a las exigencias energéticas impuestas por su modo de vida y lo harán en conjunto con los parámetros pulmonares.

Según esto se puede predecir que:

Las aves y mamíferos voladores (de alta exigencia energética), deberían tener una mayor concentración de glóbulos rojos en el capilar pulmonar y glóbulos rojos de menor tamaño que aquellos no voladores (de baja exigencia energética), y esto se asociará a una mayor capacidad de difusión de oxígeno.

### **5. OBJETIVO GENERAL**

1. Estimar y comparar los parámetros hematológicos en aves y mamíferos de distinto requerimiento energético.
2. Relacionar los parámetros hematológicos con parámetros morfológicos pulmonares asociados a la difusión de oxígeno.

### **6. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

1. Determinar el tamaño de los glóbulos rojos según longitud y diámetro en las distintas especies.
2. Determinar el VGA (hematocrito) capilar pulmonar, con el método de conteo de puntos en las distintas especies.
3. Relacionar los hallazgos hematológicos con las características pulmonares de las especies analizadas.

## 7. MATERIAL Y MÉTODOS

### 7.1. Modelos animales:

En este estudio se trabajó con cinco especies de mamíferos:

a) No voladores (3): *Abrothrix andinus* (masa corporal =  $25,5 \pm 1,9$  g), *Abrothrix olivaceus* (masa corporal =  $26,3 \pm 2,0$  g), *Phyllotis darwini* (masa corporal =  $75,36 \pm 4,96$  g).

b) Voladores (2): *Tadarida brasiliensis* (masa corporal =  $11,3 \pm 0,5$  g) y *Myotis chiloensis* (masa corporal =  $6,0 \pm 0,10$  g.).

Y con dos especies de aves: *Zenaida auriculata* (voladora) (masa corporal =  $141,1 \pm 1,55$  g) y *Nothoprocta perdicaria* (masa corporal =  $398,33 \pm 11,70$  g) (de vuelo ocasional).

Las aves y roedores utilizados en este estudio fueron capturados con trampas Sherman o redes de niebla y transportados inmediatamente al laboratorio durante la primavera y el verano. Los murciélagos fueron donados por el Instituto de Salud Pública de Chile.

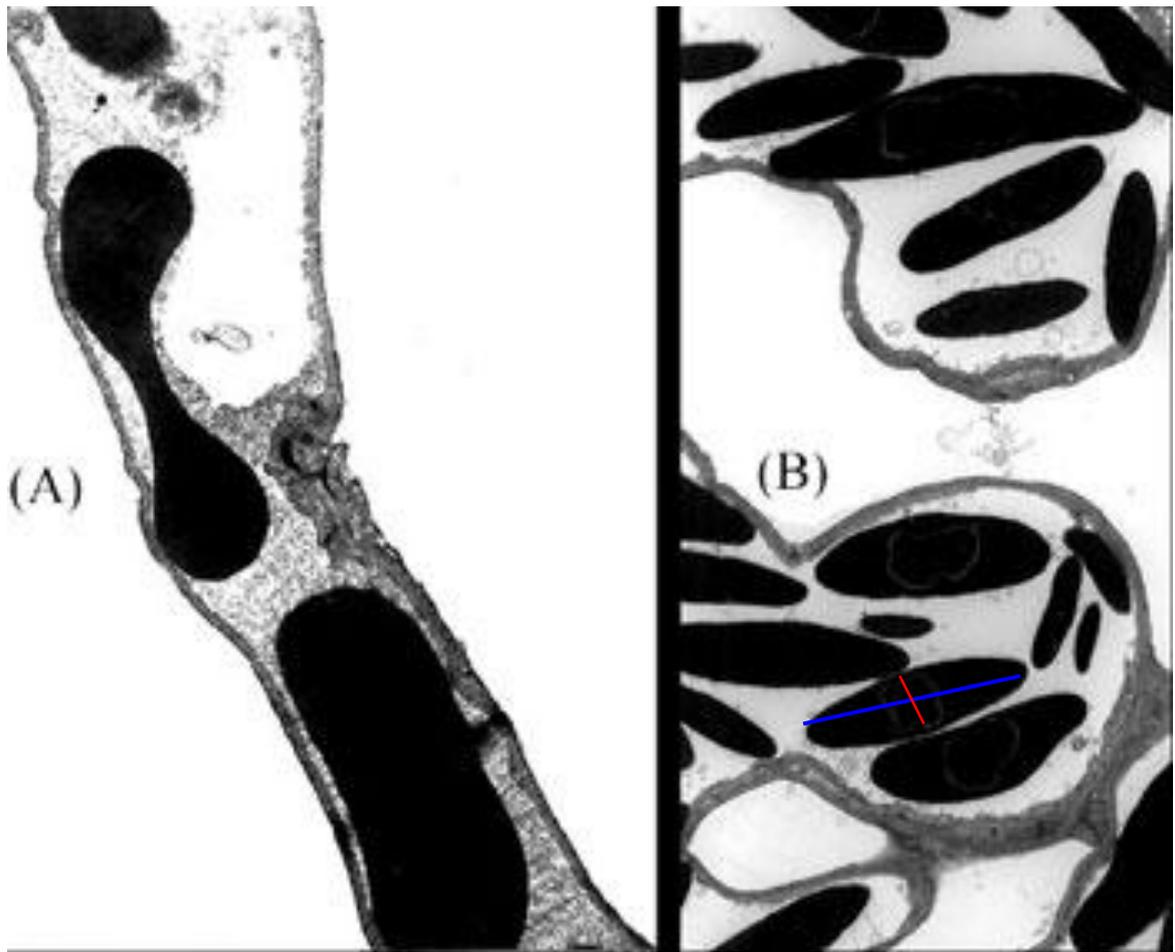
### 7.2. Diseño experimental:

Se capturaron 3 animales adultos de cada especie durante la misma época del año. Los animales se pesaron y luego fueron sacrificados mediante la exposición a una cámara de 100% CO<sub>2</sub> o por una sobredosis de anestésico por inyección intraperitoneal según las normas del Comité de Ética de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Chile. La tráquea cervical fue canulada y se realizó una incisión caudal al xifoesternón, puncionando cuidadosamente el diafragma a cada lado de la línea media, produciendo un neumotórax y colapso pulmonar. Los pulmones fueron fijados *in situ* mediante una perfusión intratraqueal por gravedad, con glutaraldehído al 2,3%, en buffer fosfato pH 7.4. Cuando la solución fijadora rebasó el nivel de la tráquea, se realizó una ligadura

craneal a la cánula, e inmediatamente después los pulmones fueron removidos y sumergidos en fijador (glutaraldehído 2,3%) a 4° C, por un mínimo de dos horas.

Para el estudio de microscopía electrónica de transmisión (MET), se realizaron cortes de pulmón de cada lóbulo, de los que se obtuvieron trozos pequeños de 1 a 2 mm de espesor, que fueron lavados por un mínimo de dos horas en una solución buffer a 4°C, y fijados en tetróxido de osmio al 1%, por 1 hora a 4°C. Luego el tejido fue deshidratado en alcohol de graduación creciente (comenzando al 30%), previo a la infiltración y embebimiento en epon, construyendo cubos de 2 a 3 mm<sup>3</sup>, de los cuales se obtuvieron cortes semifinos de 1µm, teñidos con azul de toluidina al 1%. De ellos se obtuvieron cortes finos de 60-90 nm de grosor, montados en grillas de 200 *Mesh* y contrastados con citrato de plomo. Los cortes semifinos se fotografiaron a través de microscopio óptico, y los cortes finos se fotografiaron a través de MET a distintas magnificaciones con el fin de observar adecuadamente las estructuras.

