



**INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL**  
**CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE CIENCIAS MARINAS**



**EFFECTO DE LA ALOMETRÍA EN LA  
ESTIMACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE  
CRECIMIENTO INDIVIDUAL DEL MARLIN AZUL**  
*Makaira nigricans*

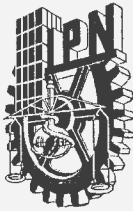
**TESIS**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
DOCTORADO EN CIENCIAS MARINAS

PRESENTA

**ULIANOV JAKES COTA**

LA PAZ, B.C.S, JUNIO DE 2013



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
**SECRETARIA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**  
**ACTA DE REVISIÓN DE TESIS**

En la Ciudad de La Paz, B.C.S., siendo las 12:00 horas del día 07 del mes de Mayo del 2013 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de CICIMAR para examinar la tesis titulada:

**"EFECTO DE LA ALOMETRÍA EN LA ESTIMACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE CRECIMIENTO INDIVIDUAL DEL MARLIN AZUL *Makaira nigricans*"**

Presentada por el alumno:

**JAKES**  
Apellido paterno

**COTA**  
materno

**ULIANOV**  
nombre(s)

Con registro: 

B	0	9	1	4	0	8
---	---	---	---	---	---	---

Aspirante de:

**DOCTORADO EN CIENCIAS MARINAS**

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR LA DEFENSA DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

**LA COMISION REVISORA**  
Director(a) de Tesis

  
DR. RUBÉN RODRÍGUEZ SÁNCHEZ

  
DR. VÍCTOR MANUEL GÓMEZ MUÑOZ

  
DRA. SOFÍA ORTEGA GARCÍA

  
DR. HÉCTOR VILLALOBOS ORTIZ

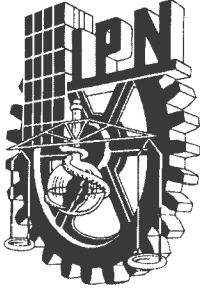
  
DRA. CELIA LÓPEZ GONZÁLEZ

**PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES**



  
DRA. MARÍA MARGARITA CASAS VALDÉZ

I.P.N.  
CICIMAR  
DIRECCIÓN



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL  
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

**CARTA CESIÓN DE DERECHOS**

En la Ciudad de La Paz, B.C.S., el día 23 del mes Mayo del año 2013  
el (la) que suscribe MC. ULIANOV JAKES COTA alumno(a) del  
Programa de DOCTORADO EN CIENCIAS MARINAS  
con número de registro B091408 adscrito al CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE CIENCIAS MARINAS  
manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de tesis, bajo la dirección de:  
DR. RUBÉN RODRÍGUEZ SÁNCHEZ

y cede los derechos del trabajo titulado:

"EFECTO DE LA ALOMETRÍA EN LA ESTIMACIÓN DE LOS PARÁMETROS  
DE CRECIMIENTO INDIVIDUAL DEL MARLIN AZUL *Makaira nigricans*"

al Instituto Politécnico Nacional, para su difusión con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Éste, puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección: vonailu01440491@hotmail.com - rrodrig@ipn.mx

Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

MC. ULIANOV JAKES COTA

*nombre y firma*

## AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) y al Programa Institucional de Formación de Investigadores (PIFI) del Instituto Politécnico Nacional por las becas otorgadas y al proyecto “Estudios Biológicos de Depredadores Ápice y Sus Movimientos Dentro del Ecosistema Pelágico del Pacífico Oriental” por el apoyo técnico. Al Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas (CICIMAR) porque en sus instalaciones reforcé mi formación académica.

Al Dr. Rubén Rodríguez Sánchez por todo su apoyo, por todas sus enseñanzas, por su paciencia hacia mí y sobre todo por su amistad. A la Dra. Sofía Ortega García por todo el apoyo brindado durante todo este camino recorrido desde la maestría hasta el doctorado.

A los miembros de mi comité revisor: Dr. Héctor Villalobos, Dr. Víctor Gómez, y Dra. Celia López por sus valiosas observaciones y sugerencias que enriquecieron enormemente esta tesis.

A Humberto Ceseña por su disposición y atención para atender cualquier trámite académico, por su buen sentido del humor y sobre todo por su amistad.

A mis entrañables amigos Fátima, Christian (Tiburón), César, Luis, Kasha, Iván, Cinthia, Chapo, Rosa, Dudo, Arquí porque siempre conté con todo su apoyo, por sus consejos y sobre todo por su valiosa amistad. A todos mis amigos y compañeros del CICIMAR (Marcela, Alfredo, Heriberto, Edgardo, Ember, Raúl, Milo, Oso) porque con la convivencia del día a día despejamos nuestras mentes y liberamos un poco el stress acumulado.

A Marisol por regalarme su corazón, por impulsarme a salir adelante, por ser mi compañera ideal, por estar siempre ahí, por todo eso y más, te amo.

## DEDICATORIA

Indudablemente dedico este trabajo a mi familia.

A mis padres: María Catalina Cota Montoya y Vidal Jakes Ramírez por darme la vida, por darme siempre todo lo que necesité, por su apoyo en todo momento, por su sacrificio para sacarme adelante, por su educación, por enseñarme cual es el camino correcto, por sus palabras de aliento en esos momentos difíciles y por su gran amor.

A mis hermanos: Carlos, Carmina, Vladimir y Eneyda porque siempre me apoyaron en todo, me estimularon para seguir adelante, por su compañía y por el amor que siempre me demostraron.

A mi segunda mamá Josefina y mis segundos hermanos Karim y Pavel por estar siempre ahí dispuestos a ayudarme, por su amistad y su amor.

## ÍNDICE

GLOSARIO.....	IV
LISTA DE TABLAS.....	VI
LISTA DE FIGURAS.....	IX
RESUMEN.....	XIV
ABSTRACT.....	XVI
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. ANTECEDENTES.....	4
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	7
4. HIPÓTESIS.....	10
5. OBJETIVOS.....	11
6. MATERIAL Y MÉTODOS .....	11
6.1 Muestreo.....	11
6.2 Laboratorio.....	13
6.3 Evaluación del crecimiento alométrico entre las dimensiones de las espinas de la aleta dorsal y la longitud posorbital de los peces.....	14
6.4 Verificación de la posición anatómica de la espina recolectada.....	16
6.4.1 Morfometría tradicional (MT).....	17
6.4.2 Morfometría geométrica (MG).....	18
6.4.3 Método de partición recursiva (PR) .....	19
6.4.4 Evaluación de la concordancia entre métodos .....	20
6.5 Establecimiento del nivel de corte .....	21

6.6	Elaboración de cortes transversales.....	23
6.7	Conteo de marcas de crecimiento y estructura por edades .....	23
6.8	Mediciones.....	24
6.9	Retrocálculo de longitudes .....	25
6.9.1	Métodos de retrocálculo.....	27
6.9.2	Selección del método de retrocálculo .....	31
6.10	Crecimiento individual.....	32
6.10.1	Evaluación de las posibles diferencias .....	33
7.	RESULTADOS .....	33
7.1	Muestreo.....	33
7.2	Evaluación del crecimiento alométrico entre las dimensiones de las espinas de la aleta dorsal y la longitud posorbital de los peces.....	35
7.3	Verificación de la posición anatómica de la espina recolectada.....	37
7.3.1	Morfometría tradicional (MT).....	37
7.3.2	Morfometría geométrica (MG).....	39
7.3.3	Método de partición recursiva (PR) .....	41
7.3.4	Evaluación de la concordancia entre métodos .....	43
7.4	Establecimiento del nivel de corte .....	43
7.5	Conteo de marcas de crecimiento y estructura por edades .....	44
7.6	Retrocálculo de longitudes .....	46
7.7	Crecimiento individual.....	57
8.	DISCUSIÓN.....	59
8.1	Muestreo.....	59

8.2 Evaluación del crecimiento alométrico entre las dimensiones de las espinas de la aleta dorsal y la longitud posorbital de los peces.....	62
8.3 Verificación de la posición anatómica de la espina recolectada.....	64
8.4 Establecimiento del nivel de corte .....	66
8.5 Conteo de marcas de crecimiento y estructura por edades .....	68
8.6 Retrocálculo de longitudes .....	72
8.7 Crecimiento individual.....	76
9. CONCLUSIONES .....	81
10. BIBLIOGRAFÍA.....	83
11. ANEXOS.....	96



## GLOSARIO

**Alometría:** Se refiere al crecimiento diferencial de una parte de un organismo en relación al organismo completo o una parte de él.

**Apófisis:** Parte saliente de un hueso que sirve para permitir algún tipo de articulación o para insertar los músculos correspondientes.

**Banda Hialina:** Zona concéntrica en una estructura esquelética que permite el paso de la luz, aparece clara con luz transmitida y oscura con luz reflejada, generalmente se forma en el período de crecimiento lento.

**Banda Opaca:** Zona concéntrica en una estructura esquelética que inhibe el paso de la luz, aparece oscura con luz transmitida y clara con luz reflejada, generalmente se forma en el período de crecimiento rápido.

**Centroide:** Es el centro de la forma.

**Foco:** Origen hipotético o real de la estructura esquelética que se examina. Tradicionalmente se refiere a escamas pero puede ser usado en un sentido general para espinas y radios de las aletas, vértebras u otolitos. Es usado como punto de partida para el conteo de marcas de crecimiento o como punto de referencia para realizar mediciones.

**Grupo de Edad:** Grupo de peces de edad similar o con el mismo número de marcas de crecimiento.

**Isometría:** Se da cuando una parte de un organismo crece a la misma tasa en relación al organismo completo o una parte de él.

**Landmark (marca de referencia):** Puntos anatómicos discretos o marcas de referencia sobre una forma biológica, los cuales pueden ser reconocidos en el mismo lugar en todos los especímenes analizados.

**Marca de Crecimiento:** Conjunto de una banda opaca seguida por una banda hialina cuya deposición se encuentra asociada a un período de tiempo determinado (e.g. un año).

**Morfometría:** Conjunto de procedimientos estadísticos para el análisis del tamaño y forma de organismos completos y partes de ellos.

**Morfometría geométrica:** Es una serie de procedimientos estadísticos multivariados para el análisis de la forma a través de datos de coordenadas cartesianas, usualmente limitados a landmarks.

**Morfometría tradicional:** Procedimientos estadísticos multivariados para el análisis de la forma utilizando datos tales como distancias y ángulos.

**Superposición:** Es un procedimiento para hacer coincidir las formas antes de su comparación. Se denomina superposición porque las configuraciones de landmarks se colocan una sobre la otra utilizando operaciones matemáticas que no alteran la forma (i.e. trasladar, escalar y rotar).

**Truss Network (Red entramada):** Es un protocolo geométrico que hace uso de mediciones cruzadas entre landmarks, refuerza la cobertura sistemática de la forma de un organismo (o alguna parte de un organismo) y permite la reconstrucción de la forma original del mismo.

