

42  
2 21



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

"GEOMETRIA Y DINAMICA DE LA PIEL DE LOS CETACEOS"

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE

B I O L O G A

P R E S E N T A :

NORMA ANGELICA CORADO NAVA



MEXICO, D. F.

1996

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

DIVISION DE ESTUDIOS PROFESIONALES  
FACULTAD DE CIENCIAS  
SECCION ESCOLAR

TESIS CON FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

M. en C. Virginia Abrín Batule  
Jefe de la División de Estudios Profesionales de la  
Facultad de Ciencias  
Presente

Comunicamos a usted que hemos revisado el trabajo de Tesis:

"Geometría y Dinámica de la piel de los cotáceos"

realizado por Norma Angélica Corado Nava

con número de cuenta 8714484-6 , pasante de la carrera de Biología

Dicho trabajo cuenta con nuestro voto aprobatorio.

Atentamente

Director de Tesis  
Propietario

Dr. Luis Medrano González

Propietario

M. en CB. Armando Pérez Torres

Propietario

Dr. Pedro Eduardo Miramontes Vidal

Suplente

M. en C. Patricia Rivas Manzano

Suplente

Biol. Mario Alberto Salinas Zacarías

Consejo Departamental de Biología

M. en C. Alejandro Martínez Mena

**A mis padres, Catalina y Roberto  
y a mis hermanos, Paty y Roberto;  
con cariño, admiración y respeto.**

**GRACIAS.**

## AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a todo el grupo de trabajo del Laboratorio de Mamíferos marinos, sin cuyo esfuerzo no hubiera sido posible este trabajo.

A los directores M en CB. Armando Pérez Torres y al Dr. Luis Medrano Gonzales, por ayudarme a desarrollar y completar este trabajo.

A los sinodales: Dr. Pedro Miramontes, M. en C. Paly Ramos, y al Biol. Mario Salinas por contribuir a mejorar todo el esfuerzo de este trabajo.

Al delfinario Reino Aventura por su ayuda y valiosa cooperación.

Al laboratorio de Microcine de la Facultad de Ciencias por permitirme elaborar el material necesario para este trabajo; en especial a la Anabel y Alejandro Martínez.

Al Laboratorio de Microbiología por permitirme trabajar con toda su confianza y amistad por parte de Raquel, Anita, Arturo y Antonio Lazcano

A Mamá y a Papá, por su apoyo, confianza y amor que siempre me brindaron, y por perdonar el poco tiempo que pase junto a ellos mientras se realizó este trabajo.

A mis hermanos Paly y Roberto, por permitir relajarse en su compañía.

Al Equipo de Buceo de la Facultad de Ciencias, a mis compañeros, amigos y alumnos por todo su apoyo y por perdonar mis faltas para asistir en los cursos.

A Mary y Julio, por ser ellos quienes más me apoyaron durante esta aventura con sus comentarios, con su compañía y su valiosa amistad.

A Arturo S. por brindarme su amistad y quien conociera este trabajo hasta el fin, a Claudia H. por ser simplemente mi amiga y confidente, a MariCarmen, Arturo, Katya, Amaya y en especial a Jena por su apoyo y amistad presente en todo momento.

A todos mis compañeros y amigos técnicos en urgencias médicas de la UNAM quienes me brindaron de forma desinteresada su amistad y cariño y por quienes siento un gran respeto y admiración.

MIL GRACIAS POR TODO SU AFECTO Y CARIÑO A TODOS.

## CONTENIDO

1. RESUMEN .....	3
2. ABSTRACT.....	4
3. INTRODUCCIÓN .....	5
4. ANTECEDENTES	
4.1. GEOMETRÍA FRACTAL, DIMENSIÓN Y DINÁMICA .....	7
4.2. LA PIEL DE LOS MAMÍFEROS .....	11
4.2.1. Epidermis .....	12
4.2.2. Dermis .....	14
4.2.3. Hipodermis .....	14
4.2.4. Faneras o anexos de la piel.....	15
4.2.5. Receptores sensoriales .....	16
4.2.6. Irrigación de la piel.....	17
4.2.7. Pigmentación.....	18
4.3. LA PIEL DE LOS CETÁCEOS	
4.3.1. Epidermis.....	19
4.3.2. Dermis.....	21
4.3.3. Hipodermis.....	22
4.3.4. Crecimiento epidérmico.....	22
4.4. FUNCIONES DE LA PIEL EN LOS CETÁCEOS	
4.4.1. Termorregulación.....	23
4.4.2. Hidrodinámica.....	27
4.4.3. Osmorregulación.....	31
5. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN.....	37
6. MÉTODOS	
6.1. RECOLECTA DE MUESTRAS DE PIEL.....	39
6.1.1. Muestras de cetáceos en vida libre.....	39
6.1.2. Muestras de cetáceos en cautiverio.....	40

6.2. ANÁLISIS HISTOLÓGICOS	
6.2.1. Microscopía fotónica.....	42
6.2.2. Microscopía electrónica.....	42
6.3. FOTOGRAFÍA Y MORFOMETRÍA.....	42
6.4. ANÁLISIS DE DATOS.....	43
7. RESULTADOS	
7.1 COMPARACIÓN DE DIFERENTES ZONAS CORPORALES DE <i>T. Truncatus</i>	
7.1.1 Geometría papilar.....	45
7.1.2. Dimensión Fractal de las papilas en corte sagital.....	49
7.2 COMPARACIÓN DE DIFERENTES ESPECIES DE CETÁCEOS	
7.2.1. Geometría papilar.....	52
7.2.2. Alometría papilar.....	52
7.2.3. Dimensión fractal de diferentes especies de cetáceos.....	55
7.3 ALGUNOS ASPECTOS DE LA ULTRAESTRUCTURA DE LA EPIDERMIS DE <i>M. novaeangliae</i> .....	57
8. DISCUSIÓN	
8.1. COMPARACIÓN DE DIFERENTES ZONAS CORPORALES DE <i>T.truncatus</i> .....	64
8.2. COMPARACIÓN ENTRE DIFERENTES ESPECIES DE CETÁCEOS.....	65
8.3. ULTRAESTRUCTURA DE LA PIEL DE <i>M. novaeangliae</i> .....	66
9. CONCLUSIONES.....	68
10. REFERENCIAS.....	70
11. APÉNDICES.....	74
A. TINCIONES.....	74
B. CÁLCULO DE LA DIMENSIÓN FRACTAL.....	78
C. ALÓMETRIA.....	80
D. CÁLCULO DEL ÁREA CORPORAL.....	81

## 1. RESUMEN

En este trabajo se estudió la geometría de la unión dermoepidérmica de los cetáceos para inferir algunos aspectos de la relación de esta estructura con la termorregulación, la osmorregulación y la hidrodinámica. Se analizaron las variaciones de la piel entre doce zonas corporales de un tursión, *Tursiops truncatus*, y entre seis especies de cetáceos de distintos tamaños y hábitats. Se determinaron las proporciones y la dimensión fractal de compás de la epidermis y las papilas dérmicas. Se examinó por microscopía electrónica la epidermis de la ballena jorobada, *Megaptera novaeangliae*, para establecer la relación de la estructura celular de este órgano con un posible mecanismo de excreción de sales.

Las variaciones en la morfología y dimensión fractal de las papilas dérmicas, para diferentes zonas del cuerpo como para distintas especies, se deben principalmente al número de papilas por unidad de área y tales variaciones están restringidas por el espacio disponible en la unión dermoepidérmica.

Las variaciones de la geometría papilar en el cuerpo del tursión parecen tener más relación con la hidrodinámica de la piel habiendo una compensación del aislamiento relativo entre las papilas y la superficie corporal mediante dimensiones fractales papilares mayores.

La relación alométrica entre la superficie papilar y el tamaño corporal resulta en una dimensión de la superficie papilar de 2.74 lo cual sugiere que la superficie funcional de la piel se asocia a procesos de disipación, dependientes de la masa del organismo, y que la dinámica de su morfogénesis es la misma o muy similar que la del sistema circulatorio.

La presencia de cuerpos laminares, gotas lipídicas, vesículas claras y una red de canales intersticiales en la epidermis de la ballena jorobada es una base estructural de una posible excreción de sales. La gran abundancia de desmosomas asimismo sugiere que las células epidérmicas se encuentran ligadas mecánicamente y funcionalmente y, por tanto, mutuamente reguladas.

## 2. ABSTRACT

The geometry of dermoepidermal boundary from cetaceans was studied to develop some inferences on the relationship between this structure and thermal regulation, osmotic regulation and hydrodynamics. The skin variations among twelve body regions of a bottlenose dolphin, *Tursiops truncatus*, and from one body region among six cetacean species with different sizes and habitats were analyzed. The proportions and compass-fractal dimension in dermal papillae and epidermis were determined. The epidermal layer of a humpback whale, *Megaptera novaeangliae*, was examined using electronic microscopy to establish a relationship between cellular structure and a putative mechanism of salt excretion in the skin.

Variations in morphology and fractal dimension of dermal papillae for different body regions and for different species are due mostly to the number of papillae per unit area and these variations seem constrained by the available space in the dermoepidermal interphase.

Variation in papillar geometry in the body of a bottlenose dolphin seem to be more related with skin hydrodynamics. The relative isolation between papillae and the skin external surface seems compensated with higher fractal dimensions.

The allometric relationship between papillar surface and body size leads to a dimension of papillar surface of 2.74. This suggests that the functional surface of the skin is associated to dissipation processes dependent from organism's mass and that the dynamics of papillae morphogenesis is the same or very similar than that of circulatory system.

The prescence of laminar bodies, lipidic drops, clear vesicles and a network of interstitial spaces in the humpback whale epidermis is an structural basis for a possible salt-excretion function. The abundance of desmosomes also suggests that epidermal cells are linked mechanically and functionally and thus they are mutually regulated.

### 3. INTRODUCCIÓN

En muchos fenómenos biológicos con frecuencia se comparan magnitudes de diferente índole y es común que estas relaciones correspondan al modelo alométrico. Este modelo ha permitido analizar la dependencia de procesos fisiológicos diferentes con respecto a factores diversos, particularmente el tamaño. El modelo alométrico establece que dos magnitudes Q1 y Q2 se relacionan de la siguiente forma:

$$Q1 = aQ2^b$$

donde el exponente b recibe el nombre de *coeficiente alométrico*. El modelo alométrico se deriva de las investigaciones de Sarrus y Rameux citado por Kleiber (1972), quienes en 1840 encontraron que, en animales de diferente tamaño corporal, la tasa metabólica no aumentaba proporcionalmente al peso sino a la superficie del cuerpo. Tal es el origen de la llamada ley de la superficie del metabolismo o regla de Rubner. La ecuación alométrica es una fórmula aproximada, con una base simple pero aplicable a un amplio espectro de fenómenos sin ser un dogma o explicación para todo. El principio de alometría es una expresión de la interdependencia, organización y armonización de los procesos fisiológicos en dependencia mutua con particular referencia al tamaño corporal (Bertalanffy, 1976).

Asimismo, a partir de las aplicaciones recientes de la teoría de los sistemas dinámicos, que también han servido como un foco integrador de las ciencias naturales, el modelo alométrico puede verse como una relación de dimensiones que pueden ser fraccionarias y corresponder a estructuras fractales. La geometría de los fractales analiza las distintas formas con un mismo patrón invariable a diferentes escalas que encuentra una descripción matemática mediante el concepto de dimensión fractal (Mandelbrot, 1983; West, 1990). Una característica fundamental de los fractales es que su dimensión es fraccionaria. Esto no sólo se aplica a objetos matemáticos sino también a objetos reales como perfiles de costas, montañas, vasos sanguíneos y helechos, entre otros. Las estructuras fractales en los seres vivos permiten acoplar procesos dependientes

de magnitudes diferentes como ocurre con las relaciones de superficie y volumen en los sistemas circulatorio, respiratorio, digestivo y tegumentario (Webel, 1991).

El sistema tegumentario proyecta la relación entre el ambiente y el individuo y presenta características que median esta relación. La piel es la envoltura que cubre el cuerpo, es un órgano que se encuentra directamente relacionado con el funcionamiento del organismo. Las características fisiológicas de cada piel reflejan las condiciones en las cuales se desarrolla cada organismo así como su tipo de vida (Montagna, 1962). Debido al desarrollo de teorías como la de los sistemas dinámicos en conjunto con aproximaciones clásicas que permitan la interpretación dinámica de procesos como los que se observan en la piel, es posible pensar en una caracterización generalizada de la morfología de esta estructura en términos de la geometría fractal.

Los cetáceos son mamíferos marinos que presentan características anatómicas y fisiológicas comunes a las de los mamíferos terrestres pero que se han modificado con relación a la adaptación al medio acuático (Gaskin, 1982). Algunas de estas características son las que presenta su sistema tegumentario. La piel de los cetáceos tiene una forma y disposición muy particular de las papilas dérmicas y de la irrigación sanguínea, relacionadas ambas con la superficie de contacto entre la membrana basal y la superficie epidérmica. Junto con otras modificaciones en su anatomía y fisiología, la morfología de la piel de los cetáceos refleja la vida de estos animales en un medio donde la pérdida de calor es muy superior a la que hay en tierra, donde el desplazamiento enfrenta una resistencia mayor al movimiento en tierra y en el que hay una concentración de sales mayor a la del medio interno.

Por lo anterior, en el presente trabajo se ha desarrollado un análisis de la geometría de la piel de los cetáceos para estudiar y revisar algunos conceptos sobre la interacción de estos organismos con su ambiente en aspectos como la termorregulación, la hidrodinámica y la osmorregulación.

## 4. ANTECEDENTES

### 4.1. GEOMETRÍA FRACTAL, DIMENSIÓN Y DINÁMICA.

Con el desarrollo de la matemática de los sistemas no lineales se ha permitido el analizar diversos procesos que evolucionan en forma compleja y que ocurren en todas las ramas de las ciencias, particularmente en biología. Con la aparición de los modelos no lineales, los sistemas se estudian buscando la descripción de todas las soluciones posibles, para identificar el comportamiento del sistema. Es así como se ha desarrollado la geometría fractal con relación a sistemas caóticos: las estructuras con diseño fractal son vestigios producidos por los sistemas no lineales o los procesos caóticos. Cuando un proceso caótico ha dado forma a un ambiente es posible que haya dejado tras de sí estructuras fractales. Sin embargo, la matemática de los fractales se desarrolló de forma independiente a la dinámica no lineal y aún hoy no se han establecido claramente las conexiones (Peitgen *et al.*, 1991).

Un fractal es un conjunto geométrico que consta de fragmentos de diferente tamaño y orientación pero de forma similar (Goldberger *et al.*, 1990; Mandelbrot, 1983). Como un fractal está compuesto por estructuras similares entre sí (autosemejanza) en distintas escalas, su magnitud no se encuentra definida; conforme se modifica la resolución del aparato de medida, aumenta la extensión del fractal sin que cambie de forma sustancial. El fractal ideal no cambia cuando se modifica la escala (Weibel, 1991). Este fenómeno se caracterizó por las mediciones hechas a la costa de Bretaña, a lo que se le conoce como la dimensión de compás (Peitgen *et al.*, 1991). En la geometría euclidiana la línea tiene una dimensión de 1, el área de un círculo tiene dimensión 2 y una esfera tiene un volumen de dimensión 3. Las dimensiones fractales ( $D_f$ ), son fraccionarias. Las magnitudes absolutas carecen de significado en el caso de los fractales, por lo que los matemáticos calculan la dimensión de un fractal para conocer de qué modo llena el espacio.



**FIGURA 1.** El fractal ideal no cambia al cambiar la escala con la que se mide porque se compone de estructuras autosemejantes (Mandelbrot, 1983).

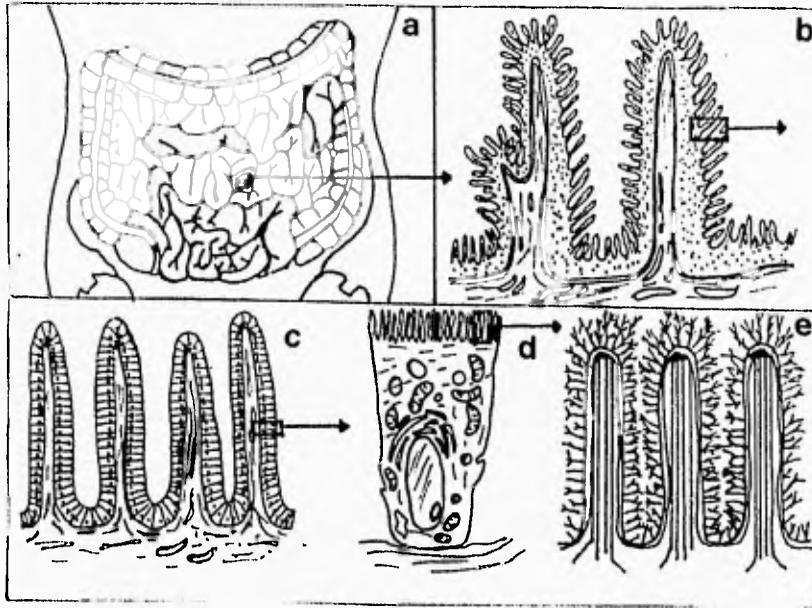
Cuanto mayor es la dimensión de un objeto fractal, tanto mayor es la probabilidad de que una región dada del espacio contenga una porción de ese fractal (Mandelbrot, 1983; Goldberger *et al.*, 1990). Un fractal se define como un conjunto geométrico para el cual la dimensión Hausdorff-Besikovitch excede la dimensión topológica y esta dimensión puede ser fraccionaria (Mandelbrot, 1983; Peitgen *et al.*, 1991) (Figura 1).

Se ha propuesto la existencia en la naturaleza de sistemas con diseño fractal debido a la dinámica compleja que presentan al ser sistemas alejados del equilibrio termodinámico. Ejemplos de ello son el crecimiento de plantas y corales y el cuerpo humano donde abundan las estructuras que se aproximan a la fractalidad como las redes nerviosas, las redes de vasos sanguíneos y otros conductos (Figura 2).



**FIGURA 2.** En la naturaleza también se encuentran estructuras con diseño fractal. Planta de zanahoria silvestre. En las hojas se reconocen estructuras con autosemejanza (Tomado de Jürgens *et al.*, 1990 y Goldberger *et al.*, 1990).

Las ramificaciones y repliegues fractales amplifican la superficie de las áreas de absorción, como el intestino, de distribución o recolección, como los vasos sanguíneos, los conductos biliares y los tubos branquiales, y de procesamiento de información, como la red nerviosa (Figura 3). Las estructuras fractales, debido a su redundancia, conforman sistemas resistentes a las lesiones (Mandelbrot 1983; Goldberger *et al.*, 1990; Peitgen *et al.*, 1991).



**FIGURA 3.** En la fisiología humana la geometría fractal ha servido para caracterizar las superficies, como se observa en el intestino humano. Si nosotros observáramos cualquiera de estas imágenes aisladamente difícilmente podríamos decir con qué escala tratamos (Tomado de Goldberger *et al.*, 1990).

Al caracterizar un sistema fisiológico no basta con obtener sus más obvias medidas al hacer un análisis morfométrico, sino que también se requiere del análisis de sus dimensiones que permita una mayor aproximación a su dinámica y funcionamiento.

#### 4.2. LA PIEL DE LOS MAMÍFEROS.

La piel (Figura 4) recubre la superficie del cuerpo y se constituye por una porción epitelial de origen ectodérmico, la epidermis, y una porción conjunta de origen mesodérmico, la dermis. Debajo y en continuidad con la dermis está la hipodermis que, aunque tiene el mismo origen y morfología que la dermis se distingue de ésta y sirve de soporte y unión con los órganos adyacentes (Montagna, 1962).