La estimación del hematocrito del capilar pulmonar se hizo mediante el sistema de conteo de puntos considerando la fórmula propuesta por Weibel (1970/1971) en las imágenes que mostraban los capilares pulmonares, como  $H_{to} = p_e / (p_e + p_l)$ , donde  $p_e$  y  $p_l$  son el número de puntos de una grilla donde intersectan los eritrocitos y el plasma, respectivamente. Asimismo, el diámetro ( $D_e$ ), y la longitud del eje transversal de los eritrocitos ( $T_e$ ), se midió utilizando un *software* de medidas morfométricas (*Scion Image*<sup>TM</sup>). Para los efectos prácticos, el diámetro se definió como la longitud del eje mayor siguiendo la curvatura de la célula y el eje transversal, trazado perpendicularmente al punto medio del diámetro (Figura 9).



**Figura 9.-** Capilar pulmonar y glóbulos rojos, (A) el murciélago *Tadarida brasiliensis* (7.000X) y (B) la perdiz *Nothoprocta perdicaria* (1.500X).

### 7.3. Análisis

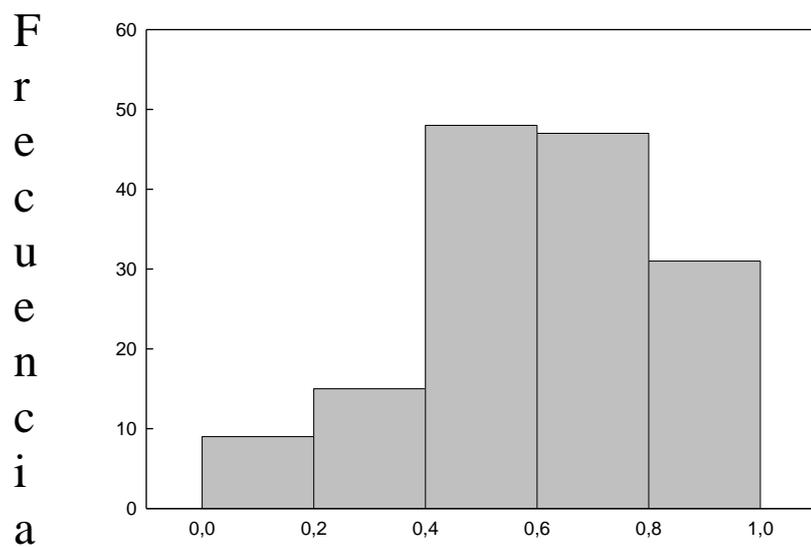
Los datos de Hematocrito y tamaño de los glóbulos rojos de mamíferos y aves fueron analizados mediante pruebas de *Kruskall-Wallis* y *Wilcoxon-Mann-Whitney*, respectivamente. La distribución de frecuencias de los valores de hematocrito (es decir, número de capilares con un hematocrito particular), entre las especies estudiadas se comparó con una prueba de  $\chi^2$  para ambos taxones.

Para explorar las posibles relaciones entre parámetros pulmonares y hematológicos, los datos presentes de diámetro de glóbulos rojos y los datos publicados de densidad de superficie respiratoria y grosor de la barrera alvéolo-capilar de los mismos individuos de cada especie (Canals *et al.*, 2005b, Figueroa *et al.*, 2007), fueron analizados por medio de análisis de *cluster* y análisis de componentes principales basado en valores estandarizados para cada taxón (aves y mamíferos). La relación entre el tamaño de los glóbulos rojos y la capacidad de difusión masa-específica de oxígeno de la barrera aire-sangre ( $D_L O_2 / M_b$ ) se estudió con análisis de correlación y regresión.

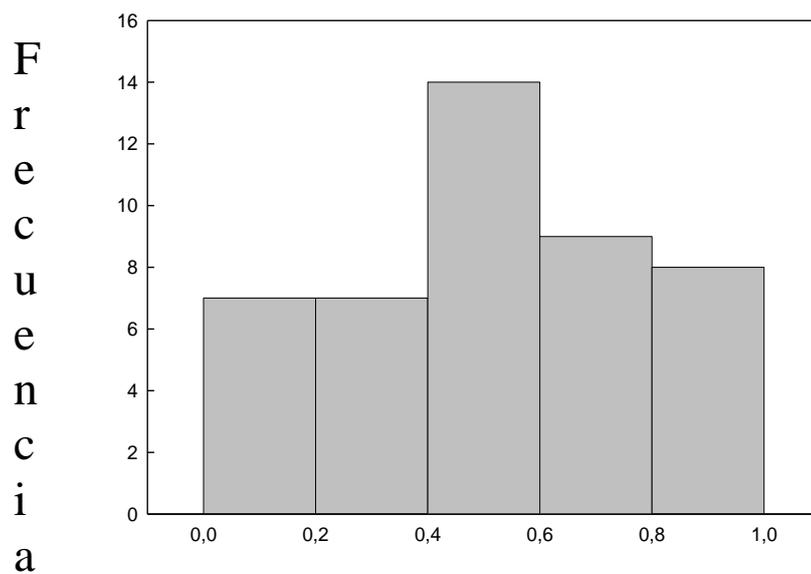
## 8. RESULTADOS

No se encontraron diferencias estadísticas en el hematocrito capilar pulmonar ( $\chi^2_4 = 6,67$ ;  $P = 0,155$  y  $Z = 0,567$ ;  $P = 0,564$  en *Kruskall-Wallis* y en las pruebas de *Wilcoxon*, en mamíferos y aves, respectivamente) (Tabla 1). Sin embargo, en las aves se encontró una distribución más simétrica que en mamíferos ( $\chi^2_{20} = 41,05$ ;  $P = 0,0037$ ; Figura 10). Si bien los mamíferos tienen una asimetría negativa en la frecuencia de la distribución capilar de hematocrito (-0,47 en promedio), las aves no mostraron asimetría (0,0032). En ambos grupos taxonómicos, las distribuciones de frecuencia en las especies fueron marginalmente diferentes ( $\chi^2_{12} = 20,71$ ;  $P = 0,06$  y  $\chi^2_4 = 8,51$ ;  $P = 0,07$  en mamíferos y aves, respectivamente), aunque esto no tuvo una clara relación taxonómica. Considerando el segmento de capilar individual como unidad de estudio, el rango de hematocrito capilar pulmonar osciló entre 0 y 99% en los mamíferos y entre 0 y 89% en las aves.

## Mamíferos



## Aves



**Figura 10.-** Histograma de frecuencias del hematocrito (VGA) capilar pulmonar en mamíferos y aves. Todos los intervalos del mismo largo, desde 0 a 100 % de hematocrito (VGA): 1 = 0-20 %; 2 = 20-40 %; 3 = 40-60 %; 4 = 60-80 %, y 5 = 80-100 %. Aquí la unidad de análisis es la sección capilar.

**TABLA 1.-** Hematocrito capilar pulmonar y dimensiones de los glóbulos rojos en cinco especies de mamíferos y dos especies de aves. D<sub>e</sub> y T<sub>e</sub> corresponden al diámetro longitudinal y transversal respectivamente. Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas con un nivel  $\alpha = 0,05$  usando comparaciones múltiples con prueba de *Kruskall-Wallis*.