## LISTA DE TABLAS

Tabla I. Relación de distancias entre las landmarks en las espinas de la aleta dorsal de marlin azul <i>Makaira nigricans</i> .....	13
Tabla II. Análisis de datos usados para clasificar a las espinas de la aleta dorsal del marlin azul <i>Makaira nigricans</i> a través del algoritmo partDSA .....	20
Tabla III. Valores de los coeficientes de alometría ( $f$ ) que resultaron de la relación alométrica entre la longitud posorbital y las medidas en la zona basal (Tabla I) de cada una de las cinco espinas de la aleta dorsal del marlin azul <i>Makaira nigricans</i> ..	36
Tabla IV. Coeficientes de las funciones de discriminación lineal (LD1 y LD2). D1-D2 y D4-D6 corresponden a las medidas en la zona basal de las espinas (Tabla I).....	38
Tabla V. Matriz de reclasificación de las espinas recolectadas en 2007-2009 derivada del LDA.....	39
Tabla VI. Valor de los coeficientes de los ejes de variables canónicas (CV1 y CV2). Las letras (a-d) corresponden a las landmarks ubicadas en la base de las espinas (Fig. 1). .....	40
Tabla VII. Matriz de reclasificación de las espinas recolectadas en 2007-2009 derivada del CVA. ....	41
Tabla VIII. Mejor número de particiones y error de clasificación asociado a cada una de las posibles particiones para cada análisis de datos de acuerdo a la Tabla II.....	42
Tabla IX. Matriz de reclasificación de las espinas recolectadas en 2007-2009 derivada de la clave de identificación del cuadro 1 .....	43
Tabla X. Coeficientes del modelo alométrico que relaciona la longitud posorbital de los organismos y el diámetro de las espinas en cada una de las nueve posiciones .....	44
Tabla XI. Coeficientes de la relación lineal $R$ respecto a $L$ ( $R = a + bL$ ) para los tres niveles de corte de hembras de marlin azul <i>Makaira nigricans</i> desembarcadas por la flota deportiva en Cabo San Lucas, B.C.S. en el periodo 2005-2006 .....	51

Tabla XII. Coeficientes de la relación lineal $L$ respecto a $R$ ( $L = c + dR$ ) para los tres niveles de corte de hembras de marlin azul <i>Makaira nigricans</i> desembarcadas por la flota deportiva en Cabo San Lucas, B.C.S. en el periodo 2005-2006 .....	51
Tabla XIII. Coeficientes de la relación alométrica $L$ respecto a $R$ ( $L = eR^f$ ) para los tres niveles de corte de hembras de marlin azul <i>Makaira nigricans</i> desembarcadas por la flota deportiva en Cabo San Lucas, B.C.S. en el periodo 2005-2006 .....	51
Tabla XIV. Resultados de la prueba t de Student relativas a la comparación de pendientes entre niveles de corte dentro de cada una de las relaciones establecidas entre los radios de los cortes y la longitud posorbital de los organismos ( $R = a + bL$ , $L = c + dR$ , $L = uR^f$ ) .....	52
Tabla XV. Longitudes promedio por grupo de edad observadas, retrocalculadas a partir de secciones transversales establecidas a 0.5 veces la distancia entre las apófisis inferiores de la cuarta espina dorsal de hembras de marlin azul <i>Makaira nigricans</i> desembarcadas en Cabo San Lucas, B.C.S. en el periodo 2005-2006, y diferencias entre las longitudes observadas y calculadas.....	53
Tabla XVI. Longitudes promedio por grupo de edad observadas, retrocalculadas a partir de secciones transversales establecidas a 1 vez la distancia entre las apófisis inferiores de la cuarta espina dorsal de hembras de marlin azul <i>Makaira nigricans</i> desembarcadas en Cabo San Lucas, B.C.S. en el periodo 2005-2006, y diferencias entre las longitudes observadas y calculadas.....	54
Tabla XVII. Longitudes promedio por grupo de edad observadas, retrocalculadas a partir de secciones transversales establecidas a 2.5 veces la distancia entre las apófisis inferiores de la cuarta espina dorsal de hembras de marlin azul <i>Makaira nigricans</i> desembarcadas en Cabo San Lucas, B.C.S. en el periodo 2005-2006, y diferencias entre las longitudes observadas y calculadas.....	55
Tabla XVIII. Valores de los parámetros del modelo de crecimiento de von Bertalanffy de hembras de marlin azul <i>Makaira nigricans</i> desembarcadas en Cabo San Lucas, B.C.S., en el periodo 2005-2006 estimados a través del uso de cortes transversales obtenidos desde la base y sobre el eje principal de la espina al 50 %, 100 % y 250 % de la distancia entre las apófisis inferiores de la misma espina. SCR: suma de cuadrados residuales del ajuste de cada modelo .....	58

Tabla XIX. Resultados de la prueba T2 de Hotelling para las comparaciones de los parámetros de crecimiento del modelo von Bertalanffy de hembras de marlin azul <i>Makaira nigricans</i> desembarcadas en Cabo San Lucas, B.C.S., en los años 2005 y 2006. Los parámetros fueron estimados a partir de cortes de la cuarta espina dorsal en los niveles al 50 %, 100 % y 250 % de la distancia entre las apófisis inferiores de la misma espina.....	59
Tabla XX. Estimaciones de edad y parámetros de crecimiento individual para el marlin azul <i>Makaira nigricans</i> del Pacífico y del Atlántico reportadas en la literatura por área y periodo de estudio, sistema de muestro y método de estimación. Edad Min-Max, Edad mínima y máxima reportada; Predominantes, edades predominantes en el estudio .....	80
Tabla XXI. Valores de los coeficientes de la relación alométrica entre las distancias medidas en la espina 1 y la longitud posorbital de los organismos, y resultados de la prueba t de Student para pendientes. D1-D6 representan una medida de acuerdo a la nomenclatura de la tabla I .....	102
Tabla XXII. Valores de los coeficientes de la relación alométrica entre las distancias medidas en la espina 2 y la longitud posorbital de los organismos, y resultados de la prueba t de Student para pendientes. D1-D6 representan una medida de acuerdo a la nomenclatura de la tabla I .....	102
Tabla XXIII. Valores de los coeficientes de la relación alométrica entre las distancias medidas en la espina 3 y la longitud posorbital de los organismos, y resultados de la prueba t de Student para pendientes. D1-D6 representan una medida de acuerdo a la nomenclatura de la tabla I .....	102
Tabla XXIV. Valores de los coeficientes de la relación alométrica entre las distancias medidas en la espina 4 y la longitud posorbital de los organismos, y resultados de la prueba t de Student para pendientes. D1-D6 representan una medida de acuerdo a la nomenclatura de la tabla I .....	103
Tabla XXV. Valores de los coeficientes de la relación alométrica entre las distancias medidas en la espina 5 y la longitud posorbital de los organismos, y resultados de la prueba t de Student para pendientes. D1-D6 representan una medida de acuerdo a la nomenclatura de la tabla I .....	103

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1. Representación esquemática de la ubicación de las landmarks (letras a-d) y las distancias entre ellas (D1-D6) en las espinas de la aleta dorsal de marlin azul *Makaira nigricans*. Las distancias entre las landmarks son descritas en la tabla I..... 14
- Figura 2. Vista frontal de una espina de la aleta dorsal del marlin azul *Makaira nigricans* mostrando marcas a diferentes niveles (A1, A2... An) de donde se obtuvieron los diámetros correspondientes. Se ejemplifica que las sucesivas distancias D1' iniciaron desde la base de la espina (C), y fueron establecidas utilizando la distancia entre las apófisis inferiores (D1) como unidad de referencia ..... 21
- Figura 3. Corte transversal de una espina de la aleta dorsal de marlin azul *Makaira nigricans* en donde se ejemplifica la medición de un radio parcial (Ri) y el total (Rt) a partir del centro del foco (F) ..... 24
- Figura 4. Número de individuos de marlin azul *Makaira nigricans* muestreados por mes (barras) del periodo 2005-2009, y temperatura superficial del mar (línea) en el área de operación de la flota deportiva de Cabo San Lucas, B.C.S, México ..... 34
- Figura 5. Estructura de tallas de hembras de marlin azul *Makaira nigricans* desembarcadas por la flota deportiva en Cabo San Lucas, B.C.S. en el periodo 2005-2009 ..... 35
- Figura 6. Diagrama de dispersión de las espinas en las funciones de discriminación lineal (LD1 y LD2), Cuadros: espina 1; triángulos: espina 4; círculos: espina 5 ..... 38
- Figura 7. Superposición de las landmarks (coordenadas) y forma promedio de la zona basal de las espinas derivada del análisis procrustes. Cuadros: espina 1; triángulos: espina 4; círculos: espina 5 ..... 40
- Figura 8. Diagrama de dispersión de las espinas en los ejes de variables canónicas (CV1 y CV2). Cuadros: espina 1; triángulos: espina 4; círculos: espina 5 ..... 41
- Figura 9. Estructura por edades de la captura anual de hembras de marlin azul *Makaira nigricans* desembarcadas en Cabo San Lucas, B.C.S. durante los años 2005 (A), 2006 (B) y para el periodo 2005-2006 (C)..... 46

Figura 10. Relación lineal $R$ respecto a $L$ ( $R = a + bL$ ) para los tres niveles de corte de hembras de marlin azul <i>Makaira nigricans</i> desembarcadas por la flota deportiva en Cabo San Lucas, B.C.S. en el periodo 2005-2006.....	48
Figura 11. Relación lineal $L$ respecto a $R$ ( $L = c + dR$ ) para los tres niveles de corte de hembras de marlin azul <i>Makaira nigricans</i> desembarcadas por la flota deportiva en Cabo San Lucas, B.C.S. en el periodo 2005-2006.....	49
Figura 12. Relación alométrica $L$ respecto a $R$ ( $L = uR^f$ ) para los tres niveles de corte de hembras de marlin azul <i>Makaira nigricans</i> desembarcadas por la flota deportiva en Cabo San Lucas, B.C.S. en el periodo 2005-2006.....	50
Figura 13. Curvas de crecimiento de hembras de marlin azul <i>Makaira nigricans</i> desembarcadas en Cabo San Lucas, B.C.S. en el periodo 2005-2006. Cada curva fue estimada a través del uso de diferentes cortes transversales obtenidos desde la base y sobre el eje principal de la espina al 50 %, 100 % y 250 % de la distancia entre las apófisis inferiores de la misma espina.....	58
Figura 14. Longitudes promedio por grupo de edad observadas y retrocalculadas con el método de regresión para el nivel de corte del 50 % de hembras de marlin azul <i>Makaira nigricans</i> desembarcadas en Cabo San Lucas, B.C.S. en el periodo 2005-2006 .....	104
Figura 15. Longitudes promedio por grupo de edad observadas y retrocalculadas con el método de Dahl-Lea para el nivel de corte del 50 % de hembras de marlin azul <i>Makaira nigricans</i> desembarcadas en Cabo San Lucas, B.C.S. en el periodo 2005-2006 .....	104
Figura 16. Longitudes promedio por grupo de edad observadas y retrocalculadas con el método de Fraser-Lee para el nivel de corte del 50 % de hembras de marlin azul <i>Makaira nigricans</i> desembarcadas en Cabo San Lucas, B.C.S. en el periodo 2005-2006 .....	105
Figura 17. Longitudes promedio por grupo de edad observadas y retrocalculadas con el método del intercepto biológico para el nivel de corte del 50 % de hembras de marlin azul <i>Makaira nigricans</i> desembarcadas en Cabo San Lucas, B.C.S. en el periodo 2005-2006 .....	105

Figura 18. Longitudes promedio por grupo de edad observadas y retrocalculadas con el método de Hile (SPH) para el nivel de corte del 50 % de hembras de marlin azul <i>Makaira nigricans</i> desembarcadas en Cabo San Lucas, B.C.S. en el periodo 2005-2006 .....	106
Figura 19. Longitudes promedio por grupo de edad observadas y retrocalculadas con el método de Whitney y Carlander (BPH) para el nivel de corte del 50 % de hembras de marlin azul <i>Makaira nigricans</i> desembarcadas en Cabo San Lucas, B.C.S. en el periodo 2005-2006 .....	106
Figura 20. Longitudes promedio por grupo de edad observadas y retrocalculadas con el método alométrico 1 para el nivel de corte del 50 % de hembras de marlin azul <i>Makaira nigricans</i> desembarcadas en Cabo San Lucas, B.C.S. en el periodo 2005-2006 .....	107
Figura 21. Longitudes promedio por grupo de edad observadas y retrocalculadas con el método alométrico 2 para el nivel de corte del 50 % de hembras de marlin azul <i>Makaira nigricans</i> desembarcadas en Cabo San Lucas, B.C.S. en el periodo 2005-2006 .....	107
Figura 22. Longitudes promedio por grupo de edad observadas y retrocalculadas con el método de regresión para el nivel de corte del 100 % de hembras de marlin azul <i>Makaira nigricans</i> desembarcadas en Cabo San Lucas, B.C.S. en el periodo 2005-2006 .....	108
Figura 23. Longitudes promedio por grupo de edad observadas y retrocalculadas con el método de Dahl-Lea para el nivel de corte del 100 % de hembras de marlin azul <i>Makaira nigricans</i> desembarcadas en Cabo San Lucas, B.C.S. en el periodo 2005-2006 .....	108
Figura 24. Longitudes promedio por grupo de edad observadas y retrocalculadas con el método de Fraser-Lee para el nivel de corte del 100 % de hembras de marlin azul <i>Makaira nigricans</i> desembarcadas en Cabo San Lucas, B.C.S. en el periodo 2005-2006 .....	109
Figura 25. Longitudes promedio por grupo de edad observadas y retrocalculadas con el método del intercepto biológico para el nivel de corte del 100 % de hembras de	