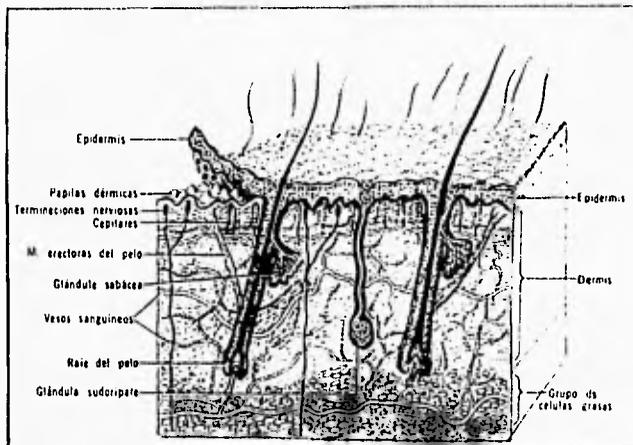


FIGURA 4. Esquema de la piel gruesa del humano (Tomado de Young, 1980).

La piel representa una barrera contra la invasión de microorganismos y actúa como protector ante acciones mecánicas, químicas, térmicas y osmóticas. Es importante para la regulación térmica y el mantenimiento del equilibrio hídrico. Es capaz de secretar y absorber. Por último, la piel es un importante órgano de comunicación, en parte por su propiedad de extenso órgano sensorial, en parte por emitir señales sobre los estados emocionales como mímicas y reflejos vasculares (Geneser, 1993).

#### 4.2.1. Epidermis.

La epidermis es un epitelio plano estratificado cuya principal función es la de proteger al organismo del medio y contra la pérdida de líquidos. La epidermis produce una cubierta protectora flexible que no impide los movimientos del organismo, es capaz de soportar el desgaste normal y presenta un mecanismo de autorrenovación. Esta capa recibe el nombre de estrato córneo y se elimina normalmente a una velocidad constante, correspondiente a la que se requiere para que las células se formen a partir de la parte viva más profunda del epitelio. La capa córnea se mantiene de un espesor determinado y característico sobre cada parte del organismo, con un promedio de 0.1 mm aproximadamente (Geneser, 1993).

En la piel se observa la transición entre la epidermis y la dermis como una línea límite irregular y ondulante. La epidermis a intervalos regulares emite procesos semejantes a crestas hacia la dermis adyacente, la cual se extiende entre las crestas formando bolsas de tejido conjuntivo vascularizado llamadas papilas (Geneser, 1993).

La forma compleja de la superficie limitante dermoepidérmica tiene gran importancia para el contacto firme entre la dermis y la epidermis. Puesto que la epidermis es avascular debe nutrirse de los capilares de la dermis subyacente por difusión a través de la superficie de contacto, el aumento de ésta es importante, sobre todo en los sitios donde la epidermis es gruesa. Se ha demostrado además una relación entre la altura y la ramificación de las papilas y la cantidad de arcos capilares y vasos sanguíneos. Por último, es de interés notar que las papilas pueden variar su aspecto en condiciones patológicas, la imagen de la superficie limitante puede ser característica en enfermedades de la piel (Cormack, 1987; Geneser, 1993).

En cortes perpendiculares a la superficie para microscopio fotónico pueden identificarse las siguientes cinco capas, consideradas desde el límite dérmico: estrato basal, estrato espinoso, estrato granuloso, estrato lúcido y estrato córneo.

1) Estrato basal: constituido por células cilíndricas o cuboides que descansan sobre una membrana basal nítida que separa la epidermis de la dermis.

2) Estrato espinoso: constituido por células poligonales, cuboidales o ligeramente aplanadas, de núcleo central y con pequeñas expansiones citoplásmicas que contienen tonofilamentos. Estas expansiones citoplásmicas confieren a las células un aspecto espinoso y mantienen unidas las células de este estrato mediante desmosomas.

3) Estrato granuloso: se caracteriza por la presencia de células aplanadas, rómbicas, con sus ejes mayores paralelos a la superficie de la piel, cuyo citoplasma contiene gránulos basófilos de queratohialina, que parece están asociados con el fenómeno de queratinización del epitelio. Además, estas células secretan gránulos de sustancias fosfolípicas unidas a polisacáridos ácidos que al precipitarse forman una capa intercelular que actúa impermeabilizando este estrato celular, impidiendo el paso de diversos compuestos, incluida el agua.

4) Estrato lúcido: (sólo en piel gruesa) constituido por una delgada capa hialina de células aplanadas, eosinófilas, cuyos núcleos desaparecerán al llegar al estrato superior.

5) Estrato córneo: tiene espesor muy variable y está constituido por células aplanadas, muertas y sin núcleo. El citoplasma de estas células aparece lleno de una escleroproteína birrefringente llamada queratina.

La epidermis es responsable de la relativa impermeabilidad de la piel, lo que dificulta la evaporación del agua por su superficie. Durante el proceso de queratinización se observa desde la base hasta la superficie de la epidermis un cúmulo gradual de fibrillas citoplasmáticas y de una sustancia amorfa que no sólo se acumula en los gránulos, sino que también se disponen entre las fibrillas (Cormack, 1987).

En otras regiones la epidermis no sólo es más delgada, sino también más simple, faltándole frecuentemente las capas granulosa y lúcida y presentando una capa córnea muy reducida.

#### **4.2.2. Dermis.**

La dermis es la capa de tejido conjuntivo sobre la que se asienta la epidermis y que en profundidad, sin límite definido, pasa al tejido rico en lípidos de la región subcutánea o hipodermis. En general, la dermis es más fina en las superficies ventrales que en las dorsales. Incluidos en el tejido conjuntivo dérmico se encuentran los folículos pilosos y las glándulas sudoríparas y sebáceas (Geneser, 1993; Cormack, 1987).

La dermis se compone de dos capas no muy bien definidas de las cuales, el estrato papilar ocupa las cavidades de la parte inferior de la epidermis, mientras que en lo profundo se encuentra el estrato reticular, más grueso (Geneser, 1993).

El estrato papilar se compone por tejido conjuntivo bastante laxo con algunas células y finos haces de fibras de colágena distribuidos formando una red laxa. A menudo se observan asas capilares en las papilas.

El estrato reticular es mucho más denso, con gruesas fibras de colágeno. Las fibras forman un reticulado denso, extendido de haces entrecruzados paralelos a la superficie del cuerpo.

Las células más frecuentes son fibroblastos y macrófagos, pero también se observan numerosos mastocitos. El estrato papilar es más rico en células que el tejido conjuntivo denso del estrato reticular (Geneser, 1993).

La enorme cantidad de colágena de la dermis le confiere gran fortaleza mecánica. El contenido de fibras elásticas contribuye a las propiedades elásticas de la piel. La elasticidad disminuye con la edad, lo que no se debe a una disminución del contenido de elastina sino, a una disminución del contenido de agua (Cormack, 1987; Geneser, 1993).

#### **4.2.3. Hipodermis.**

Está formada por tejido conjuntivo laxo que une de manera poco consistente la dermis a los órganos adyacentes. Es la capa responsable de deslizamiento de la piel sobre la estructura que le sirve de apoyo. Según sea la región en estudio y del grado de nutrición del organismo, la hipodermis tiene una capa variable de tejido adiposo que es donde se deposita la mayor parte de los lípidos de reserva para el organismo (Young, 1980; Junqueira, 1982).

#### **4.2.4. Faneras o anexos de la piel.**

**4.2.4.1. Pelo:** El pelo cubre casi toda la superficie de la piel en mamíferos típicos (Eliséiev *et al.*, 1985). El pelo es un sistema de aislamiento procedente de la epidermis queratinizada. Es probable que el pelo se haya desarrollado como proyecciones sensitivas especiales. La mayor parte de los pelos contiene cierta cantidad de pigmento. La melanina procedente de células pigmentadas de la epidermis es la sustancia común en todos los casos, en distintas concentraciones, de varios tonos desde el pardo hasta el negro (Romer y Parson, 1981).

**4.2.4.2. Uñas:** La uña es una lámina de estrato lúcido modificado, endurecida, plana, más o menos elástica, que descansa sobre el lecho ungular; es importante por su función de protección para algunos mamíferos (Cormack, 1987).

**4.2.4.3. Glándulas cutáneas:** Las glándulas cutáneas en el ser humano están representadas por las glándulas sebáceas y las glándulas sudoríparas apócrinas y ecrinas.

Las glándulas sudoríparas apócrinas se encuentran sólo en las axilas, alrededor del ano, en la zona genital, el conducto auditivo externo (glándulas ceruminosas), en las aureolas mamarias y en los párpados. Son estimuladas por las hormonas sexuales, por lo que terminan de desarrollarse y comienzan su secreción en la pubertad (Geneser, 1993). Las glándulas sudoríparas apócrinas son glándulas tubulares simples con la parte secretoria enrollada formando un ovillo con divertículos y eventuales anastomosis entre las partes del ovillo. El sudor apocrino tiene consistencia láctea y es de color blanco-grisáceo. Carece de olor, pero lo adquiere por degradación bacteriana (Geneser, 1993).

Las glándulas sudoríparas ecrinas se encuentran en casi todas las porciones del tegumento. La piel de las almohadillas de los dedos de las manos y de los pies y los pliegues axilares e inguinales muy rica en las glándulas sudoríparas. La secreción de las glándulas sudoríparas, el sudor, representa un líquido con densidad relativamente baja. El sudor contiene el 98% de agua y 2% de residuos densos formados por los productos metabólicos de proteínas y algunas sales (Eliséiev *et al.*, 1985). Las glándulas sudoríparas ecrinas tienen una estructura tubular simple. Constan del conducto excretor largo, en forma de espiral, perpendicular a la superficie cutánea, y de la porción terminal no menos larga, enrollada en forma de glómérulo. Los conductos

excretorios, al pasar por los estratos de la dermis y de la epidermis, se abren en la superficie de la piel por el llamado poro sudoríparo a diferencia de los conductos excretorios de muchas glándulas apócrinas que no forman poros sudoríparos, sino que desembocan junto con los conductos excretorios de las glándulas sebáceas en los infundibulos del pelo (Eliséiev *et al.*, 1985).

Las glándulas mamarias son glándulas sudoríparas modificadas que presentan un gran desarrollo en las hembras de todos los mamíferos. Su importancia funcional se relaciona con el sistema genital femenino, ya que asegura la alimentación primaria de un crío. En algunos grupos, las aberturas de la glándula se juntan para formar pezones sobresalientes. El número de pezones suele relacionarse con el número de crías que la hembra pare generalmente. Típicamente, una glándula mamaria activa contiene grupos de alveolos, de donde parten conductos que llegan a la superficie (Romer y Parson, 1981).

Las glándulas sebáceas alcanzan el máximo desarrollo en el periodo de la maduración sexual. A diferencia de las sudoríparas, las glándulas sebáceas casi siempre están asociadas al pelo, excepto donde no hay pelo (labios, pezones, etc.). La secreción de las glándulas sebáceas o sebo cutáneo sirve como lubricante para el pelo y para la epidermis. El sebo suaviza la piel, le da elasticidad y facilita la fricción de las superficies contactantes y también obstaculiza el desarrollo de los microorganismos de la misma (Eliséiev *et al.*, 1985).

#### **4.2.5. Receptores sensoriales.**

La piel posee una gran variedad de receptores sensoriales, que consisten básicamente de terminaciones nerviosas aferentes, relacionadas de manera especial con las células del tejido que les rodea y que transforman la energía de los estímulos en impulsos nerviosos. Hay al menos seis tipos morfológicos de receptores de la piel. Algunos son relativamente complejos e incluyen células de otros tipos además de la terminación nerviosa. Los diferentes tipos de receptores responden a estímulos diversos como, la presión o tensión y a la temperatura. Las áreas sensoriales de la corteza cerebral localizan las sensaciones resultantes en el área de superficie corporal respectiva. La estructura de los receptores sensoriales cutáneos más complejos es tal que responden a tipos específicos de estímulos que llegan a ellos en ciertas formas, mientras que los receptores sencillos suelen responder a estímulos de varios tipos. Los receptores cutáneos se clasifican, desde el punto de vista funcional en: 1) mecanorreceptores, que responden al desplazamiento resultante del tacto,

recepción o estiramiento; 2) termorreceptores, que lo hacen a los cambios de temperatura, y 3) nociceptores, que lo hacen a agentes nocivos e irritantes, causantes de dolor o escozor. En ocasiones resulta difícil establecer la relación de estas diferencias funcionales con las morfológicas y parece que receptores morfológicamente distintos pueden registrar el mismo tipo de estímulo y quizás incluso llevar al cabo las mismas funciones. Desde el punto de vista estructural, las terminaciones aferentes cutáneas corresponden a dos categorías amplias: terminaciones nerviosas libres y encapsuladas (Cormack, 1987).

#### 4.2.6. Irrigación de la piel.

El riego sanguíneo de la piel deriva de las ramas cutáneas de las arterias musculocutáneas del tejido subcutáneo. Las divisiones de tales arterias vacían su sangre en una red de vasos, el plexo cutáneo, que se sitúa en el límite de la dermis con el tejido subcutáneo o hipodermis. A partir de dicho plexo descienden ramas a capas más profundas o ascienden a la superficie. Las ramas profundas irrigan las partes más superficiales del tejido adiposo subcutáneo, porciones profundas de los folículos pilosos y porción secretora de las glándulas sudoríparas mientras que las ramas superficiales distribuyen sangre en la piel, conductos de glándulas sudoríparas, la porción superficial de los folículos pilosos y las glándulas sebáceas. Cuando llegan a la unión de las capas reticular y papilar de la dermis, estos vasos terminan en una segunda red plana consistente en arteriolas, vénulas y capilares: el plexo subpapilar (Romer y Parson, 1981).

Es útil conocer la localización de los extensos lechos capilares de la piel, ya que ello facilita la comprensión de la forma en que se regula la temperatura corporal. Los lechos capilares de la piel son extensos sólo en las regiones de tejido conjuntivo laxo inmediatamente subyacentes a la epidermis, así como las que rodean a la matriz de los folículos pilosos, las glándulas sudoríparas y las sebáceas. Desde el plexo subpapilar, los capilares penetran la epidermis en la forma de asas incluidas en las papilas dérmicas inmediatamente superiores. Estas asas papilares distribuyen líquido intersticial en las células basales de la dermis.

Los capilares y la vénulas dérmicas superficiales desempeñan una función importante en la regulación de la temperatura corporal. El calor corporal se pierde directamente a través de la piel. Cuando la temperatura ambiental es menor que la corporal, dicha pérdida puede regularse por modificación del grado en que los capilares y vénulas de los plexos papilar y subpapilar están

abiertos a la circulación. Esto depende del tono del músculo liso de los diversos vasos que regulan el flujo sanguíneo en el lecho vascular terminal, incluidas las anastomosis arteriovenosas relativamente numerosas que evitan el paso de la sangre por los lechos capilares, con lo que se conserva el calor corporal en la medida en que se necesita. En caso de que la temperatura ambiental sea mayor o igual que la corporal, las glándulas sudoríparas vacían su secreción en la superficie corporal para que se evapore y, con esto, se enfría la piel (Cormack, 1987; Maillet, 1980 a y b).

#### **4.2.7. Pigmentación.**

El color de la piel se debe a tres pigmentos y a la dispersión de la luz. La hemoglobina (reducida y oxidada) de los vasos de la dermis contribuye con el color rojizo. El caroteno es un colorante vegetal rojo amarillento, que luego de asimilarse en el organismo se deposita en el estrato córneo y en los adipocitos de la dermis e hipodermis, con lo que se confiere el color amarillento a la piel. Por último, se encuentra el componente oscuro melanina, producido en la piel por células denominadas melanocitos (Geneser, 1993). El melanocito presenta un aspecto característico con un cuerpo celular del que parten numerosas prolongaciones finas muy ramificadas. La melanina se sintetiza en el melanocito y es un producto de la polimerización de la enzima tirosinasa. El melanocito presenta un organelo celular específico, el melanosoma, donde se forma la melanina (Geneser, 1993).

La melanina protege a las células basales que sufren mitosis, contra las alteraciones químicas y genéticas que puede producir la luz ultravioleta (Cormack, 1987; Geneser, 1993).

### 4.3. LA PIEL DE LOS CETÁCEOS.

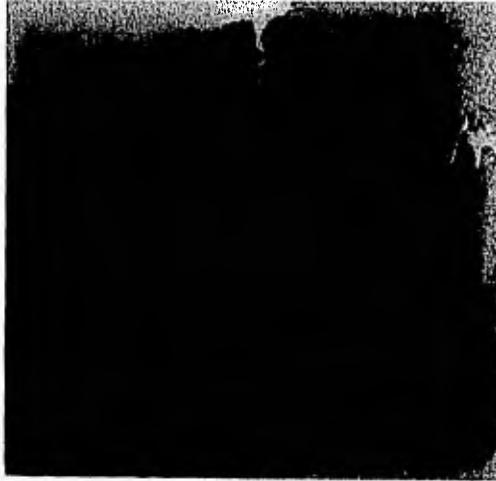
La piel de los cetáceos (Figura 5), presenta la estructura y las funciones comunes para el tegumento de todos los animales, como la protección, la regulación de la temperatura y la percepción sensorial. Sin embargo, la vida en el medio acuático demanda que en la estructura de la piel de los cetáceos haya modificaciones con respecto a la de los mamíferos terrestres (Simpson y Gardner, 1972).

La impermeabilidad de la piel en los mamíferos terrestres se relaciona con la cornificación y deshidratación de la superficie de la piel y por el depósito de materiales intercelulares ricos en lípidos, que impiden el movimiento del agua. En los cetáceos, el estrato externo está cornificado incompletamente, lo que hace más necesarios los cuerpos laminares cuyo contenido excitado forma una barrera impermeable (Simpson y Gardner, 1972).

La piel de los cetáceos aunque parece altamente especializada, revela elementos morfológicos y funciones comunes con otros mamíferos (Geraci *et al.*, 1986).

#### 4.3.1. Epidermis.

La epidermis de los cetáceos es 10 a 20 veces más gruesa que la de los mamíferos terrestres, en promedio de 2 a 4 mm en algunas especies y de 12 mm en la beluga (Brown *et al.*, 1983). El grosor es variable dependiendo de la región corporal y cambia con la edad (Harrison y Thurley, 1974). En la superficie de la epidermis se presentan unos surcos dérmicos alineados paralelamente, a todo lo largo, extendiéndose por el eje axial (Purves, 1963). Los surcos dérmicos aparecen en forma de huellas y estos tienen correspondencia con las papilas dérmicas (Sokolov y Bulina, 1969). Las papilas dérmicas se encuentran altamente vascularizadas y con terminales nerviosas que penetran en la epidermis particularmente en mayor proporción en la parte ventral del cuerpo (Palmer y Weddell, 1964).



**FIGURA 5.** Fotomicrografía de un corte perpendicular de la piel de *Balaenoptera musculus* teñida con Hematoxilina-Eosina. EG: estrato germinativo, EE: estrato espinoso, EC: estrato externo o córneo. D: dermis, Pp: Papila dérmica (32 X).

Existe una discusión acerca del número de estratos celulares presentes en la epidermis. Geraci *et al.* (1986) consideran sólo tres estratos: estrato germinativo, estrato espinoso y estrato externo. El primero, se encuentra sobre la membrana basal, está en contacto con la dermis, y se denomina estrato basal o estrato germinativo (Harrison y Thurley 1974; Ling, 1974). El estrato germinativo es una capa de células de dos tipos: células altas columnares y melanocitos, en una proporción de 12:1 (Harrison y Thurley, 1974). Las células epiteliales están unidas a la membrana basal por numerosos hemidesmosomas y entre una y otra por desmosomas. El citoplasma es típico de células germinativas de mamíferos, contienen numerosas mitocondrias perinucleares y un notable retículo endoplásmico con sus ribosomas; el núcleo oval, con una red de cromalina puede tener uno o tres nucléolos (Geraci *et al.*, 1986).