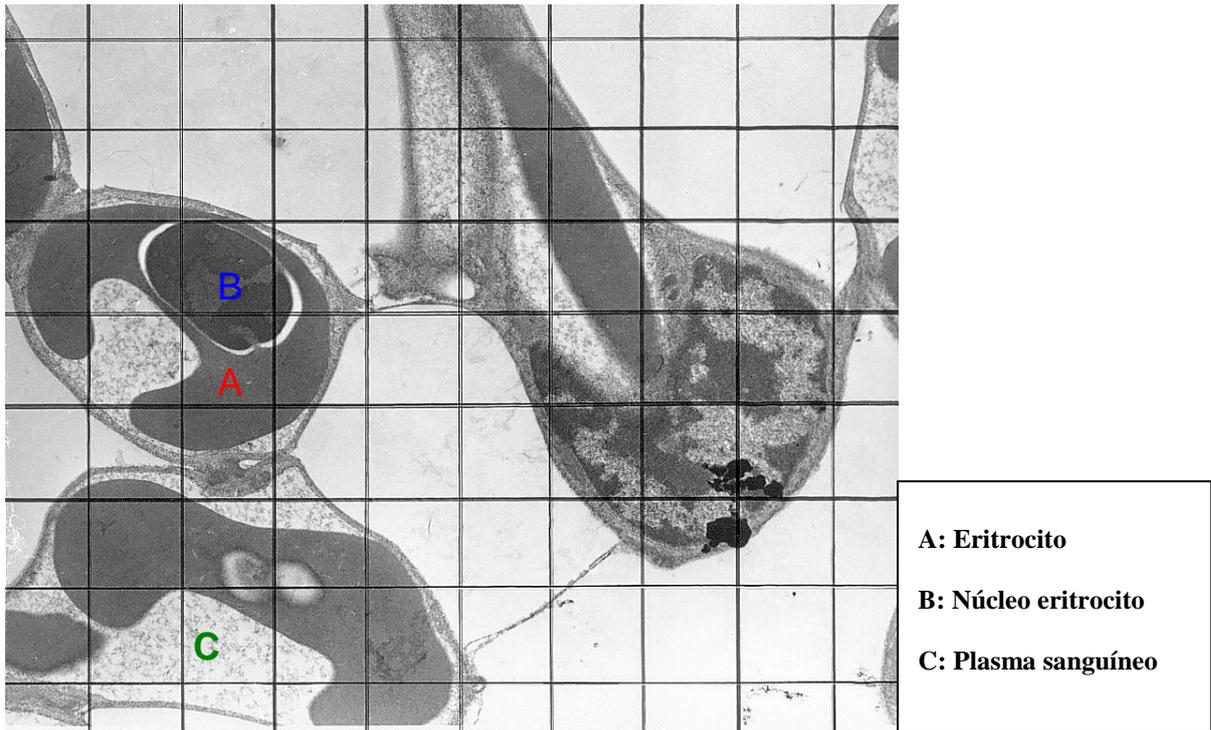
Mamíferos	Hematocrito capilar (%)	D <sub>e</sub> (μm)	T <sub>e</sub> (μm)
<i>Abrothrix olivaceus</i>	59,6 ± 15,4	5,74 ± 0,40 bc	1,14 ± 0,09 a
<i>Abrothrix andinus</i>	69,8 ± 4,7	4,73 ± 0,21 b	1,54 ± 0,09 ab
<i>Phyllotis darwini</i>	44,0 ± 4,5	7,05 ± 0,22 c	1,23 ± 0,06 ab
<i>Tadarida brasiliensis</i>	65,0 ± 7,5	4,18 ± 0,12 a	1,22 ± 0,11 ab
<i>Myotis chiloensis</i>	60,4 ± 7,8	4,38 ± 0,17 ab	2,56 ± 0,13 b
Aves	Hematocrito capilar (%)	D <sub>e</sub> (μm)	T <sub>e</sub> (μm)
<i>Nothoprocta perdicaria</i>	41,8 ± 3,6	9,70 ± 0,11	2,35 ± 0,03
<i>Zenaida auriculata</i>	49,0 ± 11,8	8,77 ± 0,12	1,37 ± 0,02

Se encontraron diferencias en el tamaño de eritrocitos:  $\chi^2_4 = 10,99$ ; P = 0,026 y  $\chi^2_4 = 10,32$ ; P = 0,035 para D<sub>e</sub> y T<sub>e</sub> en los mamíferos, respectivamente; y Z = 1,73; P = 0,08 (P pequeña debido al tamaño de la muestra) Z = 1,73; P = 0,08 D<sub>e</sub> y T<sub>e</sub> en aves, respectivamente. El diámetro de los glóbulos rojos (D<sub>e</sub>) en *Zenaida auriculata* (Figura 11) fue menor que en *Nothoprocta perdicaria* (Figura 12). En los murciélagos T.

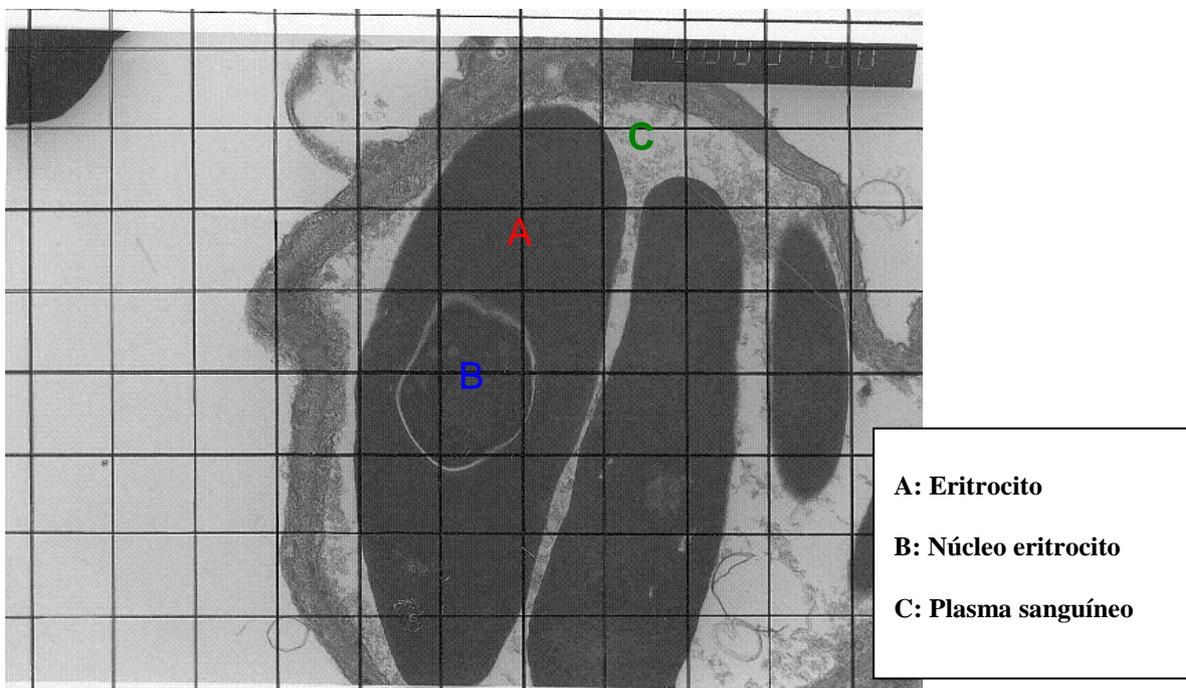
*brasiliensis* (Figura 13) y *Myotis chiloensis*, el  $D_e$  fue pequeño y sólo comparable con el de *A. andinus* (Figura 14) (Tabla 1).

Cuando se contrastó el tamaño de los eritrocitos con determinantes morfológicos de la capacidad de difusión de oxígeno de los pulmones usando un análisis de *cluster*, se encontró que los murciélagos y el ave de vuelo activo *Z. auriculata* se agrupan. Un resultado similar se obtuvo con el análisis de componentes principales (Figura 15).