marlin azul <i>Makaira nigricans</i> desembarcadas en Cabo San Lucas, B.C.S. en el periodo 2005-2006 .....	109
Figura 26. Longitudes promedio por grupo de edad observadas y retrocalculadas con el método de Hile (SPH) para el nivel de corte del 100 % de hembras de marlin azul <i>Makaira nigricans</i> desembarcadas en Cabo San Lucas, B.C.S. en el periodo 2005-2006 .....	110
Figura 27. Longitudes promedio por grupo de edad observadas y retrocalculadas con el método de Whitney y Carlander (BPH) para el nivel de corte del 100 % de hembras de marlin azul <i>Makaira nigricans</i> desembarcadas en Cabo San Lucas, B.C.S. en el periodo 2005-2006 .....	110
Figura 28. Longitudes promedio por grupo de edad observadas y retrocalculadas con el método alométrico 1 para el nivel de corte del 100 % de hembras de marlin azul <i>Makaira nigricans</i> desembarcadas en Cabo San Lucas, B.C.S. en el periodo 2005-2006 .....	111
Figura 29. Longitudes promedio por grupo de edad observadas y retrocalculadas con el método alométrico 2 para el nivel de corte del 100 % de hembras de marlin azul <i>Makaira nigricans</i> desembarcadas en Cabo San Lucas, B.C.S. en el periodo 2005-2006 .....	111
Figura 30. Longitudes promedio por grupo de edad observadas y retrocalculadas con el método de regresión para el nivel de corte del 250 % de hembras de marlin azul <i>Makaira nigricans</i> desembarcadas en Cabo San Lucas, B.C.S. en el periodo 2005-2006 .....	112
Figura 31. Longitudes promedio por grupo de edad observadas y retrocalculadas con el método de Dahl-Lea para el nivel de corte del 250 % de hembras de marlin azul <i>Makaira nigricans</i> desembarcadas en Cabo San Lucas, B.C.S. en el periodo 2005-2006 .....	112
Figura 32. Longitudes promedio por grupo de edad observadas y retrocalculadas con el método de Fraser-Lee para el nivel de corte del 250 % de hembras de marlin azul <i>Makaira nigricans</i> desembarcadas en Cabo San Lucas, B.C.S. en el periodo 2005-2006 .....	113

Figura 33. Longitudes promedio por grupo de edad observadas y retrocalculadas con el método del intercepto biológico para el nivel de corte del 250 % de hembras de marlin azul <i>Makaira nigricans</i> desembarcadas en Cabo San Lucas, B.C.S. en el periodo 2005-2006 .....	113
Figura 34. Longitudes promedio por grupo de edad observadas y retrocalculadas con el método de Hile (SPH) para el nivel de corte del 250 % de hembras de marlin azul <i>Makaira nigricans</i> desembarcadas en Cabo San Lucas, B.C.S. en el periodo 2005-2006 .....	114
Figura 35. Longitudes promedio por grupo de edad observadas y retrocalculadas con el método de Whitney y Carlander (BPH) para el nivel de corte del 250 % de hembras de marlin azul <i>Makaira nigricans</i> desembarcadas en Cabo San Lucas, B.C.S. en el periodo 2005-2006 .....	114
Figura 36. Longitudes promedio por grupo de edad observadas y retrocalculadas con el método alométrico 1 para el nivel de corte del 250 % de hembras de marlin azul <i>Makaira nigricans</i> desembarcadas en Cabo San Lucas, B.C.S. en el periodo 2005-2006 .....	115
Figura 37. Longitudes promedio por grupo de edad observadas y retrocalculadas con el método alométrico 2 para el nivel de corte del 250 % de hembras de marlin azul <i>Makaira nigricans</i> desembarcadas en Cabo San Lucas, B.C.S. en el periodo 2005-2006 .....	115

## RESUMEN

La edad y los parámetros de crecimiento individual (*PCI*) en peces de pico como el marlin azul *Makaira nigricans*, usualmente son estimados a partir de cortes transversales de las espinas (*CTE*) de la aleta dorsal. Para evitar estimaciones sesgadas dada la predominancia de peces grandes en las capturas muestreadas, se deben estimar longitudes a edades previas a su captura (*RLs*, longitudes retrocalculadas), bajo el supuesto teórico de crecimiento isométrico entre el radio (o diámetro) de los *CTE* y la longitud posorbital (*L*) de los peces. La selección de la espina a utilizar, el nivel para obtener el *CTE* y las *RLs* se efectúan sin considerar que el crecimiento entre la espina y *L* es alométrico y variante dada la forma cónica de la espina. El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto del crecimiento alométrico de las espinas respecto a *L* y proponer criterios que reduzcan errores para estimar *RLs* y *PCI*. Entre enero-2005 y diciembre-2009 fueron muestreados 285 ejemplares (todos hembras con *L* entre 141 y 330 cm) desembarcados por la flota deportiva de Cabo San Lucas, B.C.S., México. Durante 2005-2006, de cada ejemplar supuestamente fue recolectada la cuarta espina ( $n = 174$ ) y en 2007-2009 las primeras cinco espinas de la aleta dorsal ( $n = 111$ ). De las cinco espinas del mismo pez, distintas dimensiones en la zona basal fueron registradas y analizadas para evaluar el crecimiento alométrico de las espinas con respecto a *L*. Se concluyó que la cuarta espina es la estructura más adecuada para estimar la edad y los *PCI*. La recolección involuntaria de otra espina diferente a la cuarta durante 2005-2006 fue considerada y evaluada utilizando las características morfométricas de la zona basal de las espinas, analizándolas con tres técnicas estadísticas diferentes. De las 174 espinas recolectadas en 2005-2006, los tres métodos coincidieron en clasificar como cuarta espina a 136 estructuras, mismas que fueron utilizadas en los análisis subsecuentes. Al no utilizar o mezclar otras espinas en los análisis fueron evitadas inconsistencias y sesgos en los *PCI* estimados. Un análisis geométrico iterativo fue realizado para encontrar la ubicación a lo largo de la espina donde el diámetro de esta estructura y *L* pudieran aproximarse a la isometría, y de esa posición obtener los *CTE* para estimar las *RLs* y *PCI*. El nivel para obtener los *CTE* en la cuarta espina de

la aleta dorsal fue establecido desde la base y sobre el eje principal a 2.5 veces la distancia entre sus apófisis inferiores. Adicionalmente, para comparar y evaluar estadísticamente el efecto de la alometría en la estimación de *PCI*, otros dos niveles de *CTE* de las mismas espinas fueron utilizados, uno al 50 % y otro al 100 % de la distancia entre las apófisis inferiores. Para cada uno de los tres niveles de corte fueron estimadas las *RLs* y *PCI* del modelo de von Bertalanffy. Para estimar los *RLs* fueron utilizados seis métodos de la literatura y dos métodos de retrocálculo nuevos fueron propuestos, el alométrico 1 y alométrico 2, que se basan en el supuesto de que el crecimiento entre el radio de la espina y *L* es alométrico. Se encontró que el mejor método para el retrocálculo de longitudes del marlin azul fue el alométrico 2, con el que las *RLs* presentaron las diferencias menores respecto a las longitudes observadas. Para los tres niveles de *CTE*, los *PCI* estimados fueron significativamente diferentes, evidenciando un claro efecto del crecimiento alométrico entre la espina de la aleta dorsal y la longitud de los organismos. Del análisis de los *CTE* obtenidos a 2.5 veces la distancia entre las apófisis inferiores, los *PCI* estimados ( $L_{\infty}=354.75$ ,  $k=0.1519$  y  $t_0=-2.45$ ) para hembras de marlin azul indican que son organismos de crecimiento muy acelerado en los primeros años de vida.

## ABSTRACT

Age and individual growth parameters (*IGP*) in billfish, like the blue marlin *Makaira nigricans*, are usually estimated from the cross-sections of the dorsal-fin spines (*CSS*). To reduce bias in the estimations given the predominance of large fish in the catch sampled, we must estimate the previous length-at-age (*BCLs*, back-calculated lengths) under the theoretical assumption of isometric growth between the radius (or diameter) of the *CSS* and the postorbital length (*L*) of the fish. The selection of the spine to be used, the level of the *CSS*, and the *BCLs* are done without regard that the growth between the spine and *L* is allometric and variant given the conical shape of the spine. The aim of our study was to evaluate the effect of allometric growth between spines and *L*, and propose criteria to reduce bias in estimating *BCLs* and the *IGP*. Between January 2005 and December 2006 we sampled 285 blue marlin (all females from 141- to 330-cm *L*) landed by the sport fleet at Cabo San Lucas, BCS, Mexico. During 2005-2006, from each specimen we collected the putative fourth spine ( $n = 174$ ), and in 2007-2009 the first five dorsal fin spines ( $n = 111$ ). Of the five spines of the same fish, we recorded and analyzed different dimensions in the basal zone to assess the allometric growth between spines and *L*. We concluded that the fourth spine is the most suitable for estimating age and *IGP*. Involuntary collection of other spines different from the fourth during 2005-2006 was considered and evaluated using morphometric characteristics in the basal zone of the spines, analyzing using three different statistical methods. Of the 174 spines collected in 2005-2006, the three methods were in agreement to classify as the fourth spine 136 of them, which were then used in subsequent analyses. By not using or mixing other spines in the analyses we avoided inconsistencies and bias in the estimated *IGP*. An iterative geometric analysis was done to find along the spine where the diameter of this structure and *L* could approach isometry, and in that position obtain the *CSS* for estimating the *BCLs* and *IGP*. The level to obtain the *CSS* in the fourth dorsal fin spine was established from the base and along the main axis at 2.5 times the distance between its lower apophyses. Additionally, to statistically compare and evaluate the effect of allometry on the estimation of the *IGP*, another two levels of

CSS of the same spines were used, one at 50 % and another at 100 % of the distance between the lower apophyses. For each of the three section levels we estimated the *BCLs* and the *IGP* of the von Bertalanffy model. To estimate the *BCLs* we used six methods of the literature and two new back-calculation methods here proposed, the allometric 1 and the allometric 2, which are based on the assumption that the growth between the radius of the spine and *L* is allometric. The best method for back-calculation of lengths of blue marlin was the allometric 2. With this method the *BCLs* showed minor differences in comparison with the observed lengths. For the three levels of the *CSS*, the estimates of the *IGP* were significantly different, showing a clear effect of allometric growth between the dorsal fin spine and *L*. Of the analysis of the *CSS* obtained at 2.5 times the distance between lower apophyses, the *IGP* estimated ( $L_{\infty} = 354.75$ ,  $k = 0.1519$  y,  $t_0 = -2.45$ ) for the female blue marlin suggests they are fish of rapid growth in the early years of life.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los términos “picudos” o “peces de pico” han sido ampliamente usados en la pesca comercial y deportiva, así como por científicos para referirse a las especies de las familias Xiphiidae e Istiophoridae, grandes peces que se caracterizan por la prolongación de la mandíbula superior en forma de pico (Nakamura, 1985). Entre ellos se encuentran el marlin azul *Makaira nigricans*, el marlin rayado *Kajikia audax*, el marlin negro *Makaira indica*, el pez espada *Xiphias gladius* y el pez vela *Istiophorus platypterus* (Kume y Joseph, 1969).

Debido a la naturaleza migratoria de estas especies y a su extensa distribución geográfica, son muchos los países que participan en su captura. Aunado a esto, entre la pesca comercial y la deportiva existe un conflicto de intereses en algunos países, como en México, donde la escasez de información biológico-pesquera que sustente la toma de decisiones dificulta la aplicación de medidas para administrar estos recursos (Joseph *et al.*, 1986; Osuna, 1991; Macías, 1993).

La NOM-017-PESC-1994 indica que los picudos son especies destinadas de manera exclusiva a la pesca deportiva dentro de la franja costera de 50 millas náuticas a partir de la línea de costa de México. Con ello se reconoce la importancia de la pesca deportiva por su capacidad para captar divisas, generar empleos, impulsar el desarrollo y por lo tanto contribuir de manera significativa a la economía regional, estatal y nacional (Pérez-Valencia, 2004).