Los melanocitos claramente se localizan entre las células epidérmicas con procesos semejantes a los presentados en otros mamíferos (Harrison y Thurley, 1974). El tamaño de los gránulos de melanina así como la velocidad del proceso por el que se sintetiza, define el patrón de coloración (Gwinn y Perrin, 1975).

En *Tursiops truncatus* se ven de 35 a 50 renglones de células esféricas cerca del origen del estrato germinativo y de células elípticas y aplanadas conforme se acercan a la superficie de la piel. Estas tienen pocas mitocondrias, complejos de Golgi, ribosomas, gotas de lípidos del mismo tamaño, más tonofilamentos y desmosomas que en las células epiteliales de la capa germinal. Numerosos cuerpos laminares aparecen en la periferia del citoplasma y una agregación de gránulos de melanina sobre el núcleo. El núcleo usualmente contiene sólo un nucléolo grande (Geraci *et al.*, 1986). Harrison y Thurley (1974) subdividen las células de esta región en estrato espinoso inferior y estrato intermedio basados en el tamaño de las células y su orientación. En ausencia de una mejor definición de su ultraestructura o una aparente diferencia funcional, Geraci *et al.* (1986) usan el término de estrato espinoso que describe todas las células que se encuentran entre el estrato germinativo y el estrato externo de la piel.

Existe controversia para precisar la naturaleza de la capa externa. Algunos autores reportan la presencia de queratina. Palmer y Weddell (1964) han adoptado el nombre del estrato córneo. La queratina puede evidenciarse mediante un estudio histoquímico, sin embargo el proceso de cornificación es incompleto, Geraci *et al.* (1986) así como Harrison y Thurley, (1974) han preferido llamarlo simplemente estrato externo. El grosor de esta capa varía entre la cría y un adulto y entre especies. Geraci *et al.* (1986) han observado aproximadamente 50 capas de células en el estrato externo de *T. truncatus*, pero se han reportado menos. Esto se debe a la alta tasa de exfoliación. Las células de estas capas tienen remanentes nucleares y ocasionalmente el núcleo intacto. El citoplasma contiene tonofilamentos densos, gotas de lípidos y gránulos de queratohialina. Los cuerpos laminares son abundantes en las células de unas capas más abajo del estrato externo, pero en las células de éste ya no aparecen, quizá porque se descargan en el espacio intercelular, y esto puede ocasionar la acumulación de material granular oscuro como Harrison y Thurley, (1974) lo observaron en esta capa.

#### **4.3.2. Dermis.**

La dermis de los cetáceos presenta cuantitativas y cualitativas con los mamíferos terrestres. En la dermis de los cetáceos es más notable el grosor relativo y la elaboración de las papilas que se extienden de la dermis hacia la transición dermis-epidermis, además de la ausencia de los folículos pilosos y las glándulas cutáneas. La capa papilar de la dermis está estructurada por largas

proyecciones entre las líneas correspondientes de la epidermis. Los surcos dérmicos se acomodan en diferentes planos; en las ballenas se dispone en forma longitudinal al cuerpo y horizontal en la superficie de la piel. La dermis se mezcla gradualmente con la capa adiposa, siendo relativamente más densa en las aletas dorsales, flancos y en la cola. En estas zonas existe una gran vascularización y se proponen como zonas de intercambio de calor. Comparada con la del hombre, la colágena dérmica es más densa. (Simpson y Gardner, 1972; Giacometti, 1967; Ling, 1974).

#### **4.3.3 Hipodermis.**

La hipodermis es la capa de mayor grosor y varía dependiendo de la especie, la edad, el tamaño, el estado de salud, la disponibilidad de alimento entre otros. En general, la capa de grasa es gruesa en la parte dorsal y en algunas áreas posteriores del cuerpo; es comparativamente delgada en las áreas inferiores y ventrales del cuerpo y se reduce a un mínimo en las áreas alrededor de los ojos, los labios, aperturas del cuerpo, las aletas y la cola (Tinker, 1988).

Las arteriolas musculares y las venas corren paralelas a la superficie y a la capa superficial de la dermis. Verticalmente corren las arteriolas por el centro de cada papila dérmica y está conectada a canales de anastomosis con venas a cada costado. Estas estructuras de plexos arteriovenosos se encuentran únicamente en la cola y en las aletas. La piel de los cetáceos está ricamente inervada con nervios y terminales nerviosas que están presentes en la porción superficial de la dermis particularmente en la región de la mandíbula, cola, vulva y perineo (Simpson y Gardner, 1972).

#### **4.3.4. Crecimiento epidérmico.**

La piel de los cetáceos tiene un crecimiento rápido se renplaza en poco tiempo y se desprende en forma más activa que en otros mamíferos (Geraci *et al.*, 1986). El ciclo de recambio epidérmico varía entre 21 y 70 días. Con relación al tamaño de las papilas dérmicas, si las células del estrato basal se encuentran en la parte superior de la papila tendrán un rápido avance, si por el contrario se encuentran en el fondo de la papila tardarán más tiempo en alcanzar la superficie (Hoar, 1978).

En la piel de los humanos la capa germinal y la capa superficial de la epidermis tienen una relación de aproximadamente 1.5:1. En *Tursiops* la proporción es de 13.4:1 (Sokolov y Bulina,

1969). Se estima que la capa más externa de la epidermis de *Tursiops* se renueva cada 2 h o 12 veces por día (Brown *et al.*, 1983) lo que es 9 veces más rápido que el desprendimiento en el hombre (Geraci *et al.*, 1986; Ling, 1974).

#### 4.4. FUNCIONES DE LA PIEL EN LOS CETÁCEOS.

##### 4.4.1. Termorregulación.

La producción de calor en algunos animales es suficiente para aumentar la temperatura de los tejidos a niveles que incrementan significativamente la velocidad de las reacciones químicas. En algunos casos, y especialmente en climas cálidos, la producción de calor puede crear problemas por temperatura corporal excesivamente alta. Una mayor pérdida de calor en climas fríos puede disminuir la temperatura corporal hasta niveles peligrosamente bajos, en los que otra disminución de temperatura condicionaría mayores pérdidas de calor corporal, entrando en un círculo vicioso de disminución de la producción de calor y cada vez más enfriamiento (Eckert *et al.*, 1990).

Cuatro procesos físicos están implicados en la transferencia de calor del interior del cuerpo al entorno: conducción, convección, radiación y evaporación. Si se ignora el 5% que se pierde por la orina y las heces, la pérdida de calor tiene lugar por medio de estos cuatro procesos físicos a través de la superficie de la piel y los pulmones (Hardy, 1980).

La temperatura de un animal depende del calor producido por unidad de masa y del calor perdido por unidad de área. La tasa de transferencia del calor hacia fuera o hacia dentro del animal depende de tres factores (Kleiber, 1972): 1) Superficie. La superficie por gramo de tejido disminuye al aumentar la masa corporal determinando que los animales pequeños tengan un flujo elevado de calor por unidad de peso corporal. 2) Gradiente de temperaturas. Cuanto más próxima mantenga su temperatura un animal con la del ambiente, menos calor cederá o captará su cuerpo y 3) conductancia específica de calor. Los homeotermos han desarrollado plumajes, pelajes o capas de grasa para disminuir la conductancia calórica de la superficie corporal. Este aislamiento extiende la diferencia de temperatura entre el centro del cuerpo y el medio que circunda al animal en una distancia de varios milímetros o centímetros de forma que el gradiente de temperatura (el cambio

de temperatura por unidad de distancia) sea menos drástico y así se reduzca la tasa de flujo de calor.

Entre los mecanismos empleados por los animales para regular el intercambio de calor con el medio podemos citar los siguientes:

1) el control del comportamiento que incluye desplazarse a un medio en el que la temperatura se aproxime a un óptimo. Los animales controlan también por cambios posturales la cantidad de superficie aprovechable en el intercambio de calor. 2) el control fisiológico del flujo sanguíneo en la piel de los vertebrados que influye en el gradiente de temperaturas, y por ello en el flujo de calor, en la superficie corporal. La activación de músculos piloerectores controla el grosor del pelaje y del plumaje, determinando la efectividad del aislamiento. La sudoración y la salivación durante el jadeo causa enfriamiento por evaporación y 3) el control adaptativo que incluye cambios a largo plazo del pelaje o de la capa grasa aislante hipodérmica, seguramente causados por hormonas, y cambios de la capacidad de control autónomo de la pérdida de calor por evaporación mediante sudoración (Eckert *et al.*, 1990).

En los endotermos homeotérmicos (la mayor parte de los mamíferos y las aves), la temperatura del cuerpo está estrechamente por mecanismos homeostáticos que regulan las tasa de producción y de pérdida de calor para mantener una temperatura corporal relativamente constante e independiente de las temperaturas ambientales. Las temperaturas de los tejidos periféricos y las extremidades son mucho menos constantes, aproximándose a veces a las temperaturas ambientales.

La pérdida de calor en la epidermis se reduce por disminución del riego sanguíneo a través de los vasos superficiales, hasta los niveles mínimos necesarios para asegurar los requerimientos metabólicos de los tejidos implicados. La mayor parte de la sangre pasa por los lechos capilares y una pequeña parte se dirige hacia las anastomosis arteriovenosas llamadas glomos; estos son conductos de baja resistencia al flujo sanguíneo situados entre las arterias y vénulas, sus paredes son relativamente finas y en ellas tiene lugar intercambios de calor. La sangre venosa retorna, predominantemente, por las *venae comites*, constituidas por vías venosas profundas que corren en las proximidades de las arterias. Este montaje anatómico hace posible el intercambio de calor a contracorriente. La sangre arterial, con mayor temperatura, circula desde las partes internas hacia la periferia; el retorno venoso circula en dirección opuesta (Hardy, 1980).

El calor pasa de la sangre arterial a la venosa adyacente, con lo cual la primera se enfría ligeramente, al tiempo que alcanza los lechos capilares mientras que la segunda ha sido sustancialmente recolectada y penetra en las partes internas del cuerpo. Un intercambio de calor a contracorriente que sea eficiente es de gran importancia en la conservación del calor porque gran cantidad de calor transportado por la sangre arterial vuelve al interior sin haber alcanzado la periferia. Esta eficacia depende de la configuración anatómica de los elementos arteriales y venosos en la base de las extremidades, que se conocen como *retia mirabilis*. El intercambio de calor a contracorriente es de particular importancia en aquellos animales que viven en condiciones de frío extremo (Hardy, 1980).

Las conductancias específicas de los homeotermos varían dentro de un intervalo muy amplio y se relacionan con la talla corporal. Los animales grandes tienen menor conductancia térmica específica debido a su recubrimiento. Presentan además menores pérdidas calóricas en climas fríos, porque tienen superficies relativas menores. Por ello, una de las adaptaciones de los endotermos a zonas frías es el aumento de tamaño corporal. Al disminuir la relación superficie/volumen y engrosar la capa de grasa disminuye la conductancia (Eckert *et al.*, 1990).

Los cetáceos pueden considerarse como térmicamente uniformes y con una capa de grasa como aislamiento (Scholander *et al.*, 1950). Su temperatura es constante y se encuentra en el intervalo usual para mamíferos entre 35°C y 38°C (Kanwisher y Leivestad, 1957), son mamíferos que viven en todos los mares. En el curso de la evolución han regresado al mar con las obvias restricciones de un ambiente acuático para un mamífero. Tales circunstancias engloban problemas de respiración y de mantenimiento de la temperatura corporal, entre otros, la vida acuática impone varias dificultades que se relacionan con la alta conductividad al calor por parte del agua y como resultado una pérdida mayor por el flujo de calor entre el agua y la superficie del cuerpo (Kanwisher y Sundnes, 1970; Scholander y Krog, 1971).

Existe la condición necesaria de una temperatura constante en el cuerpo, lo que significa que el calor que pierde con el ambiente debe ser igual al calor producido metabólicamente en el animal. La alta temperatura en los mamíferos requiere que exista un aislamiento en la superficie del cuerpo que resista la pérdida de calor. En los cetáceos la principal barrera térmica es la capa de grasa que se encuentra bajo la dérmis de todo el cuerpo (Brodie, 1975).

Cuando el animal está en actividad, reforzar la barrera térmica puede resultar contraproducente. Los cetáceos se valen de cambios en el flujo sanguíneo para mantener una temperatura corporal uniforme de forma similar a como lo hacemos los humanos. Sin embargo existen grandes diferencias fisiológicas, tales como la carencia de glándulas sudoríparas por parte de los cetáceos, además de que el enfriamiento por evaporación en un medio acuático es imposible (Kanwisher y Leivestad, 1957).

La alta conductividad térmica del agua obliga a que la temperatura de la superficie de la piel sea casi igual a la del agua. Esta diferencia entre la temperatura del animal y el agua se contrarresta efectivamente con el aislamiento necesario manteniendo sin variaciones su temperatura corporal (Kanwisher, 1960). La capa de grasa de los grandes cetáceos en general parece ser mucho más gruesa que lo que requiere el aislamiento térmico. Kanwisher y Ridgway (1983) propone que la capa de grasa presenta otras funciones. El tejido graso, que tiene un peso específico bajo, proporciona la flotabilidad suficiente para contrarrestar la flotabilidad negativa del músculo y del esqueleto de los cetáceos. La grasa constituye, además un almacén de energía suficiente para cubrir las necesidades metabólicas de los muchos cetáceos durante sus migraciones estacionales.

Los cetáceos pueden hacer algunos cambios en la tasa de producción de calor a diferencia de otros mamíferos. Al pasar desde un estado de reposo a uno de máximo esfuerzo pueden incrementar la tasa metabólica y dar como resultado una producción de calor diez veces mayor. El aislamiento necesita ser una condición inversamente relacionada a la tasa de producción de calor y puede haber, sin embargo, cambio en algunos factores que varían con la temperatura del agua, lo que sugiere que los cetáceos que habitan en aguas frías necesitan de 25 a 50 veces un aislamiento más efectivo que el que presentarían los cetáceos del trópico (Kanwisher y Ridgway, 1983; Whitow, 1987).

Los mecanismos empleados por los cetáceos son sistemas de contracorriente simples que han sido observados también en los peces heterotérmicos y que se encuentran en las zonas periféricas de la piel muy cerca de las branquias (Romer y Parson, 1981).

La sangre en el cuerpo de un animal transporta calor desde zonas calientes hacia áreas frías. Esta transferencia de calor llamada difusión, puede ser una ventaja en zonas frías. En este sentido Tomilin (1951) ha puntualizado que la cola y las aletas son superficies difusoras de calor

eficientes debido a que no presentan un gran aislamiento y si un rico riego sanguíneo. La sangre circula y entra en contacto con zonas a una temperatura similar a la del mar por lo que se enfría más rápidamente. En las aletas el flujo de calor es de 3 a 4 veces mayor que en cualquier otra parte del cuerpo del animal, con lo que se demuestra la baja conductividad de la grasa, pues en estas zonas no existe tal capa. En aguas tibias la conductividad de un tejido vivo es de 35 a 60% más grande que la de un tejido muerto. La diferencia se debe a los sistemas de contracorriente en la circulación (Kanwisher y Leivestad, 1957).

Parry (1949), sugirió que la red de la circulación a través de la grasa provee variaciones en la conductividad. Los valores obtenidos de la capa de grasa se acercan linealmente al gradiente de temperatura entre la temperatura del animal y la temperatura del mar (Kanwisher y Sundnes, 1970).

Los pequeños cetáceos son sujetos de manejo más accesible por lo que existen estudios fisiológicos más completos. Kanwisher y Ridgway (1983) observaron que en los pequeños cetáceos existe también una pérdida del 5% de calor por evaporación en los pulmones. Los cetáceos presentan varias estrategias para encontrarse en equilibrio térmico con el medio donde se hallan. Es necesario que exista una temperatura constante en el cuerpo de forma que el calor que pudiera perder en el ambiente sea producido metabólicamente. La capa de grasa en conjunto con un mecanismo de regulación sanguínea, ha permitido que la pérdida de calor por medio de la piel este restringida, y sólo por las aletas y cola se puede llevar a cabo la regulación térmica a niveles más altos. Sin embargo, el organismo puede encontrarse en condiciones donde es necesario perder calor corporal (situaciones de máximo esfuerzo y/o en aguas cálidas), en cuyo caso la regulación del flujo sanguíneo permitirá que el sistema funcione de una forma inversa (Kasting y Shelley, 1989; Whitow y Hampton, 1974).

#### 4.4.2. Hidrodinámica.

El costo metabólico de desplazar una masa de tejido animal una distancia dada depende de varios factores puramente físicos (Eckert *et al.*, 1990):

1) Inercia: es la tendencia de una masa a resistirse a la aceleración, mientras que el ímpetu se refiere a la tendencia de una masa en movimiento a mantener su velocidad. Cada objeto posee una inercia y un ímpetu proporcional a su masa. 2) Resistencia hidrodinámica: Ya que los animales no se mueven en el vacío, la energética de la locomoción sostenida está influenciada por las

propiedades físicas del gas o líquido a través del cual se mueven. Para un objeto de un contorno determinado, la resistencia hidrodinámica es proporcional a la superficie. Ya que los animales grandes presentan una relación superficie-volumen menor, experimentan menos resistencia del fluido por unidad de masa que los animales pequeños, a los que les cuesta más vencer la resistencia al avance. Una vez que un animal grande está en movimiento gasta menos energía por unidad de masa para impelerse a una cierta velocidad que un animal pequeño de forma similar. Estas diferencias son más marcadas en el agua que en el aire, ya que el agua, al tener una viscosidad y densidad superiores, produce en un objeto en movimiento mucho más resistencia que el aire. La resistencia hidrodinámica es muy importante en la natación, debido a la gran viscosidad que opone el agua a los animales nadadores. El número de Reynolds cuantifica esta relación.

Los animales que nadan, como algunos invertebrados, los peces y los mamíferos marinos, no necesitan sostener su propio peso. Sin embargo, aunque la elevada densidad del agua les permite flotar, también les produce una gran resistencia al avance. Este problema de los animales para moverse a través de un líquido ha conducido a una convergencia de formas corporales entre los diferentes vertebrados. El perfil del cuerpo hidrodinámico y fusiforme se ha desarrollado en tiburones, teleósteos, ictiosaurios y delfines de forma independiente. El motivo se comprende en términos del modelo de flujo el cual describe la facilidad que tiene un objeto para moverse a través del agua. El líquido que se encuentra inmediatamente sobre la superficie del objeto se mueve a su misma velocidad mientras que el líquido que se encuentra a gran distancia de la superficie del objeto no se mueve. Si la transición de la velocidad del líquido es continua, el flujo que se aparta de la superficie del objeto y que se encuentra en la capa límite se dice que es laminar. El flujo turbulento se produce como resultado de bruscos gradientes de la velocidad de flujo y por lo tanto de cambios de presión. Debido a la conservación de la energía, la presión y la velocidad se relacionan inversamente en un sistema dado de fluido, correspondiendo a una mayor velocidad del líquido en un lugar dado, una menor presión. Así, velocidades de flujo muy diferentes alrededor de un objeto le producirán corrientes en remolino debido a modelos de flujo secundarios que se establecen entre las regiones de presión alta y las de baja. La turbulencia, debido a que su formación requiere energía, disminuye la eficiencia de la energía metabólica utilizada en el movimiento propulsor (Eckert *et al.*, 1990).