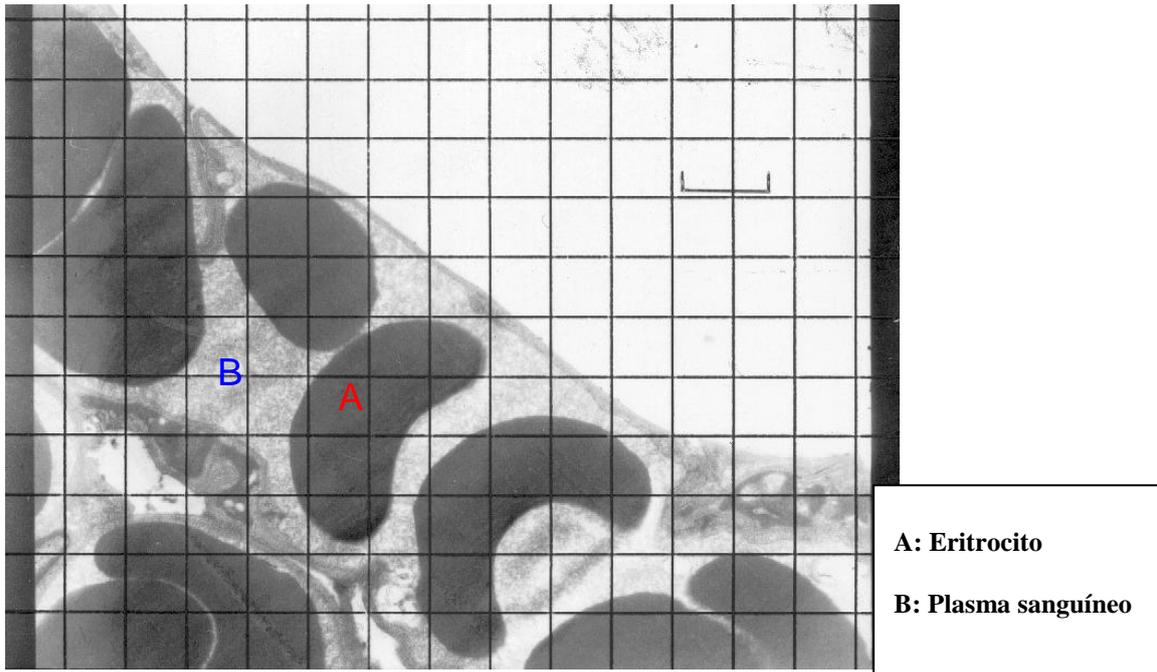
**Figura 11.-** Fotografía MET de capilar pulmonar de *Z. auriculata* (3.000X).



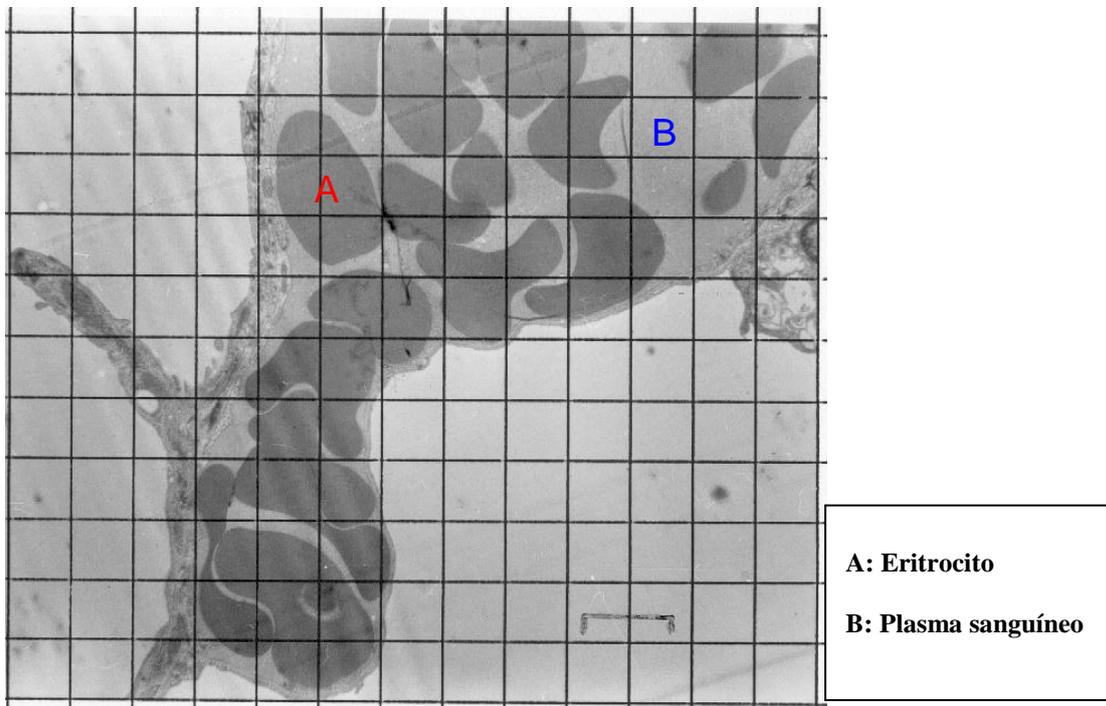
**Figura 12.-** Fotografía MET de capilar pulmonar de *N. perdicaria* (8.000X).

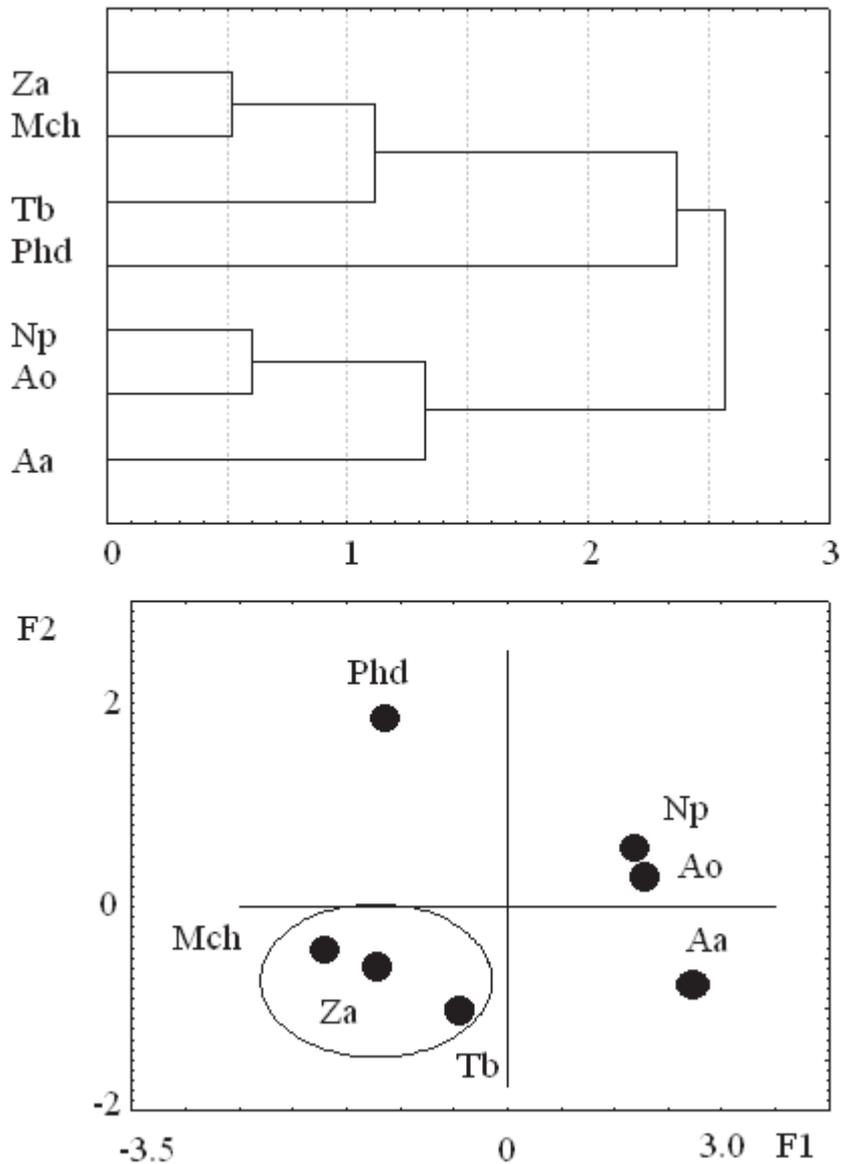


**Figura 13.-** Fotografía MET de capilar pulmonar de *T. brasiliensis* (7.000X).



**Figura 14.** Fotografía MET de capilar pulmonar de *A. andinus* (3.000X).





**Figura 15.-** Análisis de conglomerados (arriba) y análisis de componentes principales (abajo), basado en los valores estandarizados del diámetro del eritrocito, la superficie respiratoria y el grosor de la barrera alvéolo-capilar (Canals *et al.*, 2005b y Figueroa *et al.*, 2007). Encerradas en un círculo los voladores activos; Tb = *Tadarida brasiliensis*, Mch = *Myotis chiloensis*, Phd = *Phyllotis darwini*, Aa = *Abrothrix andinus*, Ao = *Abrothrix olivaceus*, Np = *Nothoprocta perdicaria*, Za = *Zenaida auriculata*.