El marlin azul se encuentra distribuido principalmente en aguas tropicales y templadas de los océanos Atlántico, Pacífico e Índico. Nakamura (1985) la reporta como la más tropical de todas las especies de picudos. Su rango latitudinal basado en datos de la pesquería comercial, se extiende en el Océano Atlántico entre los 45° N y los 45° S, pero está ausente en el Mar Mediterráneo, en el Océano Índico se ha reportado hasta los 35° S, en el Océano Pacífico Occidental entre los 45° N y 35° S, y en el Océano Pacífico Oriental entre los 40° N y 25° S (Nakamura, 1985). En

Cabo San Lucas, B.C.S., México, el marlin azul es la segunda especie en importancia en la pesca deportiva-recreativa (Ortega-García *et al.*, 2006).

Algunos científicos han propuesto que el marlin azul del Indo-Pacífico debería ser considerado como una especie diferente (*M. mazara*) al marlin azul (*M. nigricans*) presente en el Océano Atlántico. Sin embargo, mediante estudios genéticos se ha determinado que es una sola especie la que se distribuye en los océanos Atlántico, Pacífico e Índico (Graves y McDowell, 2003). Por otro lado, resultados de experimentos de marcado (Hinton, 2001), análisis de divergencia genética sobre la base de alozimas, ADN mitocondrial y ADN nuclear (Graves y McDowell, 2003), y datos de la pesquería (Kleiber *et al.*, 2003) sugieren que existe sólo un stock de marlin azul en el Océano Pacífico.

Las estimaciones de edad y de los parámetros de crecimiento individual son una parte central de todo trabajo de investigación dirigido hacia la explotación racional de los recursos pesqueros (Beamish y McFarlane, 1983). La tasa promedio de crecimiento individual de un pez en una población es crítica para la evaluación de stocks por métodos basados en datos de edad, además de determinar el nivel de esfuerzo requerido para extraer una producción deseada de todo el stock (Ricker, 1975). Por otra parte, la correcta estimación de los parámetros de crecimiento individual resulta de gran importancia, dado que estos parámetros son empleados en modelos para la evaluación de recursos pesqueros (Aubone y Wöhler, 2000). Así, errores en la estimación de los parámetros de crecimiento pueden llevar a sugerencias erróneas para los administradores pesqueros, concernientes al estado presente y futuro de la población (Schirripa, 2002).

El Comité Científico Internacional para el atún y especies afines en el Océano Pacífico Norte (ISC por sus siglas en inglés) ha especificado que los estudios de edad y crecimiento para el marlin azul del Pacífico son una investigación necesaria y que es un área altamente incierta para propósitos de evaluación del stock (ISC9 Plenary Report, July 15-20, 2009, Kaohsiung, Taiwan; <http://isc.ac.affrc.go.jp/isc9/>



ISC9rep.html). Esto también ha sido señalado para el marlin azul del Atlántico por la Comisión Internacional para la Conservación del Atún del Atlántico (Drew *et al.*, 2006).

Para estimar la edad y los parámetros de crecimiento individual se pueden utilizar diferentes estructuras duras, como escamas y otolitos, donde se realiza el conteo de anillos que representan la edad (Campana, 2001). En los picudos, como el marlin azul, las escamas no son estructuras útiles para estimar edad y sus otolitos son muy pequeños, frágiles y de preparación costosa (Prince *et al.*, 1991), por lo que el uso de las espinas de la aleta dorsal representa una alternativa. Beamish y McFarlane (1987) mostraron la utilidad de estas estructuras para la estimación de edad en los picudos y en otras especies de peces. Para poder usar las espinas de forma rutinaria en estudios de edad y crecimiento, se requiere establecer previamente criterios cualitativos y cuantitativos, relativos a la recolecta de las espinas, preparación de las estructuras, así como de la forma de efectuar el conteo e interpretación de la periodicidad de formación de las marcas, entre otros aspectos (Hill *et al.*, 1989). La importancia de estandarizar los métodos de determinación de edad para el uso de espinas de las aletas de especies altamente migratorias como el marlin azul ha sido enfatizada por Kopf *et al.* (2010), quienes recomiendan el desarrollo de un protocolo estandarizado o código de práctica internacional, de tal forma que se puedan hacer comparaciones entre regiones.

Cuando las estructuras duras crecen en proporción al tamaño del pez, además de poder utilizarse en la estimación de la edad, también se pueden usar para representar el registro de la historia de crecimiento de los peces a través del retrocálculo de longitudes para edades previas (Araya y Cubillos, 2002; Panfili *et al.*, 2002; Weisberg *et al.*, 2010). El método de retrocálculo se basa en el supuesto de que conforme un pez crece en longitud, también existe un incremento en el tamaño de las estructuras duras de su cuerpo (Jobling, 2002). Es decir, el retrocálculo es una técnica en la cual se utilizan las dimensiones de una o más marcas de crecimiento obtenidas de alguna estructura dura del pez, junto con su longitud corporal al

momento de la captura, para estimar la longitud del pez al tiempo de formación de cada una de esas marcas (Ricker, 1975; Smith, 1983; Francis, 1990). El retrocálculo aumenta en gran medida la cantidad de información que puede ser derivada de cada organismo (Smith, 1983). Es un método para incrementar el número de datos de longitud a la edad para ser usados en el ajuste de alguna curva de crecimiento (Shafi y Jasim, 1982; Grudtsev y Korolevich, 1986), especialmente cuando no se dispone de ejemplares jóvenes en la muestra (Powles y Warlem, 1988; Stergiou *et al.*, 1992) o para estimar longitudes a edades que son raramente observadas (Morales, 1984). Pero esencialmente, el retrocálculo es una técnica ampliamente utilizada para estimar la tasa de crecimiento individual de los peces (e.g. Jearld, 1983; Carlander, 1987; Busacker *et al.*, 1990).

Implícitamente, los procedimientos de retrocálculo se basan en la suposición de crecimiento isométrico entre alguna medida del tamaño de la estructura dura utilizada y la longitud del pez (Carlander, 1981). Ese supuesto casi nunca se ha probado adecuadamente, pero en general ha sido justificado sobre la base de correlaciones empíricas entre el tamaño de la estructura dura utilizada (e.g. radio del otolito, de la escama, o del corte transversal de una espina de las aletas) y el tamaño del pez (longitud patrón, longitud furcal o longitud total).

En este trabajo de tesis se aborda el efecto de la alometría en la estimación de los parámetros de crecimiento individual del marlin azul, causado principalmente por el reducido número de individuos de edades tempranas y en consecuencia la necesidad de utilizar el retrocálculo de longitudes.

## **2. ANTECEDENTES**

Las primeras investigaciones sobre edad y crecimiento en picudos se basaron en el análisis de frecuencia de tallas. A partir de estas se sugirió que son organismos de crecimiento rápido y vida corta (De Sylva, 1957; Strasburg, 1970). Sin embargo el análisis de frecuencia de tallas no es adecuado ya que los grupos modales se

traslapan a medida que los ejemplares son más grandes, haciendo difícil la discriminación de modas (Radtke, 1983).

La mayoría de los estudios de estimación de edad en picudos se han llevado a cabo en el Océano Atlántico analizando las marcas de crecimiento que presentan algunas estructuras duras como otolitos, vértebras y espinas de las aletas dorsal y anal. En particular para el marlin azul existen algunos estudios de estimación de edad (e.g. Prince *et al.*, 1984; McGowan *et al.*, 1987; Hill *et al.*, 1989; Cyr *et al.*, 1990; Wilson *et al.*, 1991, Jakes-Cota, 2008), pero son escasos aquellos en los que se reportan parámetros de crecimiento individual (e.g. Skillman y Yong, 1976; Prince *et al.*, 1991; Jakes-Cota, 2008), e inexistentes los que discuten el crecimiento alométrico entre la estructura dura utilizada para determinar la edad y la longitud de los organismos, y su efecto en la estimación de los parámetros de crecimiento individual.

Para el marlin azul capturado en el Océano Atlántico, Prince *et al.* (1984) establecieron una relación lineal entre el radio total de la espina y la longitud de los peces y realizaron estimaciones de edad sobre la base de lecturas de supuestas marcas anuales en otolitos y espinas de la aleta dorsal, reportando organismos de hasta 21 años de edad. En contraste, McGowan *et al.* (1987) estimaron edades de 2 a 10 años usando cortes transversales de espinas de la aleta dorsal de marlin azul de la misma cuenca oceánica.

También para el marlin azul del Atlántico, Prince *et al.* (1991) estimaron los parámetros de crecimiento individual de la ecuación de von Bertalanffy por medio de lecturas de marcas diarias en otolitos de organismos juveniles. Reportaron que son organismos de crecimiento muy acelerado en las primeras etapas de vida, alcanzando cerca del 70 % de la longitud máxima promedio a los 2 años de vida, por lo que sugirieron que es una de las especies de teleósteos con la tasa de crecimiento más alta. Sin embargo, mencionan que las lecturas de marcas diarias en otolitos no son confiables en organismos mayores de 212 cm o 1.4 años de edad, debido a que éstas no son fáciles de distinguir.

Para el marlin azul del Océano Índico, sobre la base del conteo de marcas de crecimiento en otolitos, Cyr *et al.* (1990) reportaron machos y hembras de hasta 24 años de edad.

Para el Océano Pacífico Skillman y Yong (1976) describieron el crecimiento individual del marlin azul mediante el modelo de von Bertalanffy utilizando individuos capturados por la pesquería de palangre hawaiana de 1960 a 1970. Estos autores reportaron que machos y hembras crecieron a la misma tasa hasta los 250 cm de longitud furcal, y que por encima de ésta longitud la tasa de crecimiento en machos declinó mientras que el crecimiento de hembras continuó a una tasa rápida.

Hill *et al.* (1989) recolectaron otolitos, vértebras y espinas de las aletas dorsal y anal de marlin azul capturado en Kona, Hawái, con el propósito de evaluar la facilidad de recolectarlas, su legibilidad, la interpretación de los patrones de crecimiento, y la precisión de los conteos de marcas anuales. Los resultados de su estudio mostraron que cortes del otolito sagita y de las espinas dorsal y anal contienen marcas de crecimiento que supusieron corresponden a eventos anuales. Las vértebras mostraron numerosos y diminutos incrementos, pero no se observaron marcas que pudieran ser interpretadas como anuales. Aunque las pruebas estadísticas revelaron que no hay diferencia significativa entre las edades estimadas utilizando diferentes estructuras duras del mismo pez, los conteos de marcas de crecimiento en espinas dorsales y anales tuvieron la mejor coincidencia.

Wilson *et al.* (1991) realizaron un estudio comparativo entre el marlin azul del Pacífico y el del Atlántico utilizando peces capturados con fines recreativos entre 1979 y 1983. Estos autores registraron la longitud y peso de los individuos, y recolectaron los otolitos. Aunque las edades estimadas del marlin azul del Pacífico y del Atlántico no fueron validadas, los autores reportaron que la longevidad de machos y hembras es similar, llegando a registrar individuos mayores de 20 años de edad, aunque las hembras alcanzaron tallas más grandes que los machos.

Jakes-Cota (2008) estimó los parámetros de crecimiento individual del marlin azul desembarcado por la flota deportiva en Cabo San Lucas, Baja California Sur, México, durante 2005-2006, para el análisis contabilizó y midió marcas de crecimiento en cortes transversales de la cuarta espina de la aleta dorsal. Reportó que todos los organismos muestreados fueron hembras, además, infirió que la formación de marcas de crecimiento tiene periodicidad anual y que la pesca deportiva incidió sobre 7 grupos de edad (1-6 y 8 años). Finalmente reportó que las hembras de marlin azul son organismos de crecimiento muy acelerado en los primeros años de vida, ya que alcanzan el 56 % y 70 % de su longitud máxima promedio a la edad de 2 y 3 años, respectivamente.

### **3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Las estimaciones de edad y parámetros de crecimiento individual del marlin azul y de otras especies de peces de pico usualmente se realizan a través del conteo y medición de marcas de crecimiento en cortes transversales de espinas de la aleta dorsal. Tales cortes se efectúan en una posición que se establece desde la base y sobre el eje principal de la espina a una distancia equivalente a alguna medida de referencia o a una proporción de la misma estructura (e.g. la distancia entre apófisis o un porcentaje constante de la longitud total de la misma espina) (Prince *et al.*, 1984; Hill *et al.*, 1989; Ehrhardt, 1990; Jakes-Cota, 2008). Lo anterior se realiza sin tomar en cuenta que el crecimiento entre las diferentes dimensiones de las espinas es alométrico, de la misma forma que el crecimiento de estas dimensiones es alométrico respecto a longitud de los organismos (ver sección 6.3).