Las formas largas y fusiformes facilitan el flujo laminar, minimizando la formación de corrientes en remolino. Los peces y los mamíferos marinos como las focas, marsopas y ballenas son muy hidrodinámicos, consiguiendo pasar a través del agua casi sin turbulencia incluso a elevadas velocidades. Un factor muy importante para reducir la turbulencia es la ductibilidad de la superficie corporal dada por la piel en los mamíferos marinos y las escamas en los peces. Esta ductibilidad amortigua pequeñas perturbaciones de la presión del agua que originan la turbulencia, con el consiguiente gasto de energía (Williams, 1987; Hertel, 1969). En los mamíferos marinos, y en particular en los cetáceos, la epidermis es muy importante para minimizar la turbulencia generada en la superficie de la piel, por lo que es altamente hidrodinámica (Lang, 1966b). Esto puede explicar el grosor de la epidermis de algunas zonas como las aletas, la cola y la aleta dorsal (Sokolov y Bulina, 1969).

La resistencia y la fricción son disminuidas por la forma de la superficie de la piel, lo que ayuda a mantener el flujo laminar en la capa de contacto entre la piel y el agua. Gray (1936) calculó que la forma de los delfines es muy eficiente en el movimiento a través del agua. Actualmente se han descubierto algunas otras propiedades de la piel de los cetáceos que ayudan a reducir la fricción y por lo tanto el flujo turbulento. Esto incluye directamente un cambio en la plasticidad de la piel modulando su superficie en respuesta a la presión ejercida sobre esta; el calor producido en este momento en la superficie de la piel, disipará la segregación de macromoléculas que se encuentran en la capa superficial de la epidermis (Purves, 1963; Shoemaker y Ridgway, 1991; Lang, 1966a).

Sokolov (1982) notó algunas diferencias en la estructura de la piel si el organismo nadaba rápida o lentamente. Esto sugiere que un delfín puede modular el patrón de flujo que pasa sobre su cuerpo cambiando la ductibilidad de la piel. Sin embargo, esto requeriría de un control neuromuscular a nivel de la dermis y algún mecanismo de regulación del fluido sanguíneo de la capa vascular y de las papilas dérmicas para mantener de forma erecta el tejido. Esta hipótesis no ha sido comprobada pero no se descarta la existencia de un control neuromuscular para regular la ductibilidad de la piel.

Las partículas de lípidos que se encuentran inmersas en la capa superficial de la epidermis reducen la fricción generada por la resistencia. Algunos peces usan en su superficie corporal una cadena de moléculas que reducen la fuerza de fricción. Este mecanismo de reducción de la fricción

puede considerarse en los cetáceos. La secreción lagrimal y la secreción epidérmica son dos posibles formas de reducción del flujo turbulento. Harrison y Thurley (1974) describen que las gotas de lípidos son particularmente abundantes en las células epidérmicas, entre el estrato externo y el estrato medio. En ese momento no se sabía nada acerca de su función. Actualmente Geraci *et al.* (1986) han encontrado en otros mamíferos esta mezcla de lípidos con apariencia similar a la de los peces en los cuerpos laminares localizados en la epidermis.

El flujo de agua en los odontocetos es un patrón definido que se encuentra en forma de espejo con respecto a la orientación de los surcos dérmicos en el animal. Los surcos de la piel se encuentran orientados de forma que facilitan la libre circulación del agua presentando la mínima resistencia (Purves, 1963). Este fenómeno se encuentra estrechamente relacionado con la pigmentación de la piel en los odontocetos. Existen hipótesis que sugieren que la presión ejercida por las corrientes al pasar por la superficie cutánea estimula la producción de pigmentos en ciertas zonas corporales (Viale, 1979). Giacometti (1976) encontró patrones similares para la ballena de aleta *Balaenoptera physalus* y en algunas preparaciones de piel de *T. truncatus*. Estos canales o surcos muestran la dirección del fluido al pasar por la superficie de la piel de los cetáceos. Los efectos pueden acentuarse por las células epidérmicas de la capa superficial diferenciándose de las otras partes de la piel por medio de pigmentaciones distintivas.

La ductibilidad de la superficie de contacto puede ser similar a la de una esponja, como lo sugirió Kramer (1960), aunque de una forma más absorbente de la fricción, al existir gotas de lípidos entre las capas superficiales de la epidermis. Estas gotas de lípidos pueden funcionar absorbiendo los cambios bruscos de presión del agua al pasar por la superficie, previniendo la turbulencia, de forma que la superficie de contacto nunca deja de perder su consistencia original. Esto explicaría en gran medida el eficiente movimiento de los mamíferos marinos al nadar, al presentar una estructura moldeable y con una sustancia que contribuye a su ductibilidad. Schoemaker y Ridgway (1991) desarrollaron una investigación encaminada a saber si existía alguna relación entre los surcos dérmicos y el tamaño del animal; aparentemente no existe tal relación. De igual forma, comprobaron que las mediciones hechas de surcos dérmicos en animales vivos eran muy diferentes a las encontradas en organismos muertos. Finalmente, estos autores especularon acerca de la relación entre las papilas dérmicas y los surcos dérmicos, sugiriendo que la localización de las papilas dérmicas con respecto a los surcos dérmicos parece estar más

cercana al paralelismo que a ser perpendicular a los surcos que corren en circunferencia por el cuerpo del animal.

La función de los surcos dérmicos de los cetáceos en la piel, se relacionan con la sensibilidad táctil y con las características hidrodinámicas del cuerpo. Estas dos funciones pueden conjugarse como un mecanismo sensitivo que detecta, por medio de sus receptores algún cambio de presión en la superficie de la piel (Purves, 1963; Sokolov, 1982).

Purves (1963) describió el patrón de flujo del agua a través de la superficie corporal. Esto tiene como explicación la forma de propulsión de los pequeños cetáceos que consiste básicamente del movimiento propulsor de la cola hacia arriba. Por su parte, los surcos dérmicos que se localizan en las aletas pectorales y en la aleta dorsal están orientadas hacia la parte posterior del animal conforme a la circulación de forma que presentan un mínimo de resistencia y un 90% de flujo laminar. Los músculos pectorales no se encuentran muy desarrollados y no son muy fuertes, su principal función es la de mantener estable al animal, funcionando como timones.

Las consecuencias hidrodinámicas de los surcos dérmicos son poco claras. Algunos investigadores sugieren que los pequeños cetáceos decrecen la fricción hidrodinámica diluyendo la transición del flujo turbulento sobre su cuerpo (Gray, 1936). Los surcos dérmicos dan la apariencia de ser muy rugosos y con una tendencia a producir la transición del flujo laminar al flujo turbulento (Shomaker y Rigdway, 1991).

#### **4.4.3. Osmorregulación.**

Es muy importante en la evolución animal la capacidad de mantener, frente a un estrés osmótico, un medio interno apropiado. La distribución geográfica de los animales está restringida por factores ambientales, siendo uno de los factores importantes la naturaleza osmótica del medio. Algunos de los requerimientos de la regulación del medio interno son retener una cantidad apropiada de agua y mantener las concentraciones adecuadas de distintos solutos, como son sales y moléculas nutrientes. En los organismos pluricelulares existen mecanismos para la regulación de los solutos extracelulares. De igual forma existen mecanismos para eliminar del medio celular los residuos tóxicos que se acumulan como un subproducto del metabolismo (Eckert *et al.*, 1990).

Al conjunto de los mecanismos que regulan las diferencias entre los espacios intra y extracelular se les llama mecanismos osmorreguladores. Eckert *et al.* (1990) proponen que los intercambios osmóticos que se producen entre un animal y su medio pueden ser de dos clases: 1) intercambios obligatorios: aquellos que ocurren en respuesta a factores físicos sobre los cuales el animal tiene muy poco o ningún control fisiológico y 2) intercambios regulados fisiológicamente y que ayudan a mantener la homeostasis interna.

Cuando consideramos el intercambio obligatorio entre un organismo y su medio, el tegumento, las superficies respiratorias y los otros epitelios en contacto éste, actúan como las barreras del intercambio obligatorio. Los distintos factores implicados en este intercambio obligatorio han sido revisados por Eckert *et al.* (1990) y los describen como sigue:

1) Gradiente entre el compartimiento extracelular y el ambiente. Cuanto mayor sea la diferencia entre la concentración de una sustancia en el medio externo y la de los líquidos corporales, mayor será la tendencia a la difusión neta en la dirección de menor concentración.

2) Relación superficie-volumen. El volumen de un animal varía con el cubo de sus dimensiones lineales, mientras que su superficie varía con el cuadrado de esas dimensiones.

3) Permeabilidad del tegumento. El tegumento es una barrera entre el compartimiento extracelular y el medio. La permeabilidad del tegumento al agua y a los solutos varía según el grupo animal. Los animales terrestres poseen por lo general tegumentos con permeabilidades al agua mucho menores a la de los anfibios y pierden agua más lentamente por esta vía. La baja permeabilidad del tegumento de estos grupos se mantiene en aquellas especies que han vuelto nuevamente al agua marina como los mamíferos marinos. La permeabilidad del tegumento al agua es menor en animales que muestran un grado de osmorregulación elevado que en aquellos que regulan menos.

4) Alimentación. Con la alimentación se obtiene agua y solutos. La dieta puede incluir un exceso de agua o un exceso de sales, de forma que estos organismos deberán presentar sistemas alternos a los comúnmente utilizados para la excreción.

El tejido osmorregulador es el epitelio de transporte de órganos como las branquias, la piel, los riñones y el intestino. Las células epiteliales se distinguen de todas las otras por estar polarizadas anatómica y fisiológicamente. El extremo apical está en contacto con el medio mientras que el extremo basal se orienta hacia el compartimiento interno que contiene el líquido extracelular.

Ambos extremos presentan uniones especiales de membrana para realizar el transporte osmótico (Hui, 1981). Las capacidades de los epitelios de transporte de los órganos osmorreguladores pueden incrementarse en gran medida por su organización anatómica, como se observa en los riñones de los vertebrados superiores (Eckert *et al.*, 1990).

Schmidt-Nielsen, (1981) al investigar porqué las aves marinas pueden mantener su balance osmótico sin tener acceso al agua dulce, descubrió una glándula nasal que segrega una solución hipertónica de NaCl a la que llamó glándula de sal. Estas glándulas de las aves y de muchos reptiles ocupan depresiones superficiales en el cráneo, por encima de los ojos. La secreción activa se produce a través del epitelio de los túbulos secretores. Estas células tienen una gran cantidad de invaginaciones profundas en su lado basal y poseen gran cantidad de mitocondrias. Como en otros epitelios transportadores, las células se encuentran enlazadas por uniones estrechas que impiden la difusión masiva de agua o solutos de un lado del epitelio al otro por fuera de la célula.

La formación del líquido de la glándula nasal no es por filtración como ocurre en la formación de la orina. Se ha localizado una ATPasa activada por sodio y potasio en la membrana basolateral y bloqueada por ouabaina. Este inhibidor no pasa a través del epitelio y sólo puede bloquear la bomba por contacto directo, de lo que se infiere que la enzima opera en la membrana de la célula epitelial.

La glándula de sal está organizada como un sistema de contracorriente que puede ayudar a concentrar sales en el líquido segregado. Los capilares están dispuestos de forma que el flujo de la sangre sea paralelo a los túbulos secretores y en la dirección opuesta al flujo de la secreción.

Los mamíferos marinos como los pinnípedos y cetáceos no tienen, en principio, órganos extrarrenales de secreción de sales similares a las glándulas de la sal de aves y reptiles o a las branquias de los peces. Sin embargo, los mamíferos marinos están dotados, como otros mamíferos, de riñones muy eficientes que son capaces de producir una orina muy hipertónica. Los mamíferos marinos no beben agua de mar, toman el agua de los alimentos ingeridos, así que utilizan el trabajo osmorregulador de su presa evitando una gran parte del trabajo osmótico que tienen los teleosteos, reptiles y aves que beben agua de mar (Eckert *et al.*, 1990).

La ausencia de glándulas sebáceas en los cetáceos ha despertado el interés de los investigadores buscando algún sistema alternativo de excreción encontrando que tal vez algunos

cetáceos excretan líquidos ricos en sales a través de numerosas células epidérmicas agregadas como las glándulas (Viale, 1979, 1984).

Los cetáceos pueden resistir diferentes flujos osmóticos y vivir tanto en agua dulce como en agua salada, por lo que es necesaria una barrera eficiente. La impermeabilidad en los mamíferos terrestres está determinada por la cornificación y deshidratación, y por el depósito de un material rico en lípidos en la piel. Sin embargo en los cetáceos el estrato externo tiene una cornificación incompleta, aunque las células del estrato espinoso poseen cuerpos laminares cuyo contenido de macromoléculas lipídicas forman una barrera de permeabilidad (Geraci *et al.*, 1986; Watson, 1981).

Las células del estrato espinoso están cargadas de gotas lipídicas que pueden ser una barrera con la cual los cetáceos están protegidos de cualquier flujo transcutáneo. Viale (1979) sugirió que los cetáceos pueden estar excesivamente cargados de sales debido al consumo de invertebrados y de agua de mar, y propuso un mecanismo de excreción de sales por medio de vesículas epidérmicas ricas en sodio. Hui (1981) describe estructuras acomodadas estratégicamente que pueden ayudar, junto con el agua, al intercambio a través de la piel, con movimientos de iones. Aún se requiere de evidencias para reconocer cómo sería la forma de transporte.

En animales como *Ziphius cavirostris* se presenta una coloración blanquecina en la parte anterior que es utilizada para la descripción de los animales. Viale (1979) sugirió que esta coloración parece tener implicadas más variables que las que antes ya se habían descrito. En 1968 observó a una hembra de *Z. cavirostris* agonizante sobre una playa, que presentaba la región anterior enteramente blanca; esta coloración desapareció después de 24 horas de haber muerto el animal. En su superficie se pudo observar una ligera capa cristalizada formando un revestimiento blanco-grisáceo que se descamaba fácilmente.

En las especies teutófagas, el tegumento tiene una ligera cristalización que se desprende después de la muerte del animal y que se solubiliza por el agua del ambiente. Los depósitos cristalinos están formados por cationes del agua de mar y son los mismos que están en el fluido excretor de la glándula de sal de las aves marinas. El cloruro de sodio constituye, esencialmente, la secreción estudiada por Viale (1979). Es probable la presencia de otros cloruros y carbonatos, junto con sulfatos, calcio y magnesio. Viale (1979) propuso que la región anterior de *Z. cavirostris*

funciona como una inmensa glándula de sal y que la secreción se extiende a todo el rostro y la región dorsal, donde se observan las características zonas blanquecinas en esta especie.

El mismo fenómeno se ha observado en *Globicephala melaena*, en *Delphinapterus leucas*, así como en los cachalotes blancos y en un neonato de *Balaenoptera physalus*. Por otra parte, en *T. truncatus* se observan diferencias en el aspecto gris oscuro dependiendo de la región geográfica en que viva el animal. Lo mismo sucede para *Delphinus delphis* y *Stenella coeruleoalba*, por lo que Viale (1979) supone que las especies de cetáceos, y en particular los odontocetos teutófagos, presentan una coloración blanca en el cuerpo debido a una cristalización de sales en la epidermis.

Hasta ahora, las estructuras celulares generalmente asociadas con el transporte activo no se han encontrado en la piel de los cetáceos. Las mitocondrias y el retículo endoplásmico liso no son abundantes. Tampoco existe una capa de células mucosas típicas que medien los flujos osmóticos dentro el animal y el ambiente (Lindley, 1970).

La abundancia de materiales cristalinos en la parte anterior de *Z. cavirostris* sugiere una producción y transporte por algún tipo de células. Un componente común a todos los tipos de células epidérmicas en sus diferentes estados, es la presencia de vacuolas en abundancia, cercanas a la superficie y que se encuentran orientadas de forma paralela a la superficie cutánea. Esto sugiere una actividad de exocitosis y de excreción de sales que forma soluciones muy concentradas en los espacios intercelulares. Los organelos celulares asociados a la secreción no se encuentran muy abundantes. En cambio la abundancia de las vacuolas es muy notable, y se hace probable una relación más cercana a la excreción de sales (Viale, 1979). Sugiere que deben existir ricas cargas de mitocondrias dentro de las células de la piel de los cetáceos que aseguren el aporte energético necesario. El proceso de evacuación de sales se presenta en las capas superficiales y aquí es difícil encontrar la cantidad necesaria de mitocondrias que pueda dar el aporte energético necesario para la cantidad de excreción de sales. Por ello se hace difícil imaginar un mecanismo de transporte iónico que exige un aporte energético tan elevado. Viale (1979) sugirió otra hipótesis en la cual el proceso de excreción se lleva al cabo por un simple fenómeno de exocitosis a partir de vesículas con contenidos de soluciones saturadas y sobresaturadas. Estas vesículas se encuentran dispersas por toda la epidermis, son ovaladas lo que sugiere un contenido hipertónico con

relación al citoplasma. El contenido de estas vesículas a la temperatura corporal del animal se mantiene líquido, pero al entrar en contacto con el medio cristaliza inmediatamente.

Para entender este proceso de cristalización es necesario decir que dentro de la piel de los cetáceos existe un enorme gradiente térmico. La vascularización de la hipodermis y de la dermis constituye la base de nutrición de la epidermis y en promedio tiene una temperatura de 37°C, la misma que aumentará al encontrarse el animal en un esfuerzo de su musculatura. Las capas más superficiales de la piel están distantes de 3 a 7 mm de la hipodermis en las grandes especies y de 1 a 3 mm en los pequeños cetáceos (Harrison y Thurley, 1972). La hipodermis es un buen aislante térmico, la temperatura que se encuentra cercana al estrato germinal es de 13 a 18°C y esta temperatura va aumentando en un gradiente de 3 a 8°C por milímetro hacia la superficie epidérmica o estrato externo. Por lo que es posible encontrar cristales sobre las capas superficiales de la epidermis. Los trabajos experimentales sobre la electrofisiología de las células epiteliales muestran que la permeabilidad celular disminuye al aumentar la proporción de calcio (Hui, 1980). Viale (1979) estima que las células epidérmicas de los cetáceos disminuyen su impermeabilidad al calcio del agua de mar, logrando la cristalización de las soluciones sobresaturadas, pues estas zonas se mantendrán a una temperatura muy cercana a la del agua de mar. La zona de más superficie de contacto es aproximadamente de 15 a 30 capas celulares, estas se encuentran en exfoliación permanente, donde las capas celulares y los cristales intersticiales son arrancados por el efecto de la erosión hidrodinámica, entrando en contacto inmediatamente las capas celulares adyacentes. El resultado es una coloración blanca permanente observada en los animales en el mar. La permanencia de esta coloración implica una velocidad de exfoliación importante.

Viale (1979) sugirió que la coloración blanca permanente sobre los animales vivos se obtiene por la conjunción de tres fenómenos: la rápida erosión de la piel, el enfriamiento y cristalización en las capas celulares externas y la disolución de estos cristales a la par de la exfoliación superficial.

Existe una peculiaridad en la piel de los delfines pues algunos viven en aguas dulces y otros pueden ocupar espacios intermedios entre las aguas dulces y marinas. Cuando los cetáceos están en lugares de agua dulce, la superficie de las células se desprenden y la capa del estrato espinoso se daña (Harrison y Thurley, 1974). Presumiblemente, el agua dulce hidrata el estrato externo, de tal modo que debilitan la barrera de permeabilidad, sin embargo las características

lipídicas del líquido intercelular parece tener algo que ver con este mecanismo (Geraci *et al.*, 1986).

Hui (1981) demostró que en *Delphinus delphis*, al igual que en los humanos, la permeabilidad de la piel al agua varía de acuerdo con la vascularización del cuerpo. Las aletas y la cola, al ser muy vascularizadas presentan diferencias aumentando la permeabilidad de la piel.

## 5. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

La piel constituye el principal componente de interacción del organismo con su ambiente y en el caso de los cetáceos se han hecho diversas interpretaciones de la morfología tegumentaria con relación a procesos como la termorregulación, osmorregulación e hidrodinámica iniciando propiamente con las investigaciones de Gray (1936).