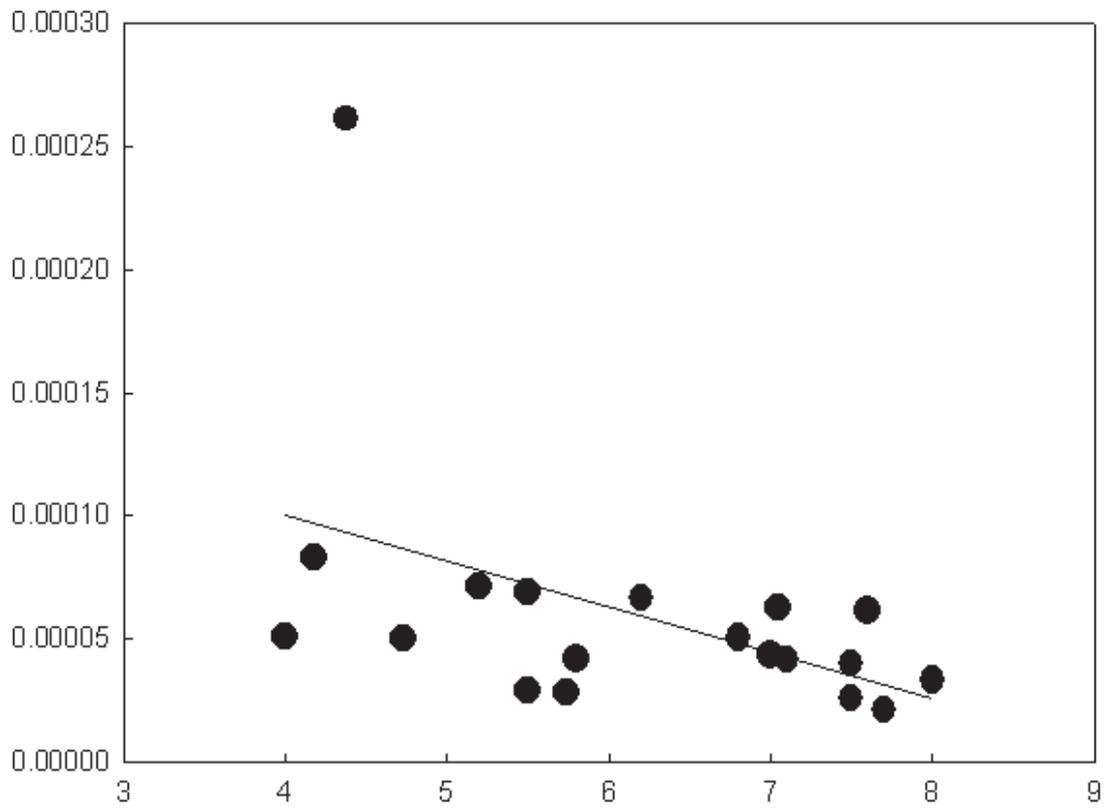
En los mamíferos, encontramos una correlación negativa no significativa ( $r = -0,44$ ;  $F_{1,3} = 0,75$ ;  $P = 0,45$ ) para diámetro de eritrocitos  $D_L O_2 / Mb$ , pero cuando incluimos datos adicionales de la literatura (Tabla 2), la correlación fue significativa ( $r = -0,46$ ;  $F_{1,17} = 4,71$ ;  $P = 0,044$ ) (Figura 16). Este resultado no varió cuando excluimos a *M. chiloensis* ( $r = -0,47$ ;  $F_{1,16} = 4,56$ ;  $P = 0,048$ ) y tampoco cuando se considera sólo un valor promedio por categoría taxonómica (orden) ( $r = -0,79$ ;  $F_{1,6} = 9,62$ ;  $P < 0,02$ ). Cuando analizamos los mismos datos corrigiendo por filogenia (contrastes independientes) obtenemos resultados similares ( $r = -0,824$ ,  $F_{1,5} = 10,567$ ;  $P < 0,0226$ ). Nuestros datos en aves muestran una tendencia similar, a menor tamaño eritrocito, mayor  $D_L O_2 / Mb$ . Lamentablemente, la escasez de estudios en los que el tamaño de los eritrocitos y  $D_L O_2$  haya sido reportado nos impiden obtener resultados sólidos. Con 15 puntos se encontró una correlación negativa no significativa ( $r = -0,31$ ,  $F_{1,12} = 1,29$ ;  $P = 0,27$ ).

**TABLA 2.-** Diámetro del glóbulo rojo ( $D_e$ ), capacidad de difusión de oxígeno ( $D_L O_2$ ) y capacidad de difusión de oxígeno masa-específica ( $D_L O_2/M_b$ ) en mamíferos y aves. Datos de TGR de este estudio<sup>1</sup>, Gregory 2000<sup>2</sup>; Banerjee *et al.*, 1962<sup>3</sup>; Bartels *et al.*, 1979<sup>4</sup>; Goniakowska-Witalinska y Witalinski., 1976<sup>5</sup>; Altman y Dittmer, 1974<sup>6</sup>; Bartsch *et al.*, 1937<sup>7</sup>; Mushi *et al.*, 1999<sup>8</sup>; Gulliver, 1875<sup>9</sup>. Datos de  $D_L O_2$  y  $D_L O_2/M_b$  de Canals *et al.*, 2005b<sup>10</sup>; Figueroa *et al.*, 2007<sup>11</sup>; Maina 2002<sup>13</sup> y Gehr *et al.*, 1981<sup>12</sup>. Los valores de  $D_L O_2$  de algunas especies (datos de Canals *et al.*, 2005b y Figueroa *et al.*, 2007) fueron estimados a partir de la capacidad de difusión de oxígeno de la barrera  $D_t O_2$  a partir de  $D_L O_2 = D_t O_2/10$  (Canals *et al.*, 2005b).

Mamíferos	Mb (g)	$D_e$ ( $\mu$ m)	$D_L O_2$ (mlO <sub>2</sub> /s mbar)	$D_L O_2/M_b$ (x10 <sup>-5</sup> mlO <sub>2</sub> /s mbar g)
<i>Mus musculus</i> <sup>2,12</sup>	42	6,80	0,00213	5,07143
<i>Rattus rattus</i> <sup>2,12</sup>	457	7,50	0,01830	4,00438
<i>Phyllotis darwini</i> <sup>1,11</sup>	75	7,05	0,00469	6,26473
<i>Abrothrix olivaceus</i> <sup>1,10</sup>	26	5,74	0,00075	2,86198
<i>Abrothrix andinus</i> <sup>1,10</sup>	26	4,73	0,00128	5,0434
<i>Cavia porcellus</i> <sup>2,12</sup>	429	7,10	0,01790	4,17249
<i>Myotis chiloensis</i> <sup>1,11</sup>	6	4,38	0,00156	26,0731
<i>Tadarida brasiliensis</i> <sup>1,10</sup>	11	4,18	0,00094	8,32943
<i>Oryctolagus cuniculus</i> <sup>2,12</sup>	3560	7,50	0,09170	2,57584
<i>Canis familiaris</i> <sup>2,12</sup>	21350	7,60	1,31275	6,14871
<i>Camelus dromedarius</i> <sup>3,12</sup>	231700	7,70	4,93700	2,13077
<i>Giraffa camelopardalis</i> <sup>2,12</sup>	383000	5,50	11,17200	2,91697
<i>Capra hircus</i> <sup>2,12</sup>	20900	4,00	1,06200	5,08134
<i>Ovis aries</i> <sup>2,12</sup>	21800	5,20	1,55400	7,12844
<i>Bos taurus</i> <sup>2,12</sup>	700000	5,80	29,34600	4,19229
<i>Equus caballus</i> <sup>2,12</sup>	510000	6,20	34,08000	6,68235
<i>Homo sapiens</i> <sup>2,12</sup>	74000	8,00	2,47000	3,33784