Considerando que: a) existen diferentes niveles de alometría entre la longitud de la espina, la longitud del pez y la medida de referencia seleccionada para establecer la posición de corte; y que b) las espinas del marlin azul longitudinalmente presentan una morfología cónica, *i.e.*, su grosor o diámetro se reduce de la base hacia la punta; se plantea que no son adecuados los criterios hasta ahora utilizados para establecer la posición del corte sobre el eje longitudinal de la espina basados en una distancia

de referencia o en una proporción de la longitud de la espina, y que por consecuencia el radio del corte utilizado en los análisis usualmente difiere del radio que idóneamente debió haberse obtenido. Aparentemente esto conllevaría a errores o sesgos todavía no evaluados en la relación entre el radio de la espina y la longitud del pez, pero que finalmente afecta la estimación de los parámetros que representan el crecimiento individual de la especie.

Es decir, dependiendo del criterio utilizado, se pueden obtener diferentes niveles de corte a lo largo de la espina y de cada nivel se obtendrían cortes con radios diferentes. La relación entre el radio de la espina y la longitud del pez es la base para los procedimientos de retrocálculo (ver sección 6.9), por lo que de cada nivel de corte se obtendrían estimaciones diferentes de longitudes a edades previas y por ende diferentes estimaciones de los parámetros de crecimiento individual. Dada la importancia de utilizar criterios que permitan en mayor medida cumplir los supuestos teóricos para la estimación del crecimiento individual de los peces, en este trabajo de tesis se plantea evaluar el efecto del crecimiento alométrico de las espinas con respecto a la longitud de los peces con el propósito de proponer los criterios que permitan reducir errores y lograr una estimación confiable de los parámetros de crecimiento individual. Como consecuencia de este análisis, surgirá la necesidad de proponer un procedimiento para establecer la posición adecuada del corte en la espina que permita, idóneamente, encontrar una relación isométrica entre el radio de los cortes y la longitud de los peces, para con ello estimar confiablemente las longitudes a edades previas a su captura y paralelamente los parámetros de crecimiento individual.

En los estudios de edad y crecimiento del marlin azul y otras especies de peces de pico, ha sido común recolectar la cuarta espina de la aleta dorsal para obtener los cortes transversales cerca de la base de la espina, donde se realizan el conteo y medición de las marcas de crecimiento que representan la edad, principalmente porque es la espina más gruesa de la aleta dorsal y por ende donde los cortes tendrán mayor diámetro, esperando que resulte relativamente más fácil contar y

medir el espaciamiento entre marcas de crecimiento (e.g. Alvarado-Castillo y Félix-Uraga, 1998; Felizola-Freire *et al.*, 1999; Melo-Barrera *et al.*, 2003; Chiang *et al.*, 2004; Melo-Barrera y Félix-Uraga, 2004; Hoolihan, 2006; Kopf *et al.*, 2010). Esta metodología fue propuesta en décadas pasadas, cuando la tecnología era limitada y sólo se contaba con estereoscopios en los que se adaptaba un micrómetro ocular para hacer mediciones directas sobre los cortes de las espinas. Así, entre más grandes fueran estos cortes, su medición resultaba relativamente más fácil. Actualmente los avances tecnológicos permiten utilizar cámaras digitales de alta resolución adaptadas a estéreomicroscopios que despliegan imágenes directamente sobre un monitor de computadora y se utiliza *software* que permite hacer medidas sobre éstas en cualquier ángulo previa calibración de las mismas, por lo que actualmente no es justificable seleccionar la cuarta espina por ser la más grande del juego de espinas, ni tampoco obtener un corte transversal de la espina donde su radio es mayor.

En este trabajo de investigación inicialmente se evalúa el crecimiento de las dimensiones de cinco espinas (de la 1 a la 5) de la aleta dorsal respecto a la longitud de los peces. Sobre la base de estos resultados se define la espina que presente las dimensiones cuyo crecimiento respecto a la longitud de los organismos sea el más cercano a la isometría y es la espina en la que se continúan los siguientes análisis, por lo que resulta necesario verificar la posición anatómica de las estructuras que fueron recolectadas de tal forma que se pueda utilizar consistentemente la misma estructura, aspecto fundamental para las siguientes etapas de este trabajo, pero que por sí misma plantea una problemática particular que es descrita en párrafos posteriores de esta misma sección. Una vez que la estructura fue seleccionada, se establece el nivel de corte óptimo, donde el crecimiento entre el diámetro de la espina y la longitud de los organismos se aproxima a la isometría. Esos cortes son utilizados para el retrocálculo de longitudes a edades previas y en la estimación de los parámetros de crecimiento individual, resultados que son contrastados con estimaciones obtenidas a partir de otras secciones transversales obtenidas en diferentes niveles de las mismas espinas, incluyendo los niveles de corte

comúnmente utilizados. Finalmente, se evalúa y discute el efecto del crecimiento alométrico en la estimación de los parámetros de crecimiento individual del marlin azul, concluyendo con sugerencias prácticas para implementar en futuros estudios de edad y crecimiento de la especie.

### **3.1 Problemática particular. Verificación de la posición anatómica de las espinas**

Durante los muestreos de las capturas desembarcadas por la flota deportiva de Cabo San Lucas, se detectó que durante los años 2005 y 2006, en los que supuestamente sólo se recolectó la cuarta espina de la aleta dorsal de cada pez, posiblemente existieron errores de identificación de la estructura debido a que en campo es difícil identificar correctamente la posición de las espinas, principalmente por errores en el conteo de las mismas, ya sea por la presencia o no de una espina vestigial (Prince *et al.*, 1984) que pudo o no ser considerada debido al poco tiempo del que se dispone para realizar su extracción y a que la piel y el músculo que cubre las estructuras no permite distinguirlas correctamente. En los muestreos de esos años se tiene la incertidumbre de si algunas de las estructuras recolectadas corresponden a la cuarta o a la quinta espina, que son las que tienen mayor probabilidad de confundirse. Para estos casos se necesitaron aplicar procedimientos estadísticos para discriminarlas sobre la base de sus características morfológicas. Para tal efecto fueron utilizadas las primeras 5 espinas de la aleta dorsal recolectadas del 2007 al 2009, por tenerse la certeza de su posición anatómica.

## **4. HIPÓTESIS**

- Existen diferencias en los parámetros de crecimiento individual estimados a partir del uso de secciones transversales de diferentes niveles de la espina de la aleta dorsal del marlin azul *Makaira nigricans*, debido al crecimiento alométrico entre la espina y la longitud de los organismos.



## 5. OBJETIVOS

### 5.1 Objetivo general:

- Evaluar el efecto de la alometría en la estimación de los parámetros de crecimiento individual como resultado de utilizar el retrocálculo de longitudes en el marlin azul *Makaira nigricans*.

### 5.2 Objetivos específicos:

- Evaluar el crecimiento alométrico de las características morfométricas de las espinas (de la 1 a la 5) de la aleta dorsal del marlin azul respecto a la longitud posorbital de los organismos.
- Verificar la posición anatómica de las espinas de la aleta dorsal del marlin azul recolectadas en 2005-2006.
- Definir el nivel de corte en las espinas de la aleta dorsal del marlin azul donde el crecimiento entre su diámetro y la longitud posorbital de los organismos sea más cercano a la isometría.
- Evaluar estadísticamente los cambios que resultan en la estimación de los parámetros de crecimiento individual del marlin azul acorde con la alometría asociada a los diferentes niveles de corte en las espinas.

## 6. MATERIAL Y MÉTODOS

### 6.1 Muestreo

Como resultado de la operación de diferentes proyectos de investigación realizados por el CICIMAR para el estudio de los peces de pico capturados en la boca del Golfo de California, durante tres días consecutivos de cada mes de los años 2005 a 2009 se muestrearon las especies desembarcadas por la flota deportiva de Cabo San Lucas, B.C.S., México.

De cada ejemplar de marlin azul al que se tuvo acceso durante los desembarcos se registró la longitud posorbital (del límite posterior del ojo a la furca) por medio de una

cinta métrica flexible ( $\pm 1$  cm) y se determinó el sexo por observación directa de las gónadas; es importante señalar que los picos a menudo se rompen, por lo que la longitud posorbital ( $L$ ) es la medida más confiable para representar la longitud del cuerpo. Estos datos se registraron en una bitácora, asignando un número de referencia a cada individuo, además de la fecha y el área de captura.

De las aletas dorsales de cada organismo muestreado en los años 2005 y 2006 se recolectó únicamente la cuarta espina y durante los años 2007 a 2009 se recolectaron las 5 primeras espinas (3 espinas y 2 radios). Para ello, las espinas se extrajeron desde su base con la ayuda de un cuchillo. La primera espina de la aleta dorsal del marlin azul es vestigial y se encuentra cubierta por piel y músculo, la siguiente espina es la primera de la serie de espinas de la aleta dorsal que puede ser vista cerca de la superficie de la piel (Prince *et al.*, 1984). Las espinas recolectadas fueron almacenadas en bolsas de plástico etiquetándolas con los datos de identidad de la muestra, conservándolas congeladas para su limpieza y análisis posterior en el laboratorio.

En los análisis de la evaluación del crecimiento alométrico entre las características morfométricas de las espinas de la aleta dorsal y la longitud de los peces (sección 6.3), así como para la verificación de la posición anatómica de las espinas mediante técnicas de morfometría (sección 6.4), fueron utilizados los paquetes de cinco espinas recolectados en el periodo 2007-2009, porque de ellas se tiene la certeza de su posición anatómica. En el resto de los análisis: establecimiento del nivel de corte (sección 6.5), retrocálculo de longitudes (sección 6.9) y estimación de los parámetros de crecimiento individual (sección 6.10) sólo fueron utilizadas las espinas del periodo 2005-2006 cuya verificación morfométrica correspondió a las características definidas para la cuarta espina, esto último debido a la importancia de utilizar consistentemente la misma estructura para evitar sesgos en las estimaciones. Sin embargo, es importante mencionar, que para la estructura de edades (sección 6.7) se consideraron todas las espinas recolectadas en el periodo 2005-2006, independientemente de que se hubiera incluido involuntariamente la quinta espina de

algún organismo, basándose en que Hill *et al.* (1989) reportaron que el mismo número de marcas de crecimiento es registrado en diferentes estructuras duras del mismo pez.

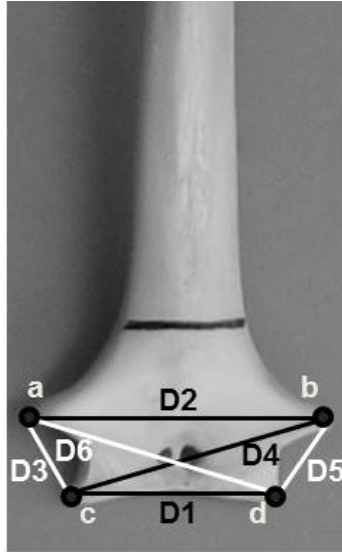
## 6.2 Laboratorio

En el laboratorio las espinas se descongelaron y limpiaron con ayuda de pinzas de disección, bisturí y tijeras, procurando quitar todo el tejido blando residual para evitar una posible descomposición y daño de la estructura. La longitud total de la espina se midió con una cinta métrica flexible desde las apófisis inferiores hasta el extremo superior de la espina.

Para cada una de las cinco estructuras recolectadas durante 2007-2009 fueron escogidas cuatro marcas anatómicas de referencia (landmarks), situadas en la base de las mismas (Fig. 1, a-d). Las distancias entre esas landmarks fueron medidas con un vernier de precisión de 0.05 mm siguiendo el protocolo Truss Network (Strauss y Bookstein, 1982). Este protocolo hace uso de mediciones cruzadas entre landmarks para lograr una mejor cobertura de la forma y discriminación entre grupos (Fig. 1, D1-D6; Tabla I). Esta información, además de utilizarse para verificar la posición anatómica de las espinas mediante técnicas de morfometría (sección 6.4), también es utilizada para analizar el crecimiento alométrico entre las dimensiones de las diferentes espinas y la longitud de los peces (sección 6.3).

**Tabla I.** Relación de distancias entre las landmarks en las espinas de la aleta dorsal de marlin azul *Makaira nigricans*.