En este trabajo se pretende analizar algunos aspectos de la geometría y ultraestructura de la piel de los cetáceos tratando de integrar estudios previos en un contexto teórico basado en la idea de que los sistemas biológicos son complejos y que se aproximan a estructuras fractales (Mandelbrot, 1983; Weibel, 1991). Por ello, el título de este trabajo dice geometría y dinámica, aunque los logros no sean completos para corresponder a tal ambición, y no morfología y fisiología. El objetivo general de este trabajo ha sido el de analizar las proporciones y calcular la dimensión fractal de las papilas dérmicas de algunos cetáceos e inferir su relación con procesos como la termorregulación, osmorregulación e hidrodinámica, y describir algunos elementos ultraestructurales de la epidermis posiblemente involucrados en tales fenómenos.

Concretamente, en este trabajo se analiza la variación en las proporciones y la dimensión fractal papilar entre diferentes regiones del tursión, *Tursiops truncatus*, y entre diferentes especies de cetáceos comparando la misma zona corporal. Se espera encontrar un conjunto de relaciones entre magnitudes de la morfología de la piel que permitan asociarlas a procesos fisiológicos definidos. Asimismo, se describen algunos elementos de la ultraestructura epidérmica de la ballena joróbada, *Megaptera novaeangliae*, que buscan apoyar particularmente la hipótesis de que la piel de estos animales tiene una función de excreción de sales (Viale, 1979).

## 6. MÉTODOS

### 6.1. RECOLECTA DE MUESTRAS DE PIEL.

#### 6.1.1. Muestras de cetáceos en vida libre.

Junto con los esfuerzos de fotoidentificación y registros de sonidos de ballenas jorobadas del Laboratorio de Mamíferos y Tortugas Marinas de la Facultad de Ciencias de la UNAM, se recolectaron diez muestras de las especies *Megaptera novaeangliae*, *Balaenoptera edeni*, *Balaenoptera musculus* y *Stenella attenuata* en aguas adyacentes a la Bahía de Banderas, Nayarit y Los Cabos, Baja California Sur, durante los años 1990-1992. En el Cuadro 1, se enlistan algunas características de las especies muestreadas.

Para la recolección de las muestras en el campo se utilizó una ballesta con un empuje de 69 kg. y una flecha con una punta modificada. El diseño y construcción de la flecha se hizo en la Facultad de Ciencias de la UNAM (Medrano, 1993). La punta utilizada es un cilindro hueco que penetra 10 mm en la piel y tiene 5 mm de espesor con una pequeña abertura para el desplazamiento de aire situada junto a un tope. El borde del cilindro es filoso y funciona como un sacabocados. Una vez hecho el contacto y obtenida la muestra, la flecha rebota. La flecha es de color brillante y tiene un flotador que permite recuperarla después del impacto. La punta se desatornilla para retirar la biopsia por uno de los extremos (Figura 6). Las biopsias se obtuvieron del costado posterior por arriba de la línea media cuando los animales se arqueaban previo a una inmersión.

En la embarcación, las muestras se colocaron en solución salina isotónica para mamíferos amortiguada con fosfatos 20 mmol/L a pH 7.4 y antibióticos (penicilina 400 U/ml; sulfato de estreptomomicina 400 µg/ml y Fungizona 1 µg/ml). En tierra y en una caja de acrílico aséptica cerca de la llama de un mechero, las muestras se lavaron en cajas de petri estériles con la misma solución salina amortiguada y con antibióticos. Las muestras se colocaron en un tubo de ensayo con 5 a 10 ml de medio de cultivo estéril para mamíferos (RPMI, DMEM o McCoy), con fosfatos 20 mmol/L a pH 7.4 y antibióticos (penicilina 200 U/ml, sulfato de estreptomomicina 200 µg/ml, y fungizona 0.5 µg/ml). Las muestras se transportaron en frío a la Ciudad de México.

### 6.1.2. Muestras de cetáceos en cautiverio.

Tres muestras del costado izquierdo, incluyendo un papiloma, de un individuo juvenil macho de la especie *Orcinus orca* se obtuvieron del delfinario Reino Aventura, Distrito Federal en 1991 y se colocaron en medio RPMI amortiguado con fosfatos 20 mmol/L a pH 7.4 y antibióticos (penicilina 200 U/ml, sulfato de estreptomycin 200 µg/ml, y fungizona 0.5 µg/ml).

En marzo de 1995 se obtuvieron 12 muestras de la piel de un ejemplar de *Tursiops truncatus* que murió dentro del delfinario Reino Aventura. Este animal era una hembra de aproximadamente ocho años de edad, longitud de 2.51 m, que se capturó cerca de Cuba y que se trasladó a la Ciudad de México donde vivió aproximadamente dos meses y medio. El animal se congeló y las muestras de la piel se tomaron 48 horas después de muerto. Se recolectaron 12 muestras de zonas representativas del cuerpo del animal (Figura 7) que se fijaron en formaldehído amortiguado con fosfatos a pH 7.4. Todas las muestras se procesaron en el Departamento de Biología celular y tisular de la Facultad de Medicina en la UNAM.

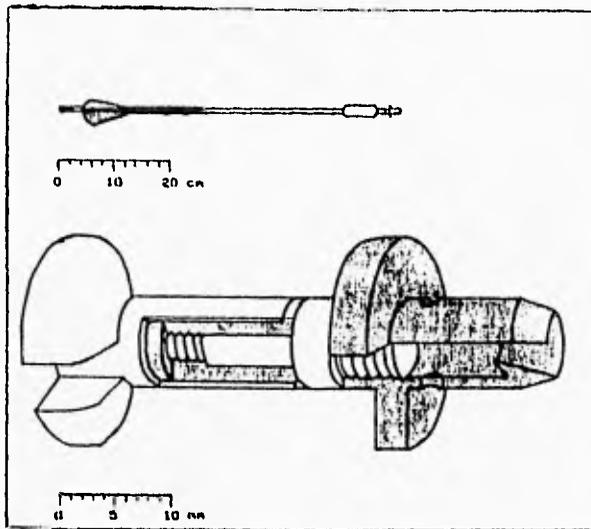


FIGURA 6. Sistema diseñado en la Facultad de Ciencias UNAM para obtener muestras de piel de cetáceos en vida libre (Tomado de Medrano, 1993).

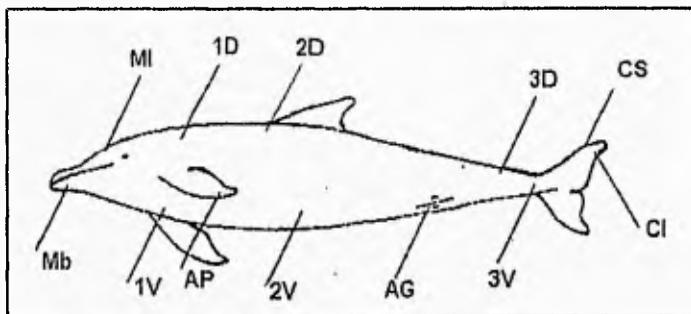


FIGURA 7. Regiones analizadas de la piel de un delfín hembra, *Tursiops truncatus*. Mb: mandíbula, MI: melón, 1V: primer tercio ventral, 2V: segundo tercio ventral, 3V: último tercio ventral, AG: abertura genital, AP: aleta pectoral, 1D: primer tercio dorsal, 2D: segundo tercio dorsal, 3D: último tercio dorsal, CS: cara superior de la aleta caudal y CI: cara inferior de la aleta caudal.

CUADRO 1. Algunas características de las especies analizadas en el presente estudio (Leatherwood *et al.*, 1988).

Especie	Longitud (m)	Masa (ton)	Distribución
<i>Balaenoptera musculus</i>	25 - 30	90 - 160	Mundial
<i>Megaptera novaeangliae</i>	12 - 16	34 - 48	Mundial
<i>Balaenoptera edeni</i>	12 - 14	13 - 22	Tropical y Subtropical
<i>Orcinus orca</i>	7.0 - 9.75	8 - 9	Mundial
<i>Tursiops truncatus</i>	2.5 - 4.2	0.200 - 0.650	Tropical y subtropical
<i>Stenella attenuata</i>	2.1 - 2.75	0.100	Tropical y Subtropical

## **6.2. ANÁLISIS HISTOLÓGICO.**

### **6.2.1. Microscopía fotónica.**

Las muestras de todas las especies estudiadas se fijaron en formaldehído 10% con amortiguador de fosfatos (pH 7.4) durante 24 h. Algunas de estas muestras se cortaron en porciones de aproximadamente 0.5 cm por lado, se lavaron con agua corriente durante una ó dos h, se deshidrataron en etanol con graduación creciente, se aclararon en xilol y se infiltraron en parafina a 56°C. Se hicieron cortes con un grosor de 6 µm. Los cortes se tiñieron con las técnicas HE, PAS, y Masson (Apéndice A). En el caso de *Tursiops truncatus*, únicamente se hicieron tinciones con HE.

### **6.2.2. Microscopía electrónica.**

Una biopsia de piel de *Megaptera novaeangliae* mantenida en medio de cultivo durante 7 días se procesó para microscopía electrónica de transmisión. La muestra se cortó en fragmentos de aproximadamente 1 mm de espesor, se fijó durante tres h a 4°C en glutaraldehído al 1.5% en amortiguador de cacodilato de sodio 0.2 M (pH 7.4), se lavó en el mismo amortiguador (0.15 M) y se posfijó en tetróxido de osmio al 1.0% en amortiguador de cacodilato de sodio 0.2 M (pH 7.4). Los fragmentos se lavaron y deshidrataron en etanol con graduación creciente hasta óxido de propileno. Finalmente, los fragmentos se incluyeron en araldita 6005 y se obtuvieron cortes de 100 nm aproximadamente con una cuchilla de diamante. Se contrastó con citrato de plomo y acetato de uranilo. Las observaciones se realizaron con el microscopio electrónico ME-109 Zeiss. Todo este tratamiento se hizo en el Departamento de Biología celular y tisular de la Facultad de Medicina en la UNAM.

## **6.3. FOTOGRAFÍA Y MORFOMETRÍA.**

Los cortes en parafina se fotografiaron en un microscopio fotónico con un objetivo 4X en película blanco y negro de 35 mm, ASA 100. Las fotografías se ampliaron en el Laboratorio de Microcine de la Facultad de Ciencias de la UNAM en papel fotográfico Kodak Polimax RC, blanco y negro de 8 X 10 pulgadas de tipo F brillante y mate.

Las fotomicrografías se colocaron dentro de una mica transparente. Se hicieron mediciones de las papilas dérmicas utilizando un escalímetro con precisión de 1 mm y del contorno dermoepidérmico usando un compás con aberturas de 1, 2, 4, 8, 16 y 32 mm. La abertura del compás se revisaba cada 400 pasos.

Se midieron 10 fotomicrografías de dos cortes de una muestra de piel de *Stenella attenuata* tomada en 1990, 10 de dos cortes de una muestra de *Balaenoptera musculus* tomadas en 1991, tres de *Balaenoptera edeni*, una de *Megaptera novaeangliae* y una de *Orcinus orca* todas de un corte de una muestra tomadas en 1991. Todas estas muestras corresponden al costado medio superior. Se analizaron 18 fotomicrografías correspondientes a 12 zonas diferentes del cuerpo de *Tursiops truncatus* dividiéndose así: una del primer tercio ventral, una del segundo tercio ventral, una del tercer tercio ventral, tres del primer tercio dorsal, una del segundo tercio dorsal, dos del tercer tercio dorsal, dos de la abertura genital, dos del melón, una de la mandíbula, una de la aleta caudal inferior, dos de la aleta caudal superior y una de la aleta pectoral izquierda.

#### 6.4. ANÁLISIS DE DATOS.

Se obtuvieron los valores de magnitud real haciendo la conversión de la ampliación al negativo, y de éste al corte, tomando en cuenta los aumentos a los que se tomó la micrografía. Los datos se guardaron en archivos ASCII y se utilizó el programa Sigmaplot 5.0<sup>MR</sup> para graficar y hacer regresiones lineales.

Se caracterizó la geometría papilar registrando la profundidad epidérmica (Pe), la profundidad papilar (Pp), el ancho papilar (Ap) y el ancho interpapilar (Ai), (Figura 8). Ya que el aspecto de las papilas en corte sagital parece invariante ante la orientación del corte, se consideró a la papila dérmica junto con su interpapila como un cilindro para medir algunas cantidades geométricas. Se estimó la densidad papilar o número de papilas por unidad de área (Dp) de la forma siguiente:

$$Dp = 1/\pi[(Ap+Ai)/2]^2$$

El volumen papilar relativo, o volumen papilar por unidad de área, se estimó como sigue:

$$V\rho = \pi Pp Dp (Ap/2)^2$$

Se midió la dimensión fractal de la membrana dermoepidérmica en su perfil perpendicular estimado con la dimensión de compás como se describe en el apéndice B (Mandelbrot 1983, Peitgen *et al.* 1991). Para realizar el análisis alométrico del área papilar contra el área corporal externa se determinó el área corporal como la suma de las áreas laterales de dos conos envolventes unidos por su base en la región más ancha del cuerpo (Kermack, 1948). Al considerar datos estimados de longitud de los especímenes (L) y factorizar las fórmulas correspondientes, el área corporal (Ac) se estimó de la forma siguiente:

$$Ac = 0.32L^2$$

(ver apéndice D). El área corporal externa se estimó con la longitud a la menor escala y, teóricamente, la medida total más exacta (ver resultados)



**FIGURA 8.** Mediciones de profundidad epidérmica (Pe), profundidad papilar (Pp), ancho papilar (Ap), ancho interpapilar (Ai) y ancho total (At) en los cortes sagitales de la piel de los cetáceos analizados, bajo la aproximación de que el ancho interpapilar (Ai) y el ancho papilar (Ap) forman un cilindro.

## 7. RESULTADOS

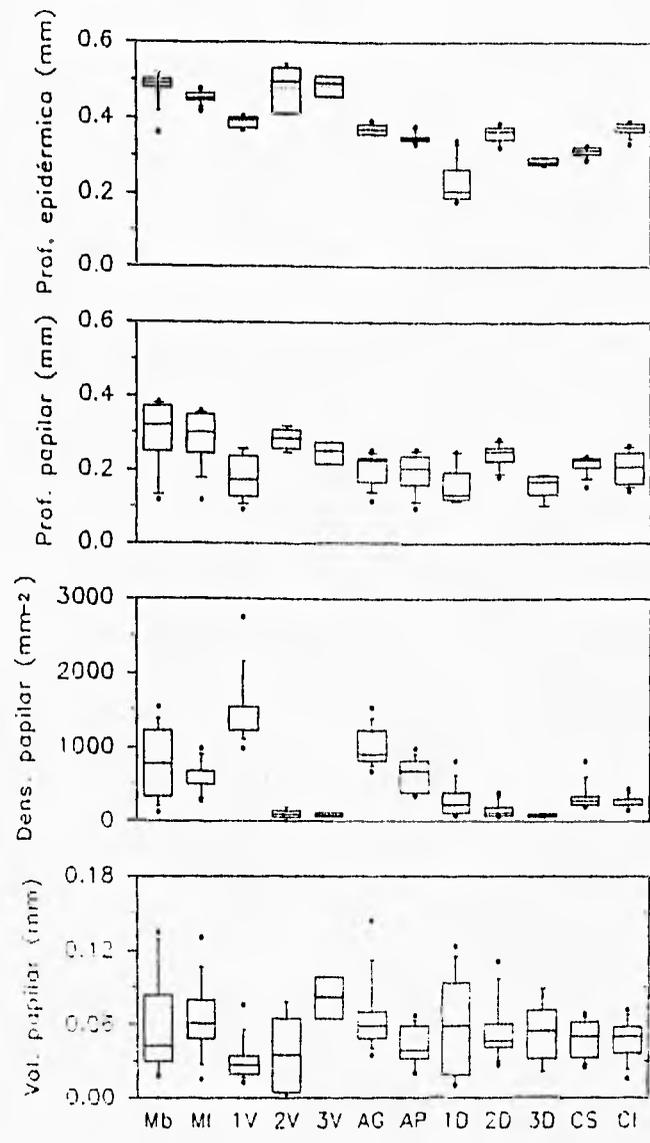
### 7.1. COMPARACIÓN DE DIFERENTES ZONAS CORPORALES DE *Tursiops truncatus*.

#### 7.1.1. Geometría papilar.

En la Figura 9 se muestra la distribución de los datos (diagramas de cajas) de los parámetros papilares medidos para cada una de las zonas corporales. En la gráfica superior se observa que el valor más alto de profundidad epidérmica se encontró en el segundo tercio ventral (2V; Figura 10d) y el valor más bajo en el primer tercio dorsal (1D; Figura 10h). Con relación a la profundidad papilar, se observó una variación entre papilas en general mayor a la encontrada para los valores de profundidad epidérmica principalmente en la mandíbula (Mb; Figura 10a), el melón (Ml; Figura 10b) y en la primera porción ventral (1V; Figura 10c), donde la profundidad papilar y epidérmica son mayores que en las zonas restantes.

Los valores de densidad papilar varían considerablemente entre las distintas zonas siendo muy bajos en la región posterior con excepción de la abertura genital (AG; Figura 10f). La densidad papilar en la mandíbula es asimismo más variable que en otras zonas. La magnitud y la variación del volumen papilar total son en general constantes aunque se notan más variaciones en la mandíbula, el segundo tercio ventral y en el primer tercio dorsal.

Al hacer un análisis cualitativo para encontrar las principales diferencias de los diferentes cortes perpendiculares de piel del *T. truncatus*, observamos que existen zonas donde los patrones morfológicos son constantes, principalmente en las zonas dorsales (Figuras 10h, 10i, 10j), existen otras zonas que presentan patrones muy irregulares (Figuras 10c, 10d, 10e) y algunas otras con papilas dérmicas muy altas y bien definidas (Figuras 10a, 10b, 10f).



**FIGURA 9.** Magnitud y variación en profundidad epidérmica, profundidad papilar, densidad papilar y volumen papilar relativo para doce zonas corporales de un delfín *T. truncatus* hembra.