<i>Suncus etruscus</i> <sup>4,12</sup>	3	5,50	0,00018	6,92308
<i>Crocidura russula</i> <sup>4,12</sup>	12	7,00	0,00053	4,34426
	Mb	D <sub>e</sub>	D <sub>L</sub> O <sub>2</sub>	D <sub>L</sub> O <sub>2</sub> /M <sub>b</sub>
Aves	(g)	(µm)	(mlO <sub>2</sub> /s mbar)	(x10 <sup>-5</sup> mlO <sub>2</sub> /s mbar g)
<i>Zenaida auriculata</i> <sup>1,11</sup>	141	8,77	0,01666	11,819
<i>Nothoprocta perdicaria</i> <sup>1,11</sup>	398	9,70	0,01051	2,6406
<i>Struthio camelus</i> <sup>8,13</sup>	45000	15,40	2,93000	6,5111
<i>Anser anser</i> <sup>9,13</sup>	3838	12,80	0,17200	4,4815
<i>Gallus gallus</i> <sup>5,13</sup>	2141	11,20	0,03300	1,5413
<i>Columba livia</i> <sup>6,13</sup>	216	13,30	0,02000	9,2593
<i>Dromaius novaehollandiae</i> <sup>9,13</sup>	30000	15,00	0,00500	0,0166
<i>Passer domesticus</i> <sup>7,13</sup>	26	11,29	0,00300	11,765
<i>Sturnus vulgaris</i> <sup>7,13</sup>	73	10,37	0,00500	6,8871
<i>Falco tinnunculus</i> <sup>9,13</sup>	66	13,4	0,00500	7,5758
<i>Larus canus</i> <sup>9,13</sup>	302	12,9	0,01000	3,3113
<i>Larus ridibundus</i> <sup>9,13</sup>	253	12,1	0,01100	4,3478
<i>Streptopelia decaota</i> <sup>9,13</sup>	189	11,9	0,01200	6,3492
<i>Lanius collaris</i> <sup>9,13</sup>	33	11,4	0,00200	6,1162

$D_{L}O_2/M_b$



$D_e$

**Figura 16.-** Regresión lineal entre el diámetro del glóbulo rojo ( $D_e$ ) y la capacidad de difusión de oxígeno masa – específica ( $D_{L}O_2 / M_b$ ) en mamíferos.

## 9. DISCUSIÓN

El hematocrito capilar pulmonar de las especies estudiadas fue similar en los mamíferos y aves. Se evidenció una gran variabilidad intraindividual, que fue desde 0 a 99% en los mamíferos y de 0 a 89% en las aves. Esto significa que hay secciones del capilar sin glóbulos rojos y otros sectores con un gran número de ellos. Este resultado coincide con los encontrados en el estudio clásico de Wearn *et al.*, (1934), en el cual el cambio no aleatorio del flujo de la sangre entre los capilares pulmonares, fue descrito como el comportamiento normal de estos vasos. Okada *et al.*, (1994), encontraron un gran cambio entre los capilares, que no fue correlacionado con pequeñas variaciones en la presión arterial o gasto cardíaco. Aunque el mecanismo de conmutación sigue siendo desconocido, se considera que está correlacionado con el cambio continuo del hematocrito de la sangre que perfunde los capilares pulmonares. En forma similar, la observación microscópica *in vivo*, de los distintos segmentos del capilar pulmonar, mostró que el hematocrito varía constantemente de cero a valores altos, cuando un grupo de glóbulos rojos poco separados pasa a través de una serie de segmentos (Baumgartner *et al.*, 2004).

Aunque las diferencias en el hematocrito entre mamíferos no alcanzaron significación estadística, el hematocrito capilar pulmonar de los murciélagos *M. chiloensis* y *T. brasiliensis* es alto, especialmente teniendo en cuenta que la media pulmonar es alrededor de un 90% de la de los grandes vasos sistémicos (Hsia *et al.*, 1999). Este es un resultado esperado en murciélagos, en los que se reporta con frecuencia un hematocrito venoso sobre 60% (Neuweiler, 2000). En particular, en *T. brasiliensis* se encontró un hematocrito venoso entre 68 y 75% (Black y Wiederhielm, 1976). Además, en otras especies del género *Myotis* se han informado hematocritos de 43% en *M. myotis* (9,3 g) y 60% en *M. natterii* (12,5 g) (Neuweiler, 2000). Todos estos

valores están en el rango de nuestros datos y pueden atribuirse a los altos requerimientos de oxígeno del vuelo. Sin embargo, el hematocrito de *A. andinus* también fue muy elevado. Aunque *A. andinus* es un roedor que vive en alta altitud, que presenta altos recuentos de glóbulos rojos, el aumento de la concentración de hemoglobina en la sangre y disminución significativa en la media del volumen de la masa durante las temporadas de altos requerimientos energéticos, se ha reportado un hematocrito constante y que va desde 49,9% a 53% durante todo el año en esta especie (Rosenmann y Ruiz, 1993). Si nuestro resultado es consecuencia de los elevados requerimientos energéticos en alta altitud, podríamos esperar una respuesta diferente del hematocrito capilar en los pulmones que en el hematocrito venoso. Sin embargo, el hematocrito capilar pulmonar de *A. olivaceus*, que habita en altitudes bajas, también mostró un valor alto. Por último, como se esperaba, el hematocrito de *P. darwini* fue bajo y similar al 42,5% reportado por Morrison *et al.*, (1963a).

Las diferencias en el tamaño de glóbulos rojos entre las especies reportadas en este estudio, sugieren que este parámetro está altamente correlacionado con el tipo de locomoción. En ambas especies de aves y mamíferos se encontró la misma tendencia: un tamaño pequeño de glóbulo rojo en animales de vuelo activo. Además, el roedor andino de alta altitud *A. andinus* y los murciélagos, presentan un tamaño muy pequeño de glóbulos rojos, lo que sugiere una asociación positiva entre el tamaño del eritrocito y la demanda de oxígeno.

La correlación entre el tamaño de los eritrocitos con las características de difusión de los pulmones, produjo una agrupación no-filogenética con un grupo constituido por los murciélagos y *Z. auriculata*, revelando similar respuesta funcional en especies no relacionadas. Este *cluster* propone también que la dirección de los cambios anatómicos se rige principalmente por las necesidades de vuelo. Aunque los

más recientes antepasados de los mamíferos y aves divergieron a distinto tiempo de los linajes de los reptiles, aves en la parte superior del Jurásico (150 millones de años) y los murciélagos en el Eoceno (50 millones de años), y sus adaptaciones pulmonares anatómicas asociadas al vuelo difieren enormemente (Maina 2000a, 2000b), al menos, las características anatómicas de los glóbulos rojos y la barrera alvéolo-capilar varían en la misma dirección en ambos taxones. Los refinamientos morfológicos y fisiológicos más importantes asociados a la adquisición de oxígeno de los murciélagos en vuelo son: gran corazón con un enorme gasto cardíaco (Jürgens *et al.*, 1981, Canals *et al.*, 2005a); alto hematocrito, concentración de hemoglobina, recuento de eritrocitos y capacidad de transporte de oxígeno de la sangre (Wolk y Bogdanowics, 1987), delgada barrera alvéolo-capilar y alta capacidad de difusión de oxígeno (Maina y King, 1984; Maina, 2000a, 2000b; Canals *et al.* 2005a); y eficiente suministro de sangre capilar a los músculos del vuelo (Mathieu - Costello *et al.*, 1992). Las características fundamentales de adaptación en las aves son mecanismo de corriente cruzada, para-bronquios, sacos de aire y flujo unidireccional de aire en las vías respiratorias de las aves, corto tiempo de circulación pulmonar y, como en los murciélagos, grandes corazones y delgadas barreras aire-sangre (Maina 1998, 2000a, 2000b).