Distancia	Descripción
D1	Distancia entre las apófisis inferiores de la espina
D2	Distancia entre las apófisis superiores de la espina
D3	Distancia de la apófisis inferior izquierda a la apófisis superior izquierda
D4	Distancia de la apófisis inferior izquierda a la apófisis superior derecha
D5	Distancia de la apófisis inferior derecha a la apófisis superior derecha
D6	Distancia de la apófisis inferior derecha a la apófisis superior izquierda



**Figura 1.** Representación esquemática de la ubicación de las landmarks (letras a-d) y las distancias entre ellas (D1-D6) en las espinas de la aleta dorsal de marlin azul *Makaira nigricans*. Las distancias entre las landmarks son descritas en la tabla I.

### **6.3 Evaluación del crecimiento alométrico entre las dimensiones de las espinas de la aleta dorsal y la longitud posorbital de los peces**

Como ya se señaló anteriormente en la sección 3 de este trabajo, en los estudios de edad y crecimiento del marlin azul y otras especies de peces de pico, ha sido común recolectar la cuarta espina de la aleta dorsal porque es la espina más gruesa y usualmente se utiliza D1 o D2 para situar sobre la espina la posición de donde se obtendrá la sección transversal en la que se realizan las lecturas y mediciones de los anillos de crecimiento, ambos criterios sin evaluar el crecimiento alométrico de las diferentes dimensiones de las espinas respecto a la longitud de los peces.

En este trabajo, se analizaron los coeficientes de alometría ( $f$ ) que resultaron de la relación alométrica entre las diferentes distancias de la base de cada una (Fig. 1, Tabla I) de las cinco espinas recolectadas en el periodo 2007- 2009 y la longitud posorbital de los organismos mediante el siguiente modelo:

$$L = u * D_{ij}^f$$

donde:

$L$  = Longitud posorbital del pez (cm)

$D_{ij}$  = Distancia  $i$  ( $i = D1-D6$ , ver tabla I) de la base de la espina  $j$  ( $j = 1$  a  $5$ ) (cm)

$u$  = Constante

$f$  = Coeficiente de alometría (isometría cuando  $f \rightarrow 1$ )

De esta forma se obtuvieron 6 coeficientes de alometría (uno por cada distancia: D1-D6) para cada una de las 5 espinas de la aleta dorsal de marlin azul.

Para evaluar si los coeficientes de alometría ( $f$ ) obtenidos para cada una de las 5 espinas fueron significativamente diferentes de 1, se aplicó la prueba  $t$  de Student (Zar, 2010), utilizando el siguiente estadístico:

$$t = \frac{f - f'}{S_f}$$

donde:

$t$  =  $t$  de Student

$f$  = Pendiente estimada (coeficiente de alometría)

$f'$  = Pendiente de referencia (=1)

$S$  = Error estándar de la estimación

Las hipótesis a probar fueron:  $H_0$ : el coeficiente de alometría ( $f$ ) es igual a 1, y  $H_a$ : el coeficiente de alometría ( $f$ ) es diferente de 1.

El valor de probabilidad ( $p$ ) se obtuvo mediante una calculadora de distribución de  $t$  con un nivel de significación de 0.05 y  $n-2$  grados de libertad, donde  $n$  es el número de observaciones en la muestra. La hipótesis nula se rechazó cuando  $p$  fue menor que el nivel de significación.

Considerando que: i) las distancias D1 o D2 son comúnmente utilizadas como referencia en estudios de edad en peces, ii) que en este trabajo utilizamos a D1 en

diferentes secciones de la metodología, los resultados y la discusión, y iii) que como resultado de los análisis que se establecen en esta sección, otra distancia de la zona basal de las espinas diferente a D1 pudiera tener una relación con  $L$  más cercana a la isometría y por ende que se sugiera como medida de referencia para posicionar el nivel para realizar los cortes transversales en las espinas, fueron establecidas dos relaciones lineales para convertir cualquier de las otras distancias de la zona basal (D2 – D6) a la distancia D1 y viceversa a través los siguientes modelos lineales:

$$Dn = a + bD1$$

$$D1 = a + bDn$$

donde:

$Dn$  = Cualquier de las otras distancias (D2-D6) de la zona basal de la espinas sugerida para posicionar el nivel de corte transversal de las espinas (cm)

$a$  = Intercepto

$b$  = Pendiente

#### **6.4 Verificación de la posición anatómica de la espina recolectada**

Para discriminar a las espinas, sus características morfológicas fueron analizadas usando tres métodos diferentes con el propósito de evaluar su efectividad. De manera general, para construir los modelos predictivos o funciones de clasificación de cada método, las características morfológicas de la cuarta y quinta espinas recolectadas en el periodo 2007-2009 (Fig. 1, Tabla I) fueron utilizadas como datos de entrada, porque de ellas se tiene la certeza de su posición anatómica, y porque son las estructuras con mayor probabilidad de confundirse durante la recolecta. Cuando los métodos requirieron un grupo de referencia o grupo externo, la primera espina también fue incluida. Después de evaluar el desempeño de los modelos con base en la reclasificación de las espinas del periodo 2007-2009 dentro de grupos conocidos (espina cuarta o quinta), la posición de las espinas del 2005-2006 fue verificada.

#### 6.4.1 Morfometría tradicional (MT)

Para discriminar a las espinas utilizando este método, fue necesario hacerlo sobre la base de medidas morfométricas “libres de la talla” o “invariantes en talla” (Humphries *et al.*, 1981). Sólo después de corregir las medidas morfométricas del efecto debido a las diferencias en talla se pueden aplicar técnicas de discriminación como el análisis de discriminación lineal (Dos Reis *et al.*, 1990). Esta corrección fue realizada mediante la regresión lineal de cada distancia de la espina (Tabla I) respecto al primer componente principal (Strauss, 1985). Los residuales resultantes expresan la variación debida principalmente a la forma de las estructuras y son utilizados como variables de forma independientes de la talla. Los pasos detallados de esta corrección se presentan en el Anexo 11.1 y su implementación en el lenguaje de programación R (R Core Team, 2013) en el Anexo 11.2.

Para estimar la combinación lineal de variables morfométricas que discriminara mejor a las espinas, fue realizado un análisis de discriminación lineal (LDA, por la siglas en inglés Linear Discriminant Analysis) (Strauss, 2010), para lo cual fueron utilizados los residuales libres del efecto de la talla calculados para las espinas 4 y 5 del periodo 2007-2009, incluyendo los datos de la primera espina de los mismos peces como grupo de referencia o grupo externo (Tabla I). Durante el análisis la distancia D3 fue eliminada debido a que tenía una correlación alta con la distancia D5 (colinealidad), lo que producía una matriz singular e impedía que el análisis fuera realizado.

Para evaluar si la discriminación entre espinas fue estadísticamente significativa, se calculó la lambda de Wilks ( $\lambda$ ), la cual mide el grado en que difieren los grupos en la posición de sus centroides (Strauss, 1990). Es una medida directa de la proporción de la varianza total en las variables que no es explicada por el agrupamiento de los organismos. Si  $\lambda$  es pequeña, entonces una gran proporción de la varianza total es explicada por el agrupamiento (Strauss, 1990). Esta puede tomar valores entre cero y uno, donde los valores cercanos a cero denotan una alta discriminación, es decir, los centroides están ampliamente separados (Klecka, 1980).

Por último, para reclasificar las espinas recolectadas en 2007-2009 y verificar la posición anatómica de la única espina recolectada por pez durante 2005-2006, fue utilizada la función predictiva o función de clasificación derivada del LDA. Esta función de clasificación calcula la distancia de Mahalanobis de cada una de las espinas de “posición desconocida” al centroide de cada “grupo conocido”, asignándola al grupo más cercano (Hand, 1981; Strauss, 2010).

#### **6.4.2 Morfometría geométrica (MG)**

Para aplicar este método se requiere como datos de entrada las coordenadas cartesianas de las landmarks consideradas, en este caso aquellas ubicadas en la base de las espinas. La posición de las landmarks fue reconstruida a partir de las distancias medidas entre ellas (Fig. 1), siguiendo la propuesta de Carpenter *et al.* (1996) implementada en el lenguaje de programación R por Claude (2008). Esta reconstrucción fue hecha debido a la imposibilidad de digitalizar directamente las coordenadas dado que la base de las espinas fue destruida al obtener cortes a diferentes niveles de las mismas que fueron utilizados en estudios preliminares de edad, dado que inicialmente no se tenía contemplado llevar a cabo este análisis.

Se realizó una superposición de las coordenadas de las cuatro landmarks mediante un análisis generalizado procrustes (Rohlf y Slice, 1990) con el programa CoordGen (Sheets, 2011a), el cual produce una matriz con las variables de conformación (Pw, partial warps) y el tamaño del centroide (CS). A su vez, esta matriz fue utilizada para llevar a cabo un análisis de variables canónicas (CVA, por sus siglas en inglés Canonical Variates Analysis) con el programa CVAGen (Sheets, 2011b). Para evaluar la discriminación entre espinas a partir del CVA, la reclasificación de las espinas de posición conocida del 2007-2009 fue evaluada empleando un MANOVA. Al igual que en el LDA, en el CVA sólo se usaron los datos de la primera, cuarta y quinta espinas del periodo 2007-2009.



Finalmente, a partir del CVA se verificó la posición anatómica de la única espina recolectada por pez del periodo 2005-2006 a través de su clasificación en grupos conocidos (espina cuarta o quinta).

#### **6.4.3 Método de partición recursiva (PR)**

Para crear una clave práctica y sencilla que ayude a verificar la posición anatómica de las espinas recolectadas de la aleta dorsal, fue utilizado el algoritmo *partitioning Deletion/Substitution/Addition*, el cual es capaz de manejar variables y salidas (resultados) categóricas y continuas (Molinero *et al.*, 2010). Este algoritmo está implementado y disponible como paquete (partDSA, Molinero *et al.*, 2009) del lenguaje de programación R.

El desempeño relativo de este método fue evaluado a través de cuatro análisis diferentes de los datos obtenidos de la cuarta y quinta espinas recolectadas en 2007-2009 (Fig. 1, Tabla I). En el primero se utilizaron las distancias originales, en el segundo y el tercero se utilizaron áreas que representan la zona basal de las espinas como formas geométricas planas, las cuales fueron calculadas utilizando diferentes combinaciones de las distancias originales, y en el cuarto análisis se utilizaron proporciones o fracciones que resultan de la división de diferentes combinaciones de las distancias originales. Los cuatro diferentes análisis se indican en la tabla II.

El algoritmo partDSA divide el espacio covariado en diferentes particiones y selecciona el mejor modelo predictivo empleando validación cruzada (Molinero *et al.*, 2010). El modelo seleccionado para clasificar a las espinas, es decir, el modelo con mejor número de particiones, fue el que obtuvo el valor mínimo de error de validación cruzada + 1 error estándar de validación cruzada (regla 1+SE, sugerida por Breiman *et al.*, 1984), el cual corresponde al error de clasificación para cada una de las posibles particiones (Molinero *et al.*, 2010).

A partir del modelo seleccionado se derivó una clave de clasificación y fue utilizada para reclasificar a las espinas recolectadas en 2007-2009, así como para verificar la posición de las espinas recolectadas en 2005-2006.

**Tabla II.** Análisis de datos usados para clasificar a las espinas de la aleta dorsal del marlin azul *Makaira nigricans* a través del algoritmo partDSA.

Análisis de datos	Descripción de las variables	Combinación de datos
1	Distancias originales. Seis medidas lineales para cada estructura.	D1, D2, D3, D4, D5, D6
2	La zona basal de la espina es representada por medio de un rectángulo donde su área fue estimada multiplicando dos distancias originales. Cuatro áreas diferentes fueron calculadas para cada estructura.	D1*D3, D1*D5, D2*D3, D2*D5
3	La zona basal de la espina es representada por medio de un triángulo donde su área fue estimada utilizando tres distancias originales y procedimientos geométricos. Cuatro áreas diferentes fueron calculadas para cada estructura.	D1-D4-D5, D1-D3-D4, D2-D3-D4, D2-D5-D6
4	Proporciones entre dos distancias originales de la zona basal de la espina. Diez diferentes proporciones fueron calculadas para cada estructura.	D1/D2, D1/D3, D1/D4, D1/D5, D1/D6, D2/D1, D2/D3, D2/D4, D2/D5, D2/D6

#### 6.4.4 Evaluación de la concordancia entre métodos

Para determinar el grado de concordancia entre los tres métodos utilizados (MT, MG y PR) para clasificar a la misma estructura como espina cuatro o cinco, se estimó el coeficiente de variación (CV) y se multiplicó x 100 para expresarlo como porcentaje. El CV se define como:

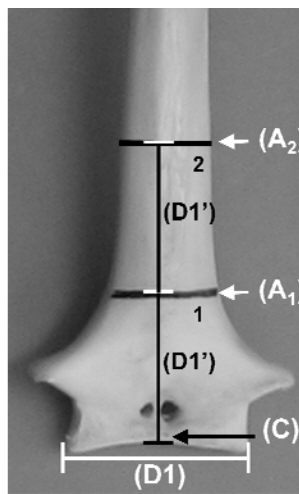
$$CV_j = 100 * \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^R \frac{(X_{ij} - \bar{X}_j)^2}{R - 1}}}{\bar{X}_j}$$

donde  $CV_j$  es el coeficiente de variación estimado para la espina del  $j$ -ésimo pez,  $X_{ij}$  es la  $i$ -ésima clasificación morfológica como espina cuatro o cinco del  $j$ -ésimo pez,  $\bar{X}_j$  es la clasificación morfológica promedio de la espina del  $j$ -ésimo pez, y  $R$  es el número de veces que cada estructura se clasificó.