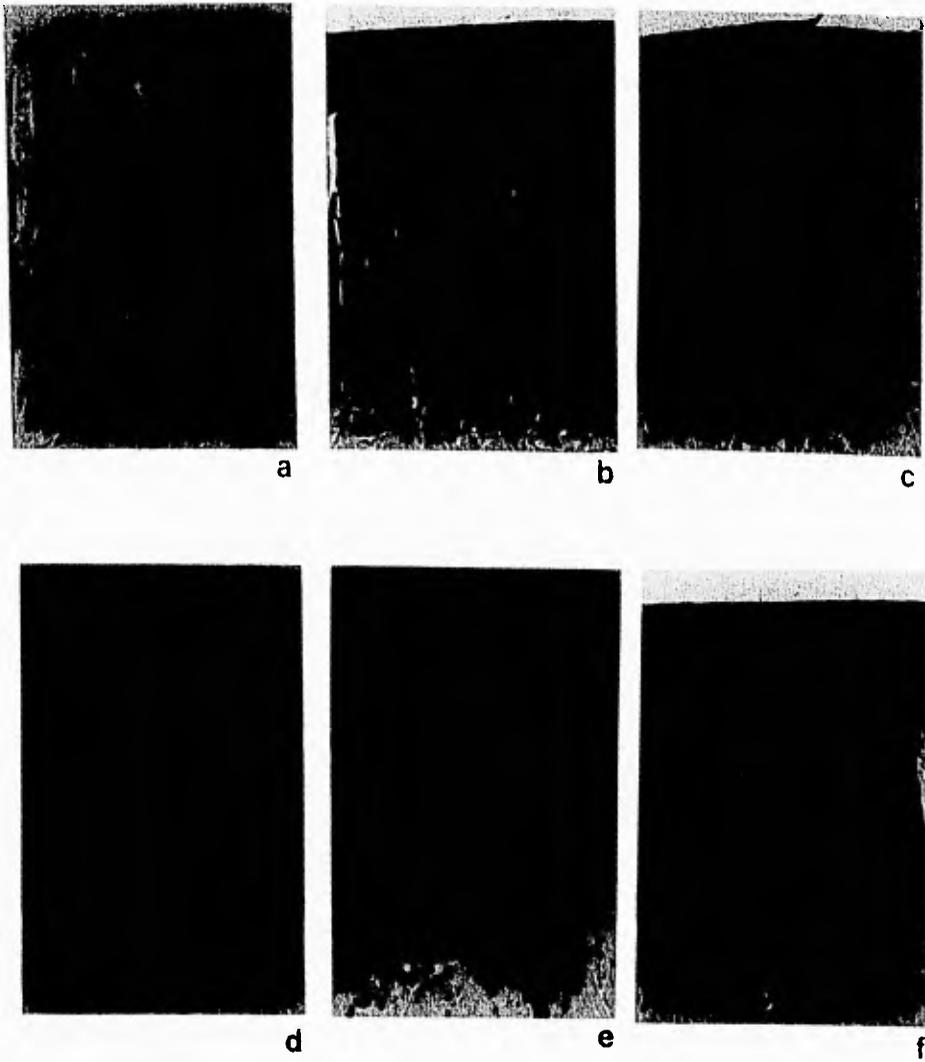


FIGURA 10. Micrografías de doce zonas corporales diferentes de un delfín *T. truncatus*.  
Nótese el contraste general entre las zonas dorsales (h. i. d. j) y las ventrales (c, d, e). (40 X)

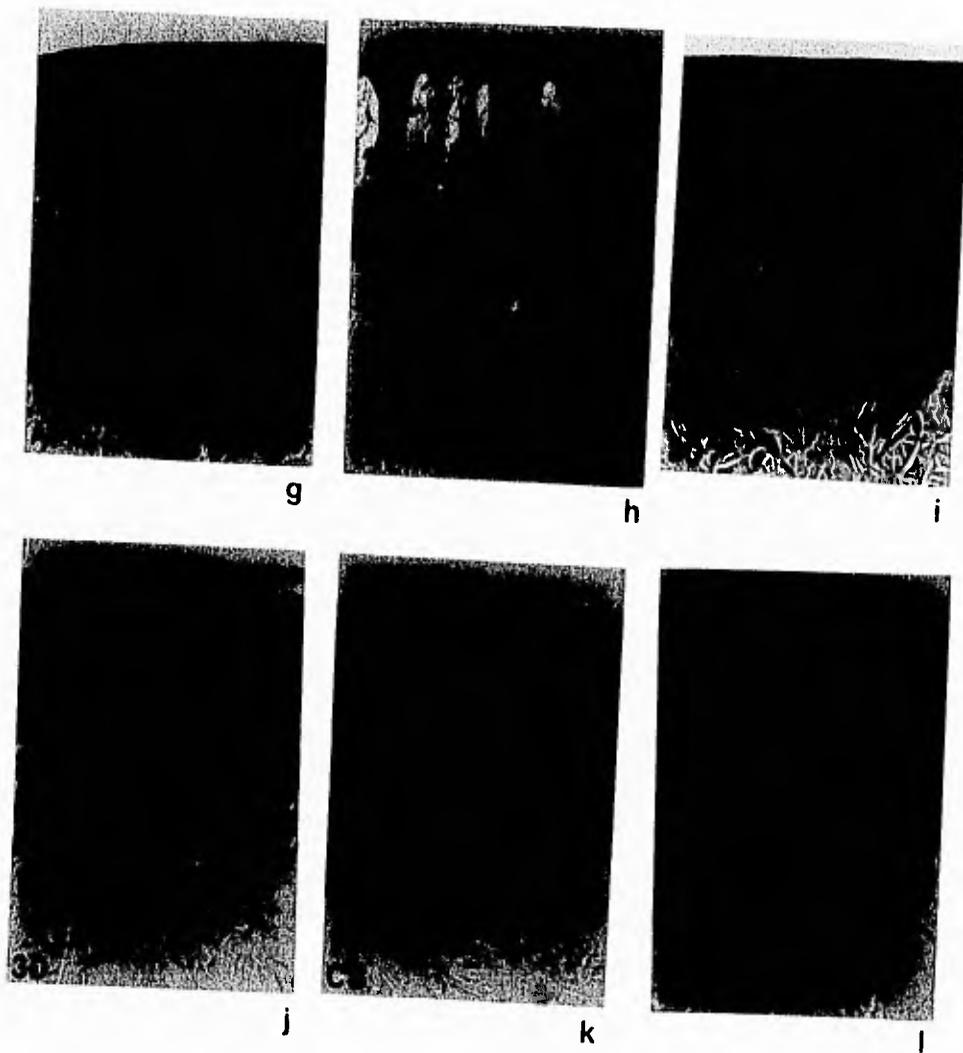


FIGURA 10. (Continuación) (40 X)

### 7.1.2. Dimensión fractal de las papilas en corte sagital.

Se determinó la dimensión fractal de la unión dermoepidérmica en corte perpendicular como la pendiente obtenida de la relación entre la precisión de la escala (s) contra la longitud total medida L(s), de forma que  $Df=1-d$  (ver Apéndice D). Para obtener una medida de su geometría, se encontró que ésta es en general mayor cuando la profundidad epidérmica es pequeña con excepción de la parte media y posterior ventral (2V y 3V) en donde hay una profundidad epidérmica y dimensión fractal más altas en comparación a las otras zonas corporales. Las regiones de la mandíbula, el melón y el primer tercio ventral presentan las dimensiones fractales más pequeñas y la mayor profundidad epidérmica (Cuadro 2).

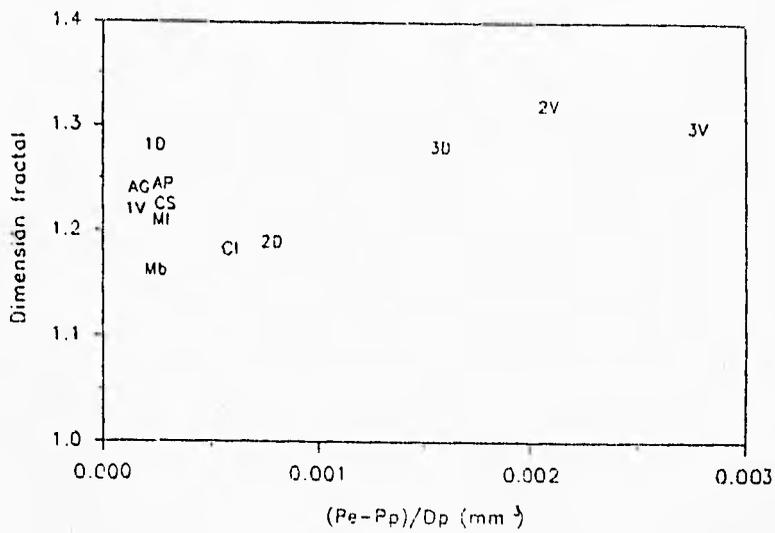
La geometría fractal medida a partir de su dimensión fractal de la unión dermoepidérmica compensa la lejanía de las papilas dérmicas a la superficie epidérmica y/o su densidad papilar menor por posibles mecanismos hidrodinámicos se definió el parámetro  $N_p$  que mide el aislamiento de la superficie papilar de la superficie del cuerpo.

$$N_p = (P_e - P_p) / D_p$$

Se observa que cuando el aislamiento entre las papilas y la superficie externa es mayor, se incrementa la dimensión fractal de la superficie papilar. Existen zonas como el melón, la superficie caudal superior, el primer tercio ventral, la abertura genital, la aleta pectoral y el primer tercio dorsal en donde la complejidad papilar es alta habiendo poco aislamiento de la superficie externa (Figura 11).

CUADRO 2. Dimensión fractal (Df) y correlación (r) de cortes perpendiculares de 12 diferentes zonas corporales de *T. truncatus*.

Zona corporal	Dimensión Fractal (Df)	Correlación (r)
Mandíbula (Mb)	1.262	0.853
Melón (MI)	1.215	0.619
Primer tercio ventral (1V)	1.231	0.921
Segundo tercio ventral (2V)	1.322	0.805
Tercer tercio ventral (3V)	1.301	0.744
Abertura genital (AG)	1.233	0.710
Aleta pectoral (AP)	1.245	0.946
Primer tercio dorsal (1D)	1.282	0.807
Segundo tercio dorsal (2D)	1.192	0.795
Tercer tercio dorsal (3D)	1.282	0.753
Caudal superior (CS)	1.221	0.749
Caudal inferior (CI)	1.184	0.893



**FIGURA 11.** Dimensión fractal de las papilas dérmicas en corte perpendicular para doce zonas corporales de *T. truncatus* en función del aislamiento de las papilas de la superficie externa medido como la cantidad  $(Pe-Pp)/Dp$  (explicación y abreviaturas definidas en el texto).

## 7.2. COMPARACIÓN DE DIFERENTES ESPECIES DE CETÁCEOS.

### 7.2.1. Geometría papilar.

De la misma forma que en la sección 6.1.1, se analizaron las proporciones de las papilas de seis especies diferentes de cetáceos en el costado posterior del cuerpo (segundo tercio dorsal): *Balaenoptera musculus* (Bm), *Megaptera novaeangliae* (Mn), *Balaenoptera edeni* (Be), *Orcinus orca* (Oo), *Tursiops truncatus* (Tt) y *Stenella attenuata* (Sa). En la Figura 12 se observa que el mayor componente de variación con respecto al tamaño de los animales es el de la densidad papilar aunque existe también cierta variación en las proporciones sagitales de profundidad epidérmica y papilar. Es interesante notar, que el volumen papilar por unidad de área corporal es semejante entre las seis especies estudiadas. Así, estos resultados sugieren que el área de exposición de las papilas se incrementa en forma alométrica con respecto al tamaño corporal manteniendo constante el espacio disponible en la epidermis para las papilas.

### 7.2.2. Alometría papilar.

Se hizo un análisis alométrico del área papilar contra el área corporal externa. Para estimar el área papilar se midió la interfase dermoepidérmica de las papilas contra la superficie corporal en cortes perpendiculares de la piel de seis especies de cetáceos: *Balaenoptera musculus* (Bm), *Megaptera novaeangliae* (Mn), *Balaenoptera edeni* (Be), *Orcinus orca* (Oo), *Tursiops truncatus* (Tt) y *Stenella attenuata* (Sa).

De igual forma que en la sección anterior, se determinó el área corporal y se comparó contra el área papilar total como se observa en la Figura 12. El área papilar total (Apt) se obtuvo de la forma siguiente:

$$Apt = Ac \cdot (Lp/Le)^2$$

donde Lp es la longitud papilar en corte perpendicular y Le es la longitud del segmento externo de piel. Se grafican las pendientes de 1.0 que se obtiene al relacionar dos superficies, demostrando la

relación directamente proporcional de estas, de igual manera se grafica la pendiente de 1.5 que es el resultado de relacionar un volumen y una superficie, existe entonces un factor de 3:2 (Cuadro 3).

Es importante notar que la relación entre el área papilar y el área corporal externa depende de las mediciones hechas en los cortes y de los valores de longitud los cuales son medidos para *O. orca* y *T. truncatus* y estimados *a priori* para el resto de las especies en el momento de la colecta.

**CUADRO 3.** Magnitudes externas y papilares de diferentes cetáceos.

Especie	Longitud corporal (m)	Área corporal (m <sup>2</sup> )	(Lp/Le) <sup>2</sup> promedio	Área papilar total (m <sup>2</sup> )
<i>B. musculus</i>	25	200	184.460	36892.101
<i>M. novaeangliae</i>	15	72	172.573	12425.227
<i>B. edeni</i>	13	54.1	163.668	8851.186
<i>O. orca</i>	6.5	13.5	146.846	1985.358
<i>T. truncatus</i>	2.51	2.02	42.125	84.925
<i>S. attenuata</i>	2.0	1.28	29.614	37.906

El exponente alométrico del área papilar en función del área corporal medido en las seis especies de cetáceos es  $b=1.37$  con una correlación de 0.99.

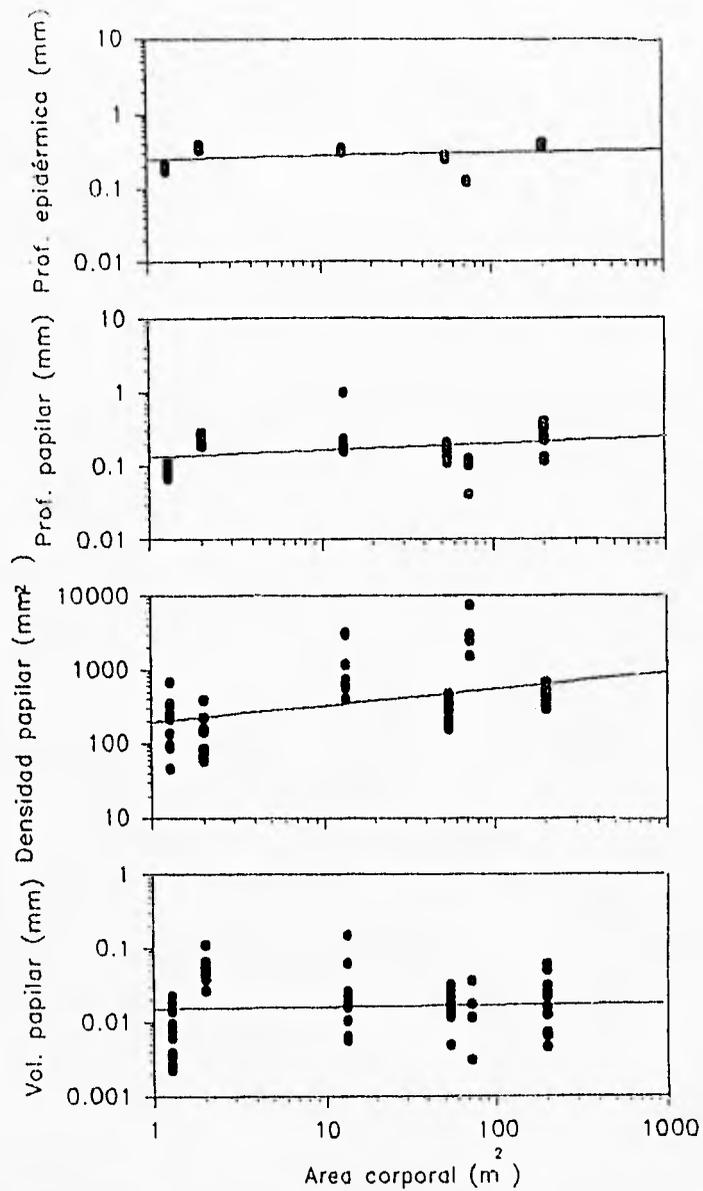
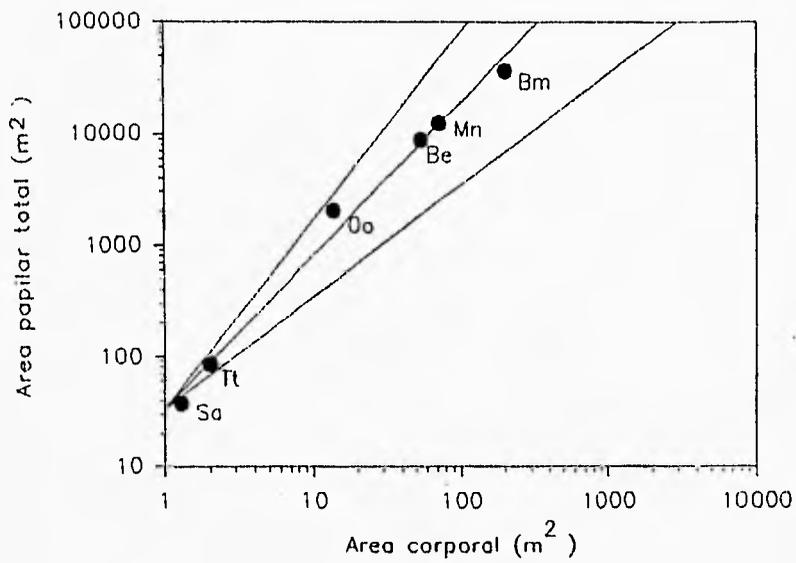


FIGURA 12. Mediciones papilares de cinco cetáceos de diferente tamaño. Los puntos corresponden a diferentes papilas de una misma serie de cortes. En orden de menor a mayor tamaño corporal, las series de puntos corresponden a *Stenella attenuata*, *Tursiops truncatus*, *Orcinus orca*, *Balaenoptera edeni*, *Megaptera novaeangliae* y *Balaenoptera musculus*.



**FIGURA 13.** Relación entre el área corporal ( $A_c$ ) y el área papilar total ( $A_{pt}$ ) para seis especies de cetáceos. La relación se expresa como  $A_{pt}=34.15A_c^{1.37}$  con una correlación ( $r$ ) de 0.99. Se ilustran las líneas con pendientes de 1.0 (inferior) y 1.5 (superior) con la misma ordenada de origen en  $A_c=1.0\text{ m}^2$ . Abreviaturas definidas en la página 43.

### 7.2.3. Dimensión fractal de diferentes especies de cetáceos.

Con el mismo procedimiento expuesto en la sección 6.1.2., se obtuvieron las dimensiones fractales para cinco especies de cetáceos: *Balaenoptera musculus* (Bm), *Megaptera novaeangliae* (Mn), *Balaenoptera edeni* (Be), *Tursiops truncatus* (Tt) y *Stenella attenuata* (Sa). Los resultados se muestran en el Cuadro 4. El parámetro  $L_p/L_e$  se tomó como el tamaño de la membrana dermoepidérmica con relación a su superficie epidérmica. Nótese que  $L_p/L_e$  es mayor en *M. novaeangliae* en tanto que la dimensión fractal es mayor en *B. edeni*.

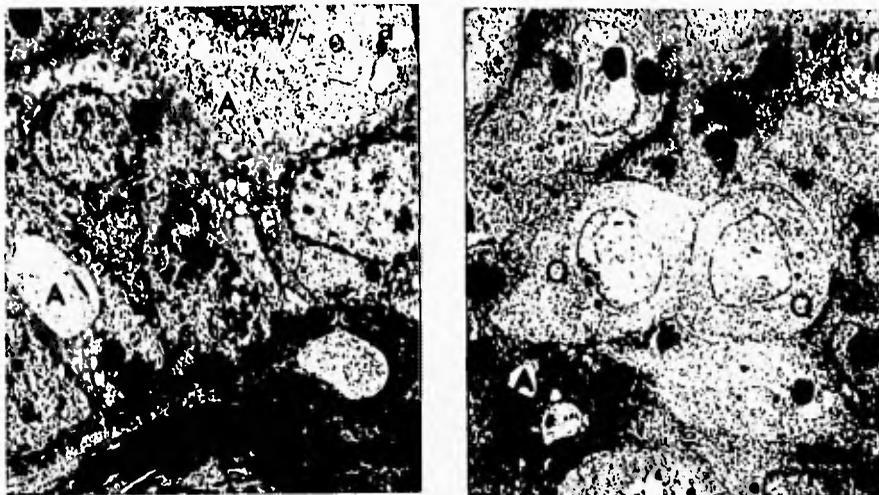
**CUADRO 4.** Dimensión fractal de las papilas dérmicas en corte perpendicular y tamaño papilar con respecto a la superficie externa ( $L_p/L_e$ ), medido con la menor escala de compás, para diferentes cetáceos.