El tamaño pequeño del eritrocito y alta capacidad de difusión de oxígeno, parecen estar correlacionados; esta última como consecuencia de una delgada barrera alvéolo-capilar y una gran superficie respiratoria. Aunque el análisis de regresión de datos no alcanzó significación estadística, cuando los datos de la literatura se incluyeron, fue evidente una clara pendiente negativa entre el diámetro de glóbulos rojos y la capacidad de difusión de oxígeno en los mamíferos. Aunque una tendencia negativa parece estar ocurriendo en las aves, no alcanzó un nivel significativo, probablemente debido al escaso número de datos. Se ha asociado el tamaño pequeño de

glóbulos rojos, y como consecuencia una alta proporción área / volumen, con una difusión de oxígeno facilitada, un aumento de la concentración de hemoglobina y un aumento del recuento de eritrocitos sin aumentar la viscosidad de la sangre (Promislow 1991; Rosenmann y Ruiz, 1993), Todos estos factores operan en la misma dirección de la delgada barrera alvéolo-capilar y una gran superficie respiratoria, y en consecuencia una alta conductancia de oxígeno.

## 10. CONCLUSIONES

- ❖ Durante la evolución de las distintas especies, se han producido cambios que traducidos en adaptaciones fisiológicas, les han permitido desarrollar la capacidad de desenvolverse en distintos hábitat y modificar su metabolismo y modo de vida, lo que les permite sobrevivir en distintos ambientes.
- ❖ Los parámetros hematológicos experimentan variaciones que se asocian a altas demandas energéticas en las especies estudiadas.
- ❖ El hematocrito del capilar pulmonar de las especies estudiadas es similar en aves y mamíferos y se corresponden con los rangos reportados en estudios anteriores, además existe una gran variabilidad dentro de los individuos de cada especie.
- ❖ Los altos valores de hematocrito pulmonar en murciélagos se atribuyen al mayor requerimiento de oxígeno del vuelo.
- ❖ El tamaño de los eritrocitos es menor en aves y mamíferos voladores por lo que existe una correlación negativa entre la mayor demanda energética (vuelo y altitud) y tamaño del glóbulo rojo (a mayor demanda energética, menor tamaño).
- ❖ Las diferencias de tamaño en los glóbulos rojos de las especies estudiadas, indican que existe una alta correlación entre este parámetro y el tipo de locomoción.
- ❖ Al correlacionar tamaño del eritrocito con características de difusión del pulmón, se obtiene una respuesta no-filogenética entre *Z. auriculata* y los quirópteros, lo que indica similar respuesta funcional a las demandas del vuelo.
- ❖ Los cambios en los parámetros hematológicos pulmonares (menor tamaño del eritrocito y un alto valor de hematocrito pulmonar) y los parámetros estructurales del pulmón (una delgada barrera alvéolo-capilar en aves y mayor superficie respiratoria en los quirópteros), se traducen en una difusión de

oxígeno facilitada, mayor concentración de hemoglobina y un mayor recuento de glóbulos rojos, que no implica una mayor viscosidad de la sangre.

## **11. BIBLIOGRAFÍA**

**ALTMANN, P.L.; DITTMER, D.S. (1974).** Biology data book. Vol III: 1841-1842. Federations of American Societies for Experimental Biology, Maryland.

**BANERJEE, S.; BHATTACHARJEE, R.C.; SINGH, T.I. (1962).** Hematological studies in the normal adult Indian camel (*Camelus dromedarius*). American Journal of Physiology 203:1185-1187.

**BARTELS, H.; BARTELS, R.; BAUMANN, R.; FONS, R.; JURGENS, K.D.; WRIGHT, P. (1979).** Blood oxygen transport of two shrew species (*S. etruscus* and *C. russula*). American Journal of Physiology Regulatory Integrative and Comparative Physiology 236: R221-224.

**BARTSCH, P.; HALL, W.H.; ROSENZWEIG, W.; SALMAN, S. (1937).** Size of red blood corpuscles and their nucleus in fifty north American birds. The Auk Oct: 516-519.

**BAUMGARTNER, W.A. Jr; PETERSON, A.J.; PRESSON, R.C. Jr.; N TANABE, N.; JARYSZAK, E.; WAGNER, W.W. Jr. (2004).** Blood flow switching among pulmonary capillaries during high hematocrit. Journal of Applied Physiology 97:522-526.

**BLACK, C.P.; TENNEY, S.M. (1980).** Oxygen transport during progressive hypoxia in high-altitude and sea-level waterfowl. Respiration Physiology 39: 217-239.

**BLACK, L.L.; WIEDERHIELM. C.A. (1976).** Plasma oncotic pressures and hematocrit in an intact anaesthetized bat. Microvascular Research 12:55-58.

**CANALS, M.; ATALA, C.; GROSSI, B.; IRIARTE-DÍAZ, J. (2005a).** Heart and lung size of several small bats. Acta Chiropterologica. 7: 65-72.

**CANALS, M.; ATALA, C.; OLIVARES, R.; GUAJARDO, F.; FIGUEROA, D.; SABAT, P.; ROSENMANN, M. (2005b).** Functional and structural optimization of the

respiratory system of the bat *Tadarida brasiliensis* (Chiroptera, Molossidae): does airway geometry matter?. *The Journal of Experimental Biology* 208:3987-3995.

**CAREY, C.; MORTON, M.L. (1976).** Aspects of circulatory physiology of montane lowland birds. *Comparative Biochemistry and Physiology* 54A: 61-74.

**CARPENTER, F.L. (1975).** Bird hematocrits: effect of high altitude and strength of flight. *Comparative Biochemistry and Physiology* 50A: 415-417.

**FIGUEROA, D.; OLIVARES, R.; SALABERRY, M.; SABAT, P.; CANALS, M. (2007).** Interplay between the morphometry of the lungs and the mode of locomotion in birds and mammals. *Biological Research* 40:193-201.

**GANTZ, A.; MARTÍNEZ, D.R. (2000).** Orden Chiroptera. En: Muñoz-Pedreros A. y Yáñez J. Eds. *Mamíferos de Chile*. CEA Ediciones pp.: 53-67.

**GEHR, P.; MWANGI, D.K.; AMMANN, A.; MALOIY, G.M.O.; TAYLOR, C.R.; WEIBEL, E.R. (1981).** Design of the mammalian respiratory system. V. Scaling morphometric pulmonary diffusing capacity to body mass: wild and domestic mammals. *Respiration Physiology* 44: 61-86.

**GONIAKOWSKA-WITALINSKA, L.; WITALINSKI, W. (1976).** Evidence for a correlation between the number of marginal microtubules and the size of vertebrate erythrocytes. *Journal of Cellular Science* 22:397-401.

**GREGORY, T.R. (2000).** Nucleotypic effect without nuclei: genome size and erythrocyte size in mammals. *Genome* 43: 895-901.

**GULLIVER, G. (1875).** On the size and shape of red corpuscles of the blood of vertebrates, with drawings of them to a uniform scale, and extended and revised tables of measurements. *Proceedings of the Royal Society of London* 1875: 474-495.