Para producir un CV promedio para todos los peces incluidos en este estudio ( $CV_{2005-2009}$ ), se obtuvo el promedio entre  $CV_j$  individuales (Zar, 2010). Si el coeficiente de variación es pequeño indica concordancia entre métodos para clasificar de la misma forma a la misma estructura (repetibilidad). Esta evaluación fue realizada para la única espina recolectada por pez en el periodo 2005-2006 ( $n=174$ ) y para las espinas identificadas como cuarta que fueron recolectadas en el periodo 2007-2009 ( $n=111$ ).

### 6.5 Establecimiento del nivel de corte

La distancia entre las apófisis inferiores de la espina (Tabla I, D1) fue utilizada como referencia para marcar  $n$  número de veces, desde la base y sobre el eje principal, posibles niveles de donde obtener secciones transversales de la cuarta espina que pudieran ser utilizados en los análisis de edad y crecimiento (Fig. 2). Estas marcas fueron identificadas sobre la cara frontal de la espina, registrándose el diámetro correspondiente de cada una de ellas.



**Figura 2.** Vista frontal de una espina de la aleta dorsal del marlin azul *Makaira nigricans* mostrando marcas a diferentes niveles ( $A_1, A_2... A_n$ ) de donde se obtuvieron los diámetros correspondientes. Se ejemplifica que las sucesivas distancias  $D1'$  iniciaron desde la base de la espina (C), y fueron establecidas utilizando la distancia entre las apófisis inferiores ( $D1$ ) como unidad de referencia.

Posteriormente se procedió a analizar en cuál de ellas la pendiente o coeficiente de alometría ( $f$ ) de la relación alométrica entre el diámetro de la espina y la longitud

posorbital de los peces fue más cercano a 1 ( $f \rightarrow 1$ ). Es decir, se escogió como nivel de corte aquella distancia donde el crecimiento entre el diámetro de la espina y la longitud de los peces se aproximó más a la isometría.

Se obtuvieron tantas relaciones como número de niveles o marcas fue posible hacer compatibles sobre la cuarta espina de los organismos muestreados en el periodo 2005-2006. También se incluyeron en el análisis los diámetros de las marcas al 50 % de la distancia D1. Para estimar los coeficientes que definen la relación alométrica entre los diámetros en una misma posición sobre la cuarta espina y la longitud posorbital de los organismos ( $L$ ), fue utilizado el modelo alométrico:

$$L = u * A_i^f$$

donde:

$L$  = Longitud posorbital del pez (cm)

$A_i$  = Diámetro de la espina en la posición de la marca  $i$  ( $i = 1$  a  $n$ ) (cm)

$u$  = Constante

$f$  = Coeficiente de alometría

Del grupo de modelos obtenidos, uno para cada marca en la misma posición a lo largo de la cuarta espina, fueron seleccionados los dos niveles cuyos coeficientes  $f$  fueron los más cercanos a representar el crecimiento isométrico y entre los cuales pudiera estar contenido el nivel de corte donde teóricamente pudiera cumplirse la condición de isometría. Entre esas dos marcas seleccionadas un nuevo nivel de corte fue calculado geoméricamente mediante la simulación iterativa de las dimensiones de trapecios isósceles. En este caso, la amplitud inicial de las bases paralelas de los trapecios correspondió a los diámetros de las dos marcas seleccionadas. La amplitud de las bases superiores fue incrementada progresivamente hacia el valor de las bases inferiores hasta que el valor de esas distancias con relación a la longitud de los peces permitió estimar un coeficiente  $f$  cercano a 1.

Adicionalmente, para comparar y evaluar estadísticamente el efecto de la alometría producido al utilizar diferentes niveles de corte en la estimación de los parámetros de crecimiento individual del marlin azul, fueron definidos otros dos niveles de corte sobre las mismas espinas, uno al 50 % y otro al 100 % de la distancia entre las apófisis inferiores (D1).

## **6.6 Elaboración de cortes transversales**

Mediante los procedimientos indicados en la sección anterior, se establecieron tres diferentes niveles de corte sobre la cuarta espina de los peces muestreados en el periodo 2005-2006. De estos niveles se obtuvieron secciones transversales de un grosor de 0.45 mm utilizando una cortadora de baja velocidad (marca Buehler, modelo 11-1280-160) equipada de un disco con filo de diamante (Diamond Wafering Blade, serie 15HC). Las tres secciones obtenidas de cada una de las espinas fueron fotografiadas con una cámara digital (marca Carl Zeiss, modelo AxioCam MRc 5) adaptada a un estereomicroscopio (marca Carl Zeiss, modelo Stemi SV11) que despliega las imágenes directamente sobre el monitor de una computadora. Para cada imagen se registraron como variables ópticas el nivel de aumento del estereomicroscopio y el objetivo utilizados. Las variables ópticas fueron utilizadas para la calibración métrica de la imagen en computadora mediante el uso del software AxioVision (versión 4.6), lo que permitió poder realizar en ellas medidas confiables en cualquier ángulo.

## **6.7 Conteo de marcas de crecimiento y estructura por edades**

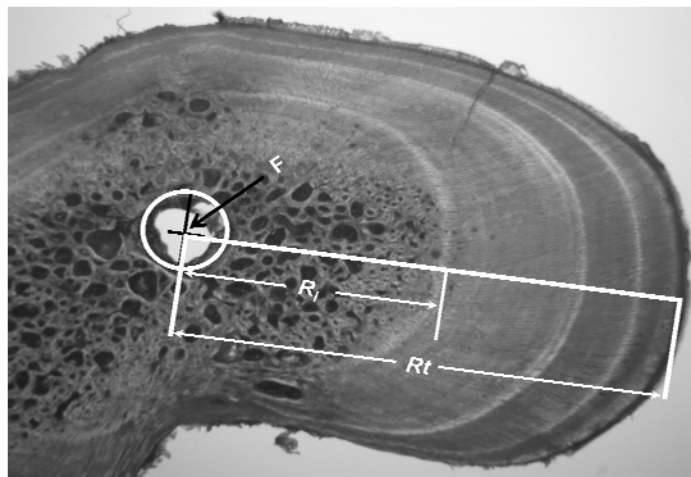
Las marcas de crecimiento contenidas en los cortes transversales de las espinas de los años 2005 y 2006 ( $n = 174$ ) fueron contadas de manera independiente por dos lectores. Para este propósito cada grupo de edad estuvo compuesto por el conjunto de una banda opaca seguida por otra hialina. Los conteos se realizaron directamente sobre las fotografías de los cortes para evitar la manipulación continua y la posible ruptura de los mismos dada su fragilidad. Para evaluar la consistencia o concordancia entre los conteos efectuados independientemente por cada lector se calculó el coeficiente de variación promedio (Campana, 2001) descrito previamente

en la sección 6.4.4. En los ejemplares donde los conteos entre lectores no coincidieron, se realizó una nueva lectura de manera conjunta y sólo en el caso en que el desacuerdo persistió el ejemplar se excluyó de los análisis posteriores.

Para conocer la estructura por edades que componen las capturas de marlin azul desembarcadas en el puerto de Cabo San Lucas se estimó la frecuencia de aparición de los individuos por cada grupo de edad de manera anual y total para el periodo de estudio, representando la estructura mediante el uso de histogramas. Para determinar si había diferencia en la composición por edades entre los años 2005 y 2006 se aplicó una prueba de  $\chi^2$ .

### 6.8 Mediciones

Con el propósito de analizar la relación entre el radio de los diferentes cortes de las espinas de la aleta dorsal y la longitud posorbital del pez, se midió el radio total y los radios parciales a cada una de las marcas de crecimiento contenidas en cada corte. Los radios (parciales y total) se midieron a partir del centro del foco y hacia el borde de cada corte sobre una misma línea. El centro del foco se estableció en el punto medio de su diámetro mayor como se ilustra en la figura 3. Con esta información se procedió al retrocálculo de longitudes cuya metodología se describe en la sección 6.9.



**Figura 3.** Corte transversal de una espina de la aleta dorsal de marlin azul *Makaira nigricans* en donde se ejemplifica la medición de un radio parcial ( $R_i$ ) y el total ( $R_t$ ) a partir del centro del foco (F).

## 6.9 Retrocálculo de longitudes

Con la finalidad de homogenizar los términos en esta sección, se utiliza la siguiente nomenclatura:

- $L$ : Longitud posorbital del pez (uso general)
- $L_c$ : Longitud posorbital del pez al momento de la captura
- $L_i$ : Longitud posorbital del pez al momento de formación de la marca  $i$ .
- $R$ : Radio de la espina (uso genérico)
- $R_i$ : Radio total de la espina al momento de la captura
- $R_i$ : Radio de la espina al momento de formación de la marca  $i$ .
- $a$  y  $b$ : Intercepto y pendiente de la relación lineal de  $R$  como variable dependiente de  $L$  ( $R$  respecto a  $L$ ).
- $c$  y  $d$ : Intercepto y pendiente de la relación lineal de  $L$  como variable dependiente de  $R$  ( $L$  respecto a  $R$ ).

La relación entre el radio de la estructura dura y la longitud del pez (de aquí en adelante abreviada como relación  $L - R$ ) es una parte central del retrocálculo. Esta relación se obtiene a partir de ajustar una relación al conjunto de observaciones entre el tamaño de la estructura dura y el tamaño del pez al momento de la captura, y los coeficientes obtenidos son utilizados en los retrocálculos subsecuentes. Las dos funciones que describen esta relación pueden ser denotadas como  $f$  y  $g$ . Donde para la primera función,  $f(L)$  es el radio promedio de la estructura dura para un pez de longitud  $L$ , y en la segunda función  $g(R)$  es la longitud corporal promedio de un pez con una estructura dura de radio  $R$ . Estas funciones pueden ser de cualquier forma matemática (lineal, cuadrática, exponencial, etc.); en su forma más común (lineal) se pueden escribir como:

$$f(L) = a + bL$$

$$g(R) = c + dR$$

donde como se indicó anteriormente  $a$ ,  $b$ ,  $c$  y  $d$  son *parámetros de regresión*.

De forma individual para cada nivel de corte seleccionado, los coeficientes en los que se basan los métodos de retrocálculo se obtuvieron de las relaciones lineales entre la longitud del pez y el radio de la espina:  $R$  respecto a  $L$  ( $R = a + bL$ ) y  $L$  respecto a  $R$  ( $L = c + dR$ ) utilizando la longitud de los peces ( $L_c$ ) y el radio total de las espinas ( $R_t$ ) al momento de la captura.

Para evaluar si las pendientes de las relaciones entre los radios de cada uno de los 3 niveles de corte y la longitud posorbital de los organismos ( $R = a + bL$ ,  $L = c + dR$ ,  $L = uR^f$ ) fueron significativamente diferentes, se aplicó la prueba  $t$  de Student para pendientes (Zar, 2010), utilizando el siguiente estadístico:

$$t = \frac{p1 - p2}{S_{p1-p2}}$$

donde:

$t = t$  de Student

$p1$  y  $p2$  = Pendientes de las rectas

$S_{p1-p2}$  = Error estándar de la diferencia entre los coeficientes de la relación

Las hipótesis a probar fueron:  $H_0$ : las pendientes son iguales, y  $H_a$ : las pendientes son diferentes.

A partir de las longitudes observadas al momento de la captura ( $L_c$ ), radio total de las espinas al momento de la captura ( $R_t$ ), radios parciales ( $R_i$ ) a cada una de las marcas de crecimiento contenidas en cada corte y los coeficientes de las regresiones lineales estimados previamente, se estimaron longitudes a edades anteriores a la captura de manera independiente para cada nivel de corte mediante los métodos de retrocálculo: regresión, Dahl-Lea, Fraser-Lee, Hile (SPH), Whitney y Carlander (BPH) e intercepto biológico. Cada uno de los métodos se describe posteriormente en la sección 6.9.1. Los valores de  $L_0$  y  $R_0$  que requiere el método del intercepto biológico se obtuvieron de las medidas de una larva de marlin azul reportada por Ueyanagi y Yabe (1959).



Es importante volver a señalar que los coeficientes de las diferentes relaciones entre el radio de las espinas y la longitud posorbital de los peces, el retrocálculo de longitudes y los parámetros de crecimiento individual fueron estimados a partir de las espinas recolectadas en 2005-2006 cuya identidad o posición anatómica como cuarta espina fue verificada sobre la base de sus características morfométricas ( $n = 136$ ).

### **6.9.1 Métodos de retrocálculo**

Los modelos de retrocálculo se basan en tres supuestos básicos: 1) proporcionalidad de crecimiento entre alguna medida del tamaño de la estructura utilizada para estimar la edad y la longitud de los peces, 2) las marcas de crecimiento registradas en las estructuras duras se forman con una periodicidad de tiempo conocida (e.g. anual) y 3) las marcas de crecimiento, una vez formadas, no cambian sus dimensiones (no aumentan ni disminuyen su radio o diámetro). A continuación se describen los métodos de retrocálculo utilizados en este trabajo.

#### **- Método de regresión:**

Este método consiste en estimar la longitud para cada edad ingresando el radio a cada marca de crecimiento ( $R_i$ ) directamente en la relación  $L - R$  derivada de muestras de la población, es decir, no se utiliza una función de retrocálculo (Araya y Cubillos, 2002). En este procedimiento, al que Carlander (1981) llamó el método de regresión, la fórmula de retrocálculo es simplemente:

$$L_i = c + dR_i$$

#### **- Método de Dahl-Lea**

Este método se basa en el supuesto de que cuando la relación  $L - R$  es lineal con intercepto en el origen, el crecimiento de la estructura dura es directamente proporcional al crecimiento del cuerpo del pez (crecimiento isométrico) (Lea, 1910), el cual tiene la siguiente fórmula:

$$L_i = \frac{R_i}{R_t} L_c$$

- Método de Fraser-Lee

Lee (1920) examinó gráficas de  $L$  respecto a  $R$  para cierto número de especies de peces y concluyó que una línea recta trazada a través de las observaciones ( $R_t, L_c$ ) no pasa a través del origen, como lo indica la hipótesis de Lea (1910). Por lo que propuso una hipótesis nueva: la relación  $L - R$  es lineal pero tiene un intercepto diferente al origen, por lo que el crecimiento de la estructura dura se da, en promedio, a una proporción constante del crecimiento del pez. La fórmula de retrocálculo es:

$$L_i = c + (L_c - c) \left( \frac{R_i}{R_t} \right)$$

La cual es conocida como la ecuación de Fraser-Lee, dado que Fraser (1916) describió primero la fórmula pero Lee (1920) fue la primera en presentar la ecuación explícitamente (Francis, 1990). Este método de Fraser-Lee ha sido uno de los más ampliamente utilizados para el retrocálculo de longitudes (Carlander, 1981; Campana, 1990; Francis, 1990).

- Método de Hile (SPH)

Hile (1941) propuso una hipótesis de retrocálculo que no requiere que la relación  $L - R$  sea lineal o, de hecho, que tome una forma en particular. Su supuesto fue: "el porcentaje o desviación relativa del radio de cualquier estructura dura del radio teórico es constante al tiempo de formación de todos los anillos. Cuando se ajusta una relación lineal de  $R$  respecto a  $L$ , resulta en la fórmula de retrocálculo:

$$L_i = - \left( \frac{a}{b} \right) + \left( L_c + \frac{a}{b} \right) \left( \frac{R_i}{R_t} \right)$$

Alternativamente, si se utiliza la relación lineal de  $L$  respecto a  $R$ , la ecuación de retrocálculo es idéntica a la de Fraser-Lee (Francis, 1990).

- Método de Whitney y Carlander (BPH)

Al parecer Whitney y Carlander (1956) fueron los primeros en reconocer que hay dos hipótesis concernientes al retrocálculo que suponen una desviación proporcional constante del tamaño de la estructura dura o del cuerpo del pez. La primera hipótesis, la que Francis (1990) denomina “proporcionalidad del tamaño de la estructura dura” (SPH, por las siglas en inglés *Scale-Proportional Hypothesis*) dice: si la estructura dura de un pez es 10 % más grande que el promedio de la estructura dura para un pez de ese mismo tamaño, la estructura dura debería ser 10 % más grande que el promedio a través de toda su vida. La segunda hipótesis, llamada “proporcionalidad del tamaño del cuerpo” (BPH, por las siglas en inglés *Body-Proportional Hypothesis*) indica: si un pez al momento de la captura con determinado tamaño de estructura dura es 10 % más pequeño que la longitud promedio del pez con el mismo tamaño de estructura dura, el pez debería ser 10 % más pequeño que la longitud promedio a través de toda su vida.

Cuando la relación  $L - R$  es lineal, la función de retrocálculo para la SPH es igual a la de Hile, por lo que se le atribuye a ese autor (Francis, 1990; Pierce *et al.*, 1996).

Sin embargo, la BPH es nueva. Su ecuación es:

$$L_i = \left[ \frac{(c + dR_i)}{(c + dR_t)} \right] L_c$$

- Método del intercepto biológico

Bajo la suposición de crecimiento isométrico entre la longitud del pez y la estructura dura, el procedimiento de retrocálculo de Fraser-Lee calcula efectivamente una pendiente separada para cada pez usando el intercepto ( $c$ ) de la relación basada en la población como punto de partida. Por definición, este punto de partida corresponde

a la longitud del pez a la cual la longitud de la estructura dura es igual a cero. Dando un valor apropiado para el intercepto de la relación, el método de Fraser-Lee puede predecir correctamente las longitudes medias retrocalculadas. Esta propiedad sugiere que el método de Fraser-Lee es un punto de partida apropiado para el desarrollo de un nuevo procedimiento de retrocálculo, requiriendo sólo una mejor definición del intercepto (Campana, 1990).

El método del intercepto biológico como una modificación del procedimiento de retrocálculo de Fraser-Lee propuesto por Campana (1990), puede ser formulado como:

$$L_i = L_c + (L_c - L_0) \left( \frac{R_i - R_t}{R_t - R_0} \right)$$

donde  $L_0$  y  $R_0$ , son el intercepto biológico del pez y de la estructura dura, respectivamente.

- Nueva aproximación (método alométrico)

En este trabajo se considera adecuado utilizar la relación alométrica en los procedimientos de retrocálculo, ya que el coeficiente de alometría ( $f$ ) nos indicará si el crecimiento entre el radio de la espina y la longitud del pez es isométrico o alométrico, y se propone que este coeficiente puede ser utilizado como un factor de corrección en los métodos de retrocálculo utilizados comúnmente.

El valor de  $f$  depende de cuales medidas sean empleadas. Cuando se utilizan o relacionan dos medidas unidimensionales, una indicando el tamaño de la espina y otra indicando el tamaño del pez (e.g. radio de la espina y longitud posorbital del pez), un valor de  $f$  cercano o igual a 1 indica crecimiento isométrico. Esto implicaría que la tasa relativa de crecimiento es similar en las dos dimensiones utilizadas. Un valor de  $f$  menor a 1 (crecimiento alométrico negativo) indica que el crecimiento de la espina es relativamente más rápido que la otra dimensión del pez.

En este trabajo se plantea el supuesto de que el crecimiento entre el radio de la espina y la longitud del pez es alométrico y se plantean también otros dos nuevos métodos de retrocálculo que se basan en ese supuesto. En estos dos métodos se utiliza el coeficiente  $f$  estimado a través de la relación alométrica en las siguientes ecuaciones:

$$L_i = L_c - (L_c * f) \left( \frac{R_t - R_i}{R_t} \right)$$

$$L_i = L_c - (L_c * f) \left( \frac{R_t - R_i}{R_t} f \right)$$

En la primera ecuación, denominada **método alométrico 1**, se introduce la corrección del crecimiento alométrico ( $f$ ) sobre la longitud al momento de la captura ( $L_c$ ), en tanto que en la segunda ecuación, denominada **método alométrico 2**, se introduce la corrección del crecimiento alométrico ( $f$ ) tanto en la longitud al momento de la captura ( $L_c$ ) como en el término  $\frac{R_t - R_i}{R_t}$ , el cual calcula el crecimiento relativo del radio de la espina a la marca de la edad  $i$ .

La descripción detalla de los métodos de retrocálculos utilizados en este trabajo se puede consultar en Jakes-Cota (2010).

### 6.9.2 Selección del método de retrocálculo

Para seleccionar uno de los ocho métodos de retrocálculo antes descritos en la sección 6.9.1, para cada grupo de edad, las longitudes observadas promedio fueron comparadas contra las longitudes retrocalculadas a través de cada uno de los métodos de retrocálculo. El método que presentó las diferencias menores entre las longitudes retrocalculadas respecto a las longitudes observadas fue seleccionado para estimar los parámetros de crecimiento individual (ver siguiente sección).

## 6.10 Crecimiento individual

Para estimar y representar el crecimiento individual en longitud del marlin azul se utilizó el modelo de von Bertalanffy, modelo matemático que ha demostrado representar adecuadamente el crecimiento observado en la mayoría de las especies de peces y cuyos parámetros pueden interpretarse biológicamente; además, es ampliamente utilizado por una gran cantidad de autores, por lo que facilita la comparación de resultados con otros estudios (Sparre y Venema, 1997). La expresión matemática del modelo es la siguiente:

$$L_t = L_\infty [1 - e^{-k(t-t_0)}]$$

donde:

$L_t$  = Longitud a la edad  $t$  (posorbital en cm)

$L_\infty$  = Longitud máxima promedio (posorbital en cm)

$k$  = Coeficiente o tasa de crecimiento individual

$t_0$  = Edad hipotética cuando la longitud es igual a 0

$t$  = Edad

En este trabajo, los parámetros del modelo ( $L_\infty$ ,  $k$  y  $t_0$ ) fueron estimados por un proceso iterativo que utiliza el algoritmo de Marquardt, que permite estimar parámetros de modelos no lineales sin la necesidad de transformar los datos en una función lineal y proporciona la mejor combinación de los parámetros (Hyams, 2001; StatSoft, 2001). Para la estimación de los parámetros se incluyó en el análisis la longitud de una larva de la especie (2.9 mm) reportada por Ueyanagi y Yabe (1959) y se utilizaron las longitudes observadas al momento de la captura y las longitudes retrocalculadas que presentaron las diferencias menores respecto a las longitudes observadas (ver sección 6.9.2). Esta estimación de los parámetros de crecimiento fue realizada independientemente para cada nivel de corte, por lo que varios juegos de parámetros fueron estimados, uno correspondiente a cada nivel de corte. En todos los casos las curvas de crecimiento estimadas fueron graficadas utilizando las longitudes promedio calculadas para cada edad y los parámetros correspondientes.

### 6.10.1 Evaluación de las posibles diferencias

Para evaluar las posibles diferencias en los parámetros de crecimiento individual ( $L_{\infty}$ ,  $k$  y  $t_0$ ) que resultaron por efecto del crecimiento alométrico en cada uno de los niveles de corte de la espina y la longitud de los organismos, fue utilizado el análisis de la suma de cuadrados residuales (Ratkowsky, 1983). Este análisis compara si dos o más curvas son diferentes estadísticamente mediante un valor de  $F$  estimado de la siguiente manera:

$$F = \frac{\frac{SCR_p - SCR_s}{3(K - 1)}}{\frac{SCR_s}{N - 3K}}$$

donde:

$SCR_p$  = Suma de cuadrados residuales del ajuste con los datos agrupados

$SCR_s$  = Suma de cuadrados residuales del ajuste de cada grupo (nivel de corte)

$K$  = Número de grupos en comparación

$N$  = Número total de datos