Especies	Dimensión fractal (Df)	Correlación (r)	$L_p/L_e$
<i>B.musculus</i>	1.127	0.571	13.125
<i>M.novaeangliae</i>	1.162	0.965	13.137
<i>B.edeni</i>	1.254	0.897	12.677
<i>T.truncatus</i>	1.191	0.795	6.387
<i>S.attenuata</i>	1.250	0.915	5.351

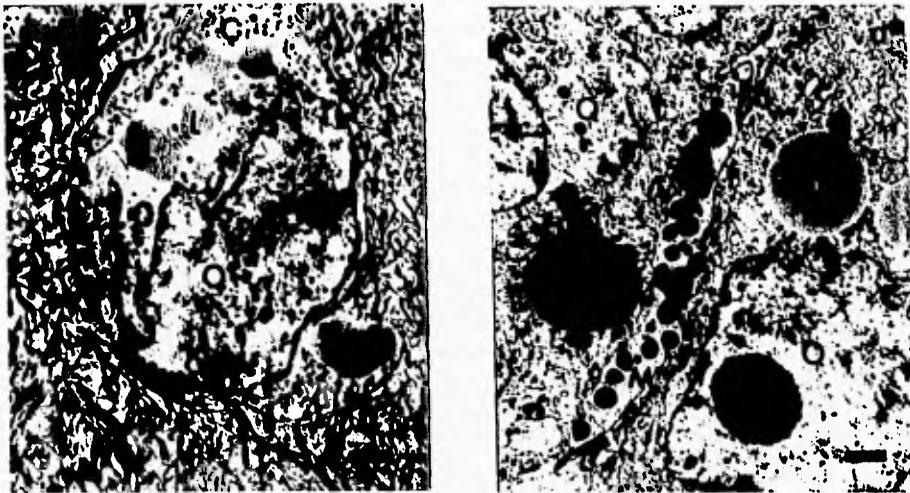
Se observa una tendencia a una dimensión mayor en animales de hábitos tropicales como *Balaenoptera edeni* (Be) y *Stenella attenuata* (Sa). Las otras especies analizadas son de aguas subtropicales, templadas e incluso frías. La dimensión no parece entonces dependiente del tamaño corporal del animal sino de las condiciones en las cuales se distribuye normalmente.

### 7.3. ALGUNOS ASPECTOS DE LA ULTRAESTRUCTURA DE LA EPIDERMIS DE *M. novaeangliae*.

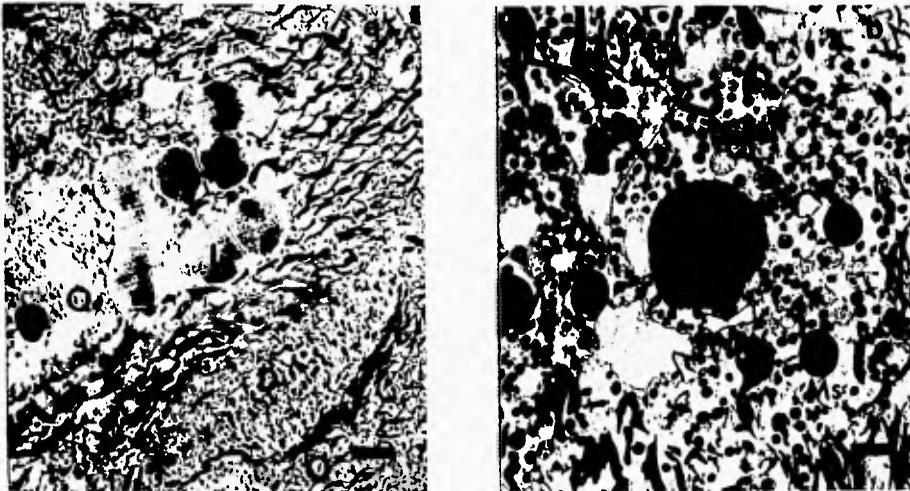
Se hizo un breve examen con microscopía electrónica en una muestra de ballena jorobada para basar algunas inferencias fisiológicas de la estructura de la epidermis. La parte basal de la epidermis es similar mucho a la de otros mamíferos aunque los desmosomas son numerosos y hay muchos tonofilamentos (Figura 14). Se encontró una gran cantidad de desmosomas que son más abundantes en la parte baja del estrato espinoso. También se observaron muchas vesículas con líquido en los queratinocitos del estrato espinoso en su parte media y superior. Asimismo, en el estrato espinoso abundan gotas de lípidos y cuerpos laminares (Figura 15). En el estrato espinoso superior se observan grandes espacios entre los queratinocitos ocupados por un material granuloso que no parecen artificios en tanto que los tonofilamentos de los queratinocitos se disponen de forma paralela adyacentes a la membrana plasmática (Figura 16). Estos espacios parecen formar una red compleja de canales similares a los canales interfaciales descritos para epitelios planos estratificados con el de la epidermis humana (Geneser, 1993). Sin embargo los canales intraepidérmicos de *M. novaeangliae* parecen estar más ensanchados.



**FIGURA 14.** Fotomicrografías electrónicas del estrato basal de la epidermis. Los queratinocitos presentan vesículas claras (A), algunas inclusiones, probablemente gotas de lípidos y melanosomas. a) La célula del centro con mayor cantidad de melanosomas no parece ser un melanocito ya que presenta desmosomas y algunos haces de tonofilamentos. La lámina basal marca el límite entre la epidermis y la dermis. En la dermis se observa un fibroblasto (F). b) Queratinocitos, nótese que los queratinocitos con menor cantidad de tonofilamentos parecen contener un mayor número de vesículas claras. Barra= 5 $\mu$



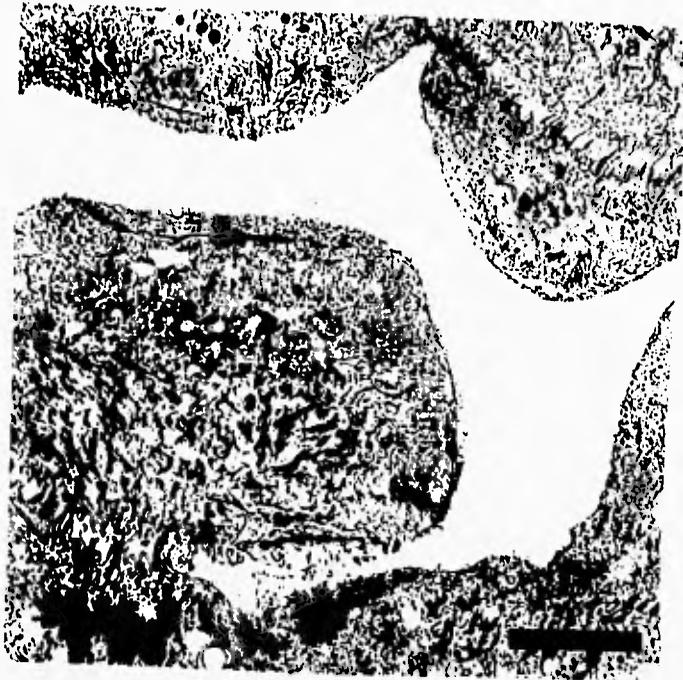
**FIGURA 14.** (Continuación) c) Fotomicrografía de un queratinocito con citoplasma lleno de tonofilamentos (T). Destacan en la vecindad del núcleo, las inclusiones lipídicas (L) y estructuras similares a los cuerpos laminares (C). d) Fotomicrografía electrónica de una prolongación de un melanocito (M), identificada como tal por los melanosomas maduros e inmaduros que contiene y por la ausencia de desmosomas y tonofilamentos. La prolongación del melanocito se extiende entre los queratinocitos vecinos que presentan inclusiones lipídicas y algunos melanosomas. Barra = 1 $\mu$ m



**FIGURA 15.** Fotomicrografías electrónicas del estrato espinoso de la epidermis de *M. novaeangliae*. a) Dos queratinocitos (Q) unidos por una cadena de desmosomas (D). A la izquierda destacan las inclusiones lipídicas (L) yuxtannucleares, los haces de tonofilamentos y algunos cuerpos laminares (C) b) Citoplasma de un queratinocito, se observa una gran inclusión lipídica (L), tonofilamentos (T) y melanosomas (Ms). las estructuras redondas de menor tamaño presentan un ordenamiento laminar de su contenido, probablemente de naturaleza lipídica, lo que permite suponer que son cuerpos laminares (C). Barra = 1  $\mu$ m



**FIGURA 15.** (Continuación) c) Queratinocitos (Q) cuyos citoplasma contiene abundantes tonofilamentos (T). Obsérvese la gran cantidad de interdigitaciones y desmosomas (D) que unen a los queratinocitos. d) Numerosas uniones intercelulares tipo desmosomas (D), uniendo a varios queratinocitos (Q) fuertemente interdigitados. Barra = 1 $\mu$ m.



**FIGURA 16.** Fotomicrografías electrónicas e la parte superior del estrato espinoso en donde se identificaron grandes espacios intercelulares ocupados por material finamente granular. Obsérvese la disposición de los tonofilamentos, predominantemente horizontal a la membrana plasmática, de los queratinocitos que limitan dichos espacios. Por la forma y distribución, estos espacios parecen formar una red compleja de canales entre los queratinocitos. Barra = 5  $\mu$ m



Figura 16. Continuación.

## 8. DISCUSIÓN

### 8.1. COMPARACIÓN DE DIFERENTES ZONAS CORPORALES DE *Tursiops truncatus*.

En la piel del delfín *T. truncatus* se encontraron dos grandes tipos de patrones de la morfología de las papilas dérmicas que corresponden a la región ventral uno (Figura 10c, 10d, 10e) y a la región dorsal el otro (Figura 10h, 10i, 10j). Esta es una distinción que Lang (1966b) había establecido. Las papilas dérmicas ventrales son delgadas y sin un patrón regular. Las papilas dérmicas de la región dorsal presentan un patrón más regular en su forma y disposición. La profundidad epidérmica es mayor en las regiones ventrales habiendo por tanto un mayor recambio de células. Este recambio se ha asociado a zonas de alta presión y flujo de agua (Brown *et al.*, 1983). En las zonas dorsales el flujo es menor en presión o turbulencias (Purves, 1963) y en ellas existen patrones regulares de formación de las papilas dérmicas. Se han analizado múltiples factores relacionados al flujo de agua sobre los delfines (Lang, 1966b), algunos de los cuales han considerado la ultraestructura (Sokolov 1982), pero no se ha destacado la importancia de la disposición de determinados patrones de las papilas dérmicas con relación a la hidrodinámica, aunque no se descartan los efectos de sus componentes elásticos en la ductibilidad externa de la piel (Sokolov y Bulina 1969). El flujo de agua que corre sobre del cuerpo de los delfines parece deslizarse por canales definidos llamados surcos dérmicos (Purves, 1963). La disposición de las papilas dérmicas en la epidermis de los surcos dérmicos, en conjunto con la presencia de algunas estructuras celulares como desmosomas, gotas lipídicas y microfamentos (Figura 14) podrían facilitar este flujo (Sokolov y Bulina 1969; Sokolov 1982). Es sugestivo que zonas sujetas a mayor flujo o presión de agua, como el primer tercio dorsal, la aleta pectoral, la abertura genital, la aleta caudal, el primer tercio ventral, el melón, y la mandíbula, presenten poco aislamiento entre las papilas dérmicas y la superficie externa (Figura 11).

La dimensión fractal de las papilas asimismo es variable en diferentes zonas sin que haya una asociación evidente de los valores de dimensión a zonas con una participación particular en la termorregulación como las aletas (Cuadro 2). La dimensión fractal de la membrana dermoepidérmica parece compensar el aislamiento relativo entre las papilas dérmicas y la superficie externa (Figura 11) lo que sugiere que, en las distintas zonas corporales, la piel debe

mantener una capacidad mínima de disipación de calor. Esta relación no es válida para las zonas sujetas a mayor presión o flujo de agua en donde el aislamiento es menor como se indicó en el párrafo anterior.

Existe variación en las proporciones de las papilas tanto entre zonas distintas como entre papilas de la misma zona (Figura 9). La densidad de las papilas dérmicas es el parámetro de proporción más variable en el cuerpo del tursión mientras que el volumen papilar por unidad de área se mantiene aproximadamente constante. Esta es una primera evidencia de que las variaciones en las funciones de interacción de la piel con el exterior, implican modificaciones en la densidad de las papilas utilizando un espacio determinado en la piel.

## 8.2. COMPARACIÓN ENTRE DIFERENTES ESPECIES DE CETÁCEOS.

Las proporciones de la membrana demoe epidérmica de la misma región corporal en diferentes cetáceos son asimismo variables y, como en el caso de la comparación de diferentes zonas del cuerpo, la densidad papilar constituye el principal factor de variación sin que se modifique casi el volumen papilar por unidad de área. Este resultado refuerza la noción insinuada en la sección anterior acerca de que distintos procesos morfogenéticos y evolutivos pueden modificar la capacidad de disipación o interacción de la piel sin modificar el espacio disponible para la superficie funcional. Es notable que entre diferentes papilas de un mismo cetáceo haya pocas diferencias en la profundidad epidérmica mientras que aquellas proporciones relacionadas con las papilas muestran una variabilidad considerable no relacionada al tamaño corporal o a hábitos particulares (Figura 12).

Tampoco la dimensión fractal varía con relación al tamaño corporal pero se observa que la dimensión es mayor en las especies tropicales (Cuadro 4). Aunque el número de especies muestreadas es muy pequeño para establecer este resultado, sugiere, que en especies tropicales como *B. edeni* y *S. attenuata* donde se encuentra un valor de dimensión fractal mayor puede corresponder a una mayor capacidad de disipación de calos que deben de tener estos organismos en comparación a especies del mismo tamaño que viven en aguas más frías. La forma de llenar el espacio de la papila dérmica depende de su capacidad de disipación.

Cuando se comparan alométricamente las áreas totales externa y papilar se encuentra un exponente de 1.37 que equivale a una dimensión de 2.74 si se utiliza una variable de longitud y de 0.91 si se usa la variable volumen o masa (Figura 13). El valor de dimensión de 2.74 es muy similar a la dimensión fractal del sistema circulatorio (Weibel, 1991) lo que sugiere que la dinámica que determina la morfología de las papilas es la misma o muy semejante a la que genera la irrigación de la piel. El área papilar asimismo es casi proporcional a la masa del organismo y todo esto sugiere fuertemente que la unión dermoepidérmica acopla procesos dependientes de la masa (disipación de calor, excreción de sales y desplazamiento de agua entre otros) a superficies de interacción como ocurre en otras estructuras biológicas (Mandelbrot, 1983; Weibel, 1991). Este acoplamiento se ajusta, evolutiva y morfogenéticamente, sobre todo con variaciones en la densidad papilar las cuales se restringen por el espacio disponible en la piel.

Kleiber (1972) expuso lo difícil que es precisar el concepto de la superficie en un animal sugiriendo además que aún cuando se pudiese definir y medir la superficie externa de un animal con exactitud no existe base teórica para relacionarla con procesos metabólicos como la disipación de calor. El análisis de la superficie papilar de diferentes cetáceos sugiere que la superficie papilar es la superficie funcional de la piel del animal y que ésta es una función alométrica de área corporal.

### **8.3. ULTRAESTRUCTURA DE LA EPIDERMIS DE UNA *M. novaeangliae*.**

En la epidermis de *M. novaeangliae* se encontraron las siguientes estructuras:

1) Desmosomas: son uniones celulares que se encuentran en la epidermis, entre sus funciones principales se encuentra la de repartir fuerzas mecánicas que se ejercen sobre ellas. En el caso de la ballena jorobada la riqueza de desmosomas celulares en el epitelio de cubierta le da la posibilidad de ser un tejido rígido y al mismo tiempo elástico. (Figura 15; Lang, 1966a).

2) Cuerpos laminares: son estructuras celulares que se involucran directamente con la impermeabilidad de la epidermis, presentan una cierta polaridad en su contenido (Geneser, 1993). En una primera aproximación, parece haber un gradiente en la abundancia de cuerpos laminares en el que estas estructuras son más abundantes hacia la superficie externa (Figura 14).

3) Vesículas claras: son estructuras celulares con probable contenido de soluciones hipértónicas, se encuentran en el citoplasma de los queratinocitos (Geneser, 1993). Su presencia pone en evidencia mecanismos de excreción celular (Figura 14).

4) Canales interfasciales: se encuentran entre los queratinocitos y facilitan el transporte de sustancias de una zona a otra de la epidermis, las vesículas claras, al parecer arrojan su contenido hacia estos canales. En la *M. novaeangliae* se encontraron estos canales en la parte superior del estrato espinoso (Figura 16).

5) Gotas lipídicas: son estructuras que se encuentran dentro de los queratinocitos con contenido de alta densidad (Geneser, 1993). Como los cuerpos laminares, las gotas lipídicas son más abundantes hacia la superficie externa. Sokolov (1982) las caracterizó como estructuras que ayudan a amortiguar presiones mecánicas.

## 9. CONCLUSIONES

1) La membrana dermoepidérmica representa la principal superficie funcional de la piel de los cetáceos que media la interacción entre el organismo y su ambiente. La membrana papilar presenta variaciones en sus proporciones y complejidad dependiendo de la zona corporal, del habitat y/o de la especie.

2) La variación alométrica de la superficie papilar se restringe por el espacio disponible en la piel acoplado a una superficie los procesos de interacción del organismo, dependientes de su masa, con el medio ambiente.

3) Los procesos morfogénéticos y evolutivos modifican la capacidad de disipación o intercambio de la superficie papilar manteniendo constante el espacio disponible para ello.

5) La variación corporal en la complejidad de las papilas dérmicas parece compensar el aislamiento existente entre las superficie papilar y externa exceptuando regiones sujetas a fuertes acciones mecánicas del agua como el melón, la mandíbula y la aleta pectoral

4) La superficie papilar en cetáceos de diferente tamaño crece en proporción a la longitud con un exponente  $d=2.74$  que es muy similar a la dimensión fractal del sistema circulatorio y eso sugiere que la morfogénesis de las papilas dérmicas es la misma que determina la irrigación sanguínea.

6) La complejidad de las papilas dérmicas es independiente del tamaño corporal y parece relacionarse con el habitat siendo mayor en cetáceos tropicales.

7) La evolución de la complejidad de dichas papilas es un mecanismo que permite que, sobre la restricción de un tamaño determinado, pueda haber adaptación a diferentes habitats o funciones regionalizadas en el cuerpo.

8) En la ultraestructura de la piel de los cetáceos se observan estructuras como cuerpos laminares, gotas lipídicas, vesículas granulosas y canales intersticiales cuyo posterior análisis podrían indicar una función celular especializada en tiempo y/o espacio relacionada con la función de la piel en los procesos de termorregulación, osmorregulación e hidrodinámica.

9.) La identificación de un gradiente en relación al número de vesículas, gotas de lípidos, cuerpos laminares, desmosomas y canales intersticiales sugiere, a diferencia de otros mamíferos, la existencia de una especialización en la epidermis de los cetáceos que pudiera explicar mecanismos como el de la osmorregulación y procesos de ultraestructura para la hidrodinámica.