**HOFFMANN, A.; LAZO, I. (2002).** Bosques y campos de cultivo. En: Hoffman A. y Lazo I. (Eds.). *Aves de Chile*. 2ª edición. Ril editores. Santiago, Chile. pp: 63-93.

- HSIA, C.C.W.; McBRAYER, D.G.; RAMANATHAN, M. (1995).** Reference values of pulmonary diffusing capacity during exercise by a rebreathing technique. *American Journal of Respiratory Critical Care Medicine* 152:658-665.
- HSIA, C.C.W.; JHONSON, R.L. Jr.; SHAH, D. (1999).** Red cell distribution and the recruitment of pulmonary diffusing capacity. *Journal of Applied Physiology* 86:1460-1467.
- JÜRGENS, J.D. ; BARTELS, H. ; BARTELS, R. (1981).** Blood oxygen transport and organ weight of small bats and small non-flying mammals. *Respiration Physiology* 45: 243-60.
- KEYS, G.C.; FLEISCHER, R.C.; ROTHSTEIN, S.I. (1986).** Relationships between elevation, reproduction and the hematocrit level of brown-headed cowbirds. *Comparative Biochemistry and Physiology* 83A: 765-769.
- LECHNER, A.J. (1976).** Respiratory adaptations in burrowing pocket gophers from sea level and high altitude. *Journal of Applied Physiology* 41: 168-173.
- LECHNER, A.J. (1985).** Pulmonary design in a microchiropteran bat (*Pipistrellus subflavus*) during hibernation. *Respiration Physiology* 59: 301-312.
- MAINA, J.N. (1998).** The lungs of the flying vertebrates- birds and bats: is their structure optimized for this elite mode of locomotion? In WEIBEL ER., C.R. TAYLOR & L. BOLIS (eds.) *Principles of Animal design: The optimization and symmorphosis debate*: 177-185. Cambridge University Press, Cambridge.
- MAINA, J.N. (2000a).** What it takes to fly: The structural and functional respiratory refinements in birds and bats. *Journal of Experimental Biology* 203: 3045-64.
- MAINA, J.N. (2000b).** Comparative respiratory morphology: Themes and principles in the design and construction of the gas exchangers. *Anatomical Records* 261: 25-44.

- MAINA, J.N.; KING, A.S. (1984).** The structural functional correlation in the design of the bat lung. A morphometric study. *The Journal of Experimental Biology* 111: 43-63.
- MAINA, J.N.; THOMAS, S.P.; DALLS, D.M. (1991).** A morphometric study of bats of different size: correlations between structure and function of the chiropteran lung. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. B333: 31-50.
- MANN, G. 1978.** Los pequeños mamíferos de Chile (Marsupiales, quirópteros, edentados y roedores). *Gayana Zoología*, 40:1-342.
- MATHIEU-COSTELLO, O.; SZEWCZAK, J.M.; LOGERMAN, R.B.; AGEY, P.J. (1992).** Geometry of blood-tissue exchange in bat flight muscle compared with bat hindlimb and rat soleus muscle. *American Journal of Physiology* 262: 955-65.
- MORRISON, P.; KERST, K.; ROSENMAN, M. (1963a).** Hematocrit and hemoglobin levels in some Chilean rodents from high and low altitude. *International Journal of Biometeorology* 7: 45-50.
- MORRISON, P.; KERST, K.; REYNAFARJE C.; RAMOS, J. (1963b).** Hematocrit and hemoglobin levels in some Peruvian rodents from high and low altitude. *International Journal of Biometeorology* 7: 51-58.
- MUÑOZ-PEDREROS, A. (2000).** Orden Rodentia. En: Muñoz-Pedreros A y Yáñez J. (Eds.). *Mamíferos de Chile*. CEA Ediciones. Valdivia, Chile. pp.: 73-126.
- MUSHI, E.Z.; BINTA, M.G.; CHABO, R.G.; ISA, J.F.W.; KAPAATA, R.W. (1999).** Selected hematological values of farmed ostriches (*Struthio camelus*) in Botswana. *Journal of Veterinary Diagnostic Investigation* 11: 372-374.
- NEUWEILER, G. (2000).** The blood. In NEUWEILER G (ed.) *The Biology of Bats*: 53-55. Oxford University Press, Oxford.

**NOVOA, F.F.; ROSENMANN, M.; BOZINOVIC, F. (1991).** Physiological responses of four passerine species to simulated altitudes. *Comparative Biochemistry and Physiology* 99A: 179-183.

**NOVOA, F.F.; RUIZ, G.; ROSENMANN, M. (2003).** El oxígeno y la vida en alta altitud. En: BOZINOVIC F (ed.) *Fisiología Ecológica y Evolutiva*: 227-246. Ediciones Universidad Católica de Chile. Santiago.

**OKADA, O.; PRESSON, R.G. Jr.; GODBEY, P.S.; CAPEN, R.L.; WAGNER, WW. Jr. (1994).** Capillary perfusion patterns in single alveolar walls. *Journal of Applied Physiology* 76: 380-386.

**PARRAGUEZ, V.; ATLAGICH, M.; DÍAZ, R.; BRUZZONE M.; BEHN, C; RAGGI, L. (2005).** Effect of hypobaric hypoxia on lamb intrauterine growth: comparison between high - and low-altitude native ewes. *Reproduction, Fertility and Development* 17: 497-505.

**PROMISLOW, D.E. (1991).** The evolution of mammalian blood parameters. Patterns and their interpretation. *Physiological Zoology* 64:393-431.

**RANDALL, D.; BURGGREN, W.; FRENCH, K. (1998).** Circulación. En: *Fisiología Animal, Mecanismos y Adaptaciones*. 4ª ed. Mc Graw- Hill – Interamericana. Madrid, España. pp: 507-562.

**RAPAPORT, E.; KUIDA, H.; HAYNES, F.W.; DEXTER, L. (1996).** Pulmonary red cell and plasma volumes and pulmonary hematocrit in the normal dog. *American Journal of Physiology* 185: 127-132.

**ROSENMANN, M.; RUIZ, G. (1993)** Seasonal changes of blood values in the Andean mouse *Abrothrix andinus*. *Comparative Biochemistry and Physiology* 105A: 119-123.

**RUIZ, G.; ROSENMANN, M.; NUÑEZ, H. (1993).** Blood values in South American lizards from high and low altitudes. *Comparative Biochemistry*

Physiology. 106 A: 713-718.

**SCHALM, O. (1964).** Hematología Veterinaria. 1ª ed. en español. Unión Tipográfica Editorial Hispano Americana. México D.F., México. pp: 404.

**SCHMIDT-NIELSEN, K. (1997).** Animal physiology, Adaptation and environment. 5º ed. Cambridge University Press. New York, EEUU.

**VISCOR, G.; FUSTER, J.F. (1987).** Relationships between morphological parameters in birds with different flying habits. Comparative Biochemistry and Physiology 87A: 231-249.

**VISCOR, G ; MARQUES, M.S. ; PALOMEQUE, J. (1985).** Cardiovascular and organ weight adaptations as related to flight activity in birds. Comparative Biochemistry and Physiology 82A: 597-599.

**WEARN, J.T.; ERNSTENE, A.C.; BROMER, A.W.; BARR, J.S.; GERMAN, W.J.; ZSCHIESCHE, I.J. (1934).** The normal behavior of the pulmonary blood vessels with observations of the intermittence of the flow of blood in the arterioles and capillaries. American Journal of Physiology 109: 236-256.

**WEIBEL, E.R. (1970/71).** Morphometric estimation of pulmonary diffusion capacity. Respiration Physiology 11: 54-75.

**WOLK, E.; BOGDANOWICS, W. (1987).** Hematology of the hibernating bat, *Myotis daubentoni*. Comparative Biochemistry and Physiology 88A: 637-39.