## 10. REFERENCIAS

- Brodie P.F. 1975. Cetacean energetics an overview of intraspecific size variation. *Ecology* 56:152-161.
- Brown W.R., Geraci J.R., Hicks B.D., St Aubin D.J. y Schroeder J.P. 1983. Epidermal cell proliferation in the bottlenose dolphin (*Tursiops truncatus*). *Canada Journal Zoology* 61: 1587-1590.
- Bertalanffy V. 1976. *Teoría General de los Sistemas*. Edt. Fondo de Cultura Económica. 3a ed. México, D.F.
- Cornack D.H. 1987. *Histología de Ham. Haria*. México, DF.
- Eckert R, Randall A. y Augustine R., 1990. *Fisiología animal, mecanismos y adaptaciones*. Ed. McGraw-Hill. 3a ed. México, DF.
- Eliséiev V.G., Afanasiev Yu.I., Yúrina N.A. 1985. *Histología*. Editorial Mir. Moscú.
- Gaskin D.E. 1982. *The ecology of whales and Dolphins*. Heineman.London.
- Geneser F. 1993. *Histología*. Edit. Médica Panamericana. 2a Ed. México, D.F.
- Geraci J.R, St Aubin D.J. y Hicks B.D. 1986. The epidemis of Odontocetes: a view from within. pp 3-21. En: Harrison R. y Bryden M. (ed). *Research on Dolphins*. Oxford University Press.
- Giacometti L. 1967. The skin of the whaie (*Balaenoptera physalus*) *Anatomic Records* 159: 69-76.
- Goldberger, A.L. Rídney, D.R. and West, B.J. 1990. Chaos and Fractals in Human Physiology. *Science American*. 262: 34-41.

- Gray J. 1936. Studies in animal location. *Journal Experimental Biology* 13: 192-199.
- Gwinn S. y Perrin W.F. 1975. Distribution of melanin in the color pattern of *Delphinus delphis*. (Cetacea: Delphinidae) *Fishery Bulletin* 73(2): 439-444.
- Hardy R. 1980. *Temperatura y vida animal*. Cuadernos de Biología. Ed. Omega. Barcelona.
- Harrison R.J. y Thurley K.W. 1974. Structure of the epidermis in *Tursiops*, *Delphinus* and *Phocoena*. pp 45-70. En: Harrison R.J. (ed). *Functional anatomy of marine mammals* 1. Academic Press. New York, NY.
- Hertel H. 1969. Hydrodynamics of Swimming and Wave-Riding Dolphins. pp 31-63. En Andersen H.T. (ed). *The Biology of marine mammals*. Academic Press. New York, NY.
- Hoar W. 1978. *Fisiología general y comparada*. Ediciones Omega S.A. Barcelona
- Huí C.A. 1981. Seawater consumption and water flux in the common *Delphinus delphis*. *Physiology Zoology* 54 (4): 430-440.
- Junqueira L.C. 1982. *La Histología Básica*. Ed. Salvat. Barcelona.
- Kanwisher J. 1960. Physiological measurements on live whales. *Science* 131: 1379-1380.
- Kanwisher J. y Ridgway. 1983. *The Physiological Ecology of Whales and Propoises*. *Scientific American* 248(6): 102-111.
- Kanwisher J. y Leivestad F. 1957. Thermal regulation in whales. *Norsk Hualfangst-tid.*, 1: 1-5.

Kanwisher J. y Sundnes G. 1970. Thermal Regulation in Cetaceans. pp 113-146. En: Norris K.S. (ed). Whales, Dolphins and Porpoises. University of California Press. Berkeley, CA.

Kasting N.W. y Shelley T. 1989. Thermoregulation Beluga (*Delphinapterus leucas*) and Killer (*Orcinus orca*) whales. *Physiological Zoology* 62: 678-701.

Kermack K.A. 1948. The Propulsive power of blue and fin whales. *Journal Experimental Biology* 25-26: 237-240.

Kleiber M. 1972. *The Fire of life*. Krieger publ. Co., New York, NY.

Kramer M.O. 1960. Boundary layer stabilization by distributed damping. *Journal American Society Naval febrero*: 25-33.

Lang T.G. 1966. a. Hydrodynamic Analysis of Dolphin fin profiles. *Nature* 209: 1110-1111.

Lang T.G. 1966. b. Hydrodynamic Analysis of cetacean performance. pp 410-432. En: Norris K.S. (ed). Whales, Dolphins and Porpoises. Universidad of California Press. Berkeley. CA.

Leatherwood S., Reeves R.R., Perrin W.F. y Evans W.E. 1988. Ballenas, delfines y marsopas del pacífico nororiental y de las aguas árticas adyacentes (una guía para su identificación). Comisión interamericana del atún trópic. Informe especial No. 6. La Jolla, California.

Ling J.K. 1974. The integument of Marine Mammals. pp 1-44. En: Harrison R.J. (ed). *Functional anatomy of marine mammals 2*. Academic Press. New York, NY.

Lindley B.D. 1970. Fluxes across epithelia. *American Zoology* 10: 55-364.

Lockhart R.D., Hamilton G.F. y Fyfe F.W. 1965. *Anatomía Humana*. Interamericana-McGraw-Hill. México, DF.

- Maillet M. 1980a. Histología e histofisiología humana: 1 Epitelios de Revestimientos. Ed. A.C. Libros científicos y técnicos. Madrid. España.
- Maillet M. 1980b. Histología e histofisiología humana: 3 Tejidos de sosten. Ed. A.C. Libros científicos y técnicos. Madrid, España.
- Mandelbrot B.B. 1983. The fractal geometry of Nature. W. H. Freeman and Co. New York, NY.
- Medrano L. 1993. Estudio genético del rorcual jorobado en el Pacífico mexicano. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias UNAM. México, DF.
- Mitchell E. 1970. Pigmentation pattern evolution in delphinid cetaceans: An essay in adaptive coloration. Canadian Journal Zoology 48 (4): 717-740.
- Montagna W. 1962. The Structure and Function of skin. Academic Press. New York, NY.
- Palmer E. y Weddell G. 1964. The relationship between structure innervation and function of the skin of the bottlenose dolphin (*Tursiops truncatus*). Zoology Society London 143: 553-568.
- Parry D.A. 1949. The structure of whale bubbler and its thermal properties. Quatrum Journal Microbiology Science 90: 13-36.
- Pertgen H., Jürgens H y Saupe D. 1991. Fractals for the Classroom. Part One. Introduction to Fractals and Chaos. National Council of Teachers of Mathematics. Springer-Verlag
- Purves P.E. 1963. Locomotion in whales. Nature 192: 334-337.
- Romer A.S. y Parson T.S. 1981. Anatomía Comparada. Interamericana México, DF.

- Schmidt-Nielsen, K. 1981. Sistemas de contracorriente en los animales. *Investigación y Ciencia*. Julio, México, D.F. 74-81.
- Scholander P.F. y Krog J. 1971. Counter-current heat exchange and vascular bundles in slots. *Journal Application Physiology* 10: 405-411.
- Scholander P.F., Walters V., Hock R. y Irving L. 1950. Body insulation of some arctic and tropical mammals and birds. *Biology Bulletin* 99: 225-236.
- Shoemaker P.A. y Ridgway S.H. 1991. Cutaneous Ridg in odontocetes. *Marine Mammals Sciencie* 7(1): 66-74.
- Simpson J.G. y Gardner M.B. 1972. Comparative microscopic anatomy of selected marine mammals. pp 248-418. En: Ridgway S.H. (ed). *Mammals of the sea biology and medicine*. Sprigfield Thomas.
- Sokolov, V.E. (1982). *Mammal skin*. University of California Press. Berkeley, Calif.
- Sokolov V.E. y Bulina I. 1969. Interaction of dolphin epidermis whit flow boundary layer. *Nature* 222: 267-268.
- Tinker S.W. 1988. *Whales of the world*. Ed. E.J. Brill. New York, NY.
- Tomiln A.G. 1951. On the thermal regulation in cetaceans. *Prioda* 6: 55-58.
- Viale D. 1979. Mise en évidence d'une fonction excrétrice de la peau chez certains cétacés odontocètes et mysticètes. *Journal of Experimental Biology and Ecology* 40: 221-291.
- Viale, D. 1984. The salt excretive function of the skin and changing coloration in Cetacea. *Annales de l'Institut Océanographique de Paris* 60(1): 87-93.

- Watson L. 1981. Whales of the world. Hutchinson LTD. London.
- West B.J. 1990. Fractal physiology and chaos in medicine. World scientific  
Webel, E.R. 1991. Fractal geometry: A design principle for living organisms. American Journal of Physiology 262: 361-369.
- Whitow G. C. y Hampton D.T. 1974. Body temperature of three especies of whales. Journal Mammalogy 55(3): 653-656.
- Whitow G.C. 1987. Termoregulatory adptations in marine mammals: interacting effects of exercise and body mass. A Review. Marine Mammal Science 3(3): 220-241.
- Williams T.M. 1987. Aproaches for study of exercise physiology and hydrodynamics in marine mammals 9. En: Huntley A.C., Costa D.P., Worthy G.A.J. y Castellii M.A. Society for Marine Mammalogy. Special publication No. 1. Allen Press. Lawrence, KS.
- Young J.Z. 1980. La vida de los mamíferos, anatomía y fisiología. Ed. Omega. Barcelona.

## 11. APÉNDICES

### Apéndice A. Técnicas de tinción.

#### A.1. Técnica de tinción con Hematoxilina - Eosina.

Puede usarse después de cualquier método de fijación. Se utiliza para cortes en parafina, caloidina o por congelación. Las sustancias requeridas y la forma de realizarla son:

##### Hematoxilina de Harris:

Eosina Y

Eosina Y hidrosoluble..... 1.0 g

agua destilada..... 20.0 ml

Disolver y agregar:

Alcohol 95%..... 80.0 ml

##### Solución de trabajo:

Solución madre de Eosina - 1 parte

Alcohol al 80% - 3 partes

Alcohol ácido

Alcohol al 70%..... 1000.0 ml

Ácido clorhídrico concentrado..... 10.0 ml

Agua amoniacal

Agua destilada..... 1000.0 ml

Hidróxido de amonio 28%..... 2-3 ml

##### Procedimiento de tinción:

1. Desparafinar e hidratar hasta agua.
2. Colocar en hematoxilina de Harris por 7 min.
3. Lavar en agua corriente
4. Diferenciar en alcohol ácido (rápidamente 2 o 3 segundos)

5. Lavar bien con agua corriente.
6. Virar en agua amoniacal hasta que los cortes de tornen azules.
7. Lavar en agua corriente.
8. Contrastar con Eosina (de 3 a 5 segundos).
9. Deshidratar, aclarar y montar.

Como resultado, los núcleos se observan azules, con alguna metacronasia, y el citoplasma en varios tonos de rosa

#### A.2. Técnica de PAS.

La técnica de fijación con la que se usa es en formol amortiguado neutro al 10%, para cortes de parafina. La forma de preparar y usar es la siguiente:

##### Solución de Schiff

Se disuelve 1.0 g. de Fucsina básica en 200 ml. de agua destilada caliente, se pone al fuego hasta que hierva y se deja enfriar hasta 50°C. Se añden 20 ml. de ácido clorhídrico concentrado, se enfría un poco más y se añade 1 g. de metabisulfito de sodio.

Se guarda en un lugar oscuro durante 48 hrs, hasta que adquiera un color paja. Se añaden 0.5 g. de carbón vegetal, se filtra y se guarda en refrigeración. Cuando se filtra debe quedar cristalino.

##### Acido clorhídrico concentrado.

Agua destilada ..... 916.5 ml  
 Ácido clorhídrico concentrado ..... 83.5 ml  
 Densidad ..... 1.17-1.19.  
 Ácido peryódico al 5% en solución acuosa.

##### Procedimiento de tinción:

1. Desparafinar e hidratar. Lavar en agua destilada, lavar con agua corriente hasta secar, lavar finalmente con agua destilada.
2. Dejar 10 min. en solución de ácido peryódico, (puede quedarse incluso hasta los minutos).

3. Lavar en Agua destilada.
4. Dejar 15 min. en reactivo de Schiff.
5. Lavar en agua corriente a un chorro pequeño durante 10 min. aproximadamente, observando la laminilla.
6. Colocar en Hematoxilina de Harris durante 6 min.
7. Lavar en agua corriente.
8. Bañar en alcohol ácido, rápido.
9. Lavar en agua corriente.
10. Bañar en agua amoniacal durante 30 segundos.
11. Lavar en agua corriente.
12. Deshidratar:
  - alcohol 96% con 2 cambios,
  - alcohol 100% con 2 cambios,
  - xilol con 2 cambios.
13. Aclarar en xilol.
14. Montar en resina.

#### **A.4. Método tricrómico de Masson (para fibras colágenas).**

Se usa para la técnicas de fijación de Bouin o formol buffer neutro al 10%, en cortes de parafina.

Solución de Bouin.

Solución acuosa saturada de ácido pícrico..... 75.0 ml.

Formalina 37-40%..... 20.0 ml.

Ácido acético glacial..... 5.0 ml.

Fijar los bloques durante 4 a 12 horas dependiendo del tamaño, es importante lavar en varios cambios de alcohol al 5% durante 4 a 6 hrs agitando constantemente para remover el ácido pícrico. Almacenar en alcohol al 70%.

Nota: es muy importante remover el ácido pícrico pues el remanente de este, dificultará posteriores cortes y tinciones.

ESTO  
SALIR DE LA  
DEBE  
BIBLIOTECA

Hematoxilina férrica de Weigert.

Solución A

- Cristales de hematoxilina..... 4.9 g.
- Alcohol al 95%..... 100.0 ml.

Solución B

- Cloruro férrico al 29% en solución acuosa..... 4.0 ml.
- Agua destilada..... 95.0 ml.
- Acido clorhídrico concentrado..... 1.0 ml.

La solución de trabajo se hace con partes iguales de la solución A y de la solución B.

Procedimientos de tinción:

1. Desparafinar e hidratar en agua corriente.
2. Colocar en solución Bouin a 56° una hora si fueron fijados en formol al 10%.
3. Lavar en agua corriente hasta que se pierda el color amarillo.
4. Lavar en agua destilada.
5. Pasar a Hematoxilina de Weigert durante 10 minutos, hasta que se tenga un color azul marino o negro.
6. Lavar en agua corriente y luego en agua destilada.
7. Poner en escarlata de Briefich de 4 a 5 minutos.
8. Lavar rápido en agua destilada.
9. Colocar en ácido fosfolungtico-ácido fosforo híbrido durante 5 min.
10. Lavar rápido en agua destilada.
11. Contrastar en azul de anilina durante 5 min. (o en verde claro).
12. Lavar lo más rápido que se pueda en agua destilada.
13. Colocar en ácido acético glacial 1% durante 5 min.
14. Deshidratar rapidamente en alcoholes de 96%, 2 veces en tres baños; absoluto, 2 veces en 5 baños; xilol en 5 baños.

Nota: Cuando los tejidos han estado fijados en Bouin se desparafinan, se deshidratan y se ponen a lavar hasta que se pierde el color amarillo, continua con el paso 4.

## Apéndice B.

### B.1. Cálculo de la dimensión fractal del borde papilar en corte perpendicular.

En el cálculo de la dimensión fractal  $1/s$  se define como la precisión de la medida y  $u$  como la longitud total; de forma que el  $\log(u)$  cambia con el incremento de  $\log 1/s$  o la precisión.

$$\log u = d \cdot \log 1/s + b;$$

El número de cajas o piezas ocupables en un espacio se definen como:

$$a = 1/s^D$$

donde  $D$  es el exponente que evalúa a los números al acercarse a las dimensiones de la línea y donde  $s$  es el factor de la escala.

Al relacionar la ley de la medición usando diferentes aberturas del compás y la dimensión de autosemejanza de la curva fractal.

$$\log a = D_s \cdot \log 1/s; \quad (1.1)$$

de igual manera definimos  $u$  como  $u = 1/s^D$ , donde  $u$  es la precisión de la medida.

Al colocar logaritmos tenemos que:

$$\log u = d \cdot \log 1/s; \quad (1.2)$$

si relacionamos la precisión de la escala y el número de piezas a 1, entonces:

$$s = 1 \text{ y } u = 1$$
$$u = a \cdot s;$$

Con logaritmos:

$$\log u = \log a + \log s \quad (1.3)$$

Sustituyendo en 1.3 con 1.1 y 1.2, obtenemos que:

$$d \cdot \log 1/s = D_S \cdot \log 1/s + \log s$$

Como  $\log 1/s = -\log s$ , entonces:

$$-d \cdot \log s = -D_S \cdot \log 1/s + \log s;$$

Dividiendo entre  $\log s$  como factor común se obtiene:

$$D_S = 1 + d$$

Si  $d$  es  $-d$  dependiendo de la calda de la recta; entonces

$$D = 1 + (-d)$$

$$D = 1 - d$$

### Apéndice C. Alometría.

Muchos fenómenos biológicos siguen, en general, una sencilla ecuación:

$$y = bx^m$$

lo cual indica que si una variable  $y$  es proyectada logarítmicamente frente a otra variable  $x$  se obtiene una línea recta. La ecuación alométrica es la ley más sencilla posible del crecimiento relativo, tomando el término en el aspecto más amplio, o sea el incremento de una variable  $y$  con respecto a otra variable  $x$ .

La ecuación alométrica es una solución de esta función que afirma que la proporción entre los crecimientos relativos de  $y$  y  $x$  es constante. De forma que la relación alométrica considera que todo crecimiento relativo - suponiendo continuidad - puede en general expresarse por:

$$(\text{tasa relativa de crecimiento}) t. r. c. (y,x) = F_1$$

donde  $F$  es alguna función no definida de las variables en cuestión. La hipótesis más simple es que  $F$  es una constante,  $m$ , lo cual representa el principio de la alometría.

Sin embargo el principio de la alometría no se derivó de esta forma sino por Sarrus y Rameaux hacia 1840 (En: Kleiber, 1972) llamándose posteriormente la Ley de Rubner (alrededor de 1880). Esta ley es un caso muy especial de la función alométrica, con  $y$  representando la tasa de metabolismo basal,  $x$  el peso corporal, y el exponente  $m$  de aproximadamente  $2/3$ . Posteriormente Kleiber (1972) haría las correcciones para definir  $m=3/4$  como el exponente real. Además de esto, se conoce que la dependencia de las tasas metabólicas con respecto al tamaño corporal no es invariable, como lo suponía la ley de la superficie en su forma más teórica, puede variar en función de: 1. el organismo o tejido en consideración; 2. las condiciones fisiológicas; y 3. factores experimentales (Von Bertalanffy, 1976).

En fisiología son de gran interés el estudio de las relaciones que dependen de la escalas. Una de estas relaciones, tratada en este trabajo, se refiere a la proporción área/volumen en

organismos de diferente tamaño en procesos fisiológicos como la termorregulación, la hidrodinámica y la osmorregulación.

**Apéndice D. Estimación del área corporal de los cetáceos (Kermack, 1948).**

Si se tiene un cetáceo de longitud total  $l_t$  con una anchura máxima cuyo radio es  $r$ , el cuerpo puede dividirse en dos secciones de longitud  $l_1$  y  $l_2$  tales que:

$$l_t = l_1 + l_2;$$

El área corporal del animal  $A_t$  se estima entonces como la suma de las áreas laterales  $A_1$  y  $A_2$  de los dos conos envolventes con radio  $r$  y alturas  $l_1$  y  $l_2$  de la siguiente forma:

$$A_t = [\pi r \sqrt{(r^2 + l_1^2)}] + [\pi r \sqrt{(r^2 + l_2^2)}]$$

$r$ ,  $l_1$  y  $l_2$  pueden ser expresados en función de la longitud total de la siguiente forma:

$$r = a l_t;$$

$$l_1 = b l_t;$$

$$l_2 = c l_t;$$

Luego de factorizar la ecuación para el área total y de sustituir los valores de  $r$ ,  $l_1$  y  $l_2$ , se tiene que:

$$A_t = \pi a [\sqrt{(a^2 + b^2)} + \sqrt{(a^2 + c^2)}] l_t^2;$$

A partir de algunas mediciones hechas sobre fotografías, se obtiene que, en promedio para las seis especies analizadas,  $a = 0.101$ ,  $b = 0.646$  y  $c = 0.354$  por lo que la ecuación anterior puede resumirse como sigue:

$$A_t = 0.32 l_t^2$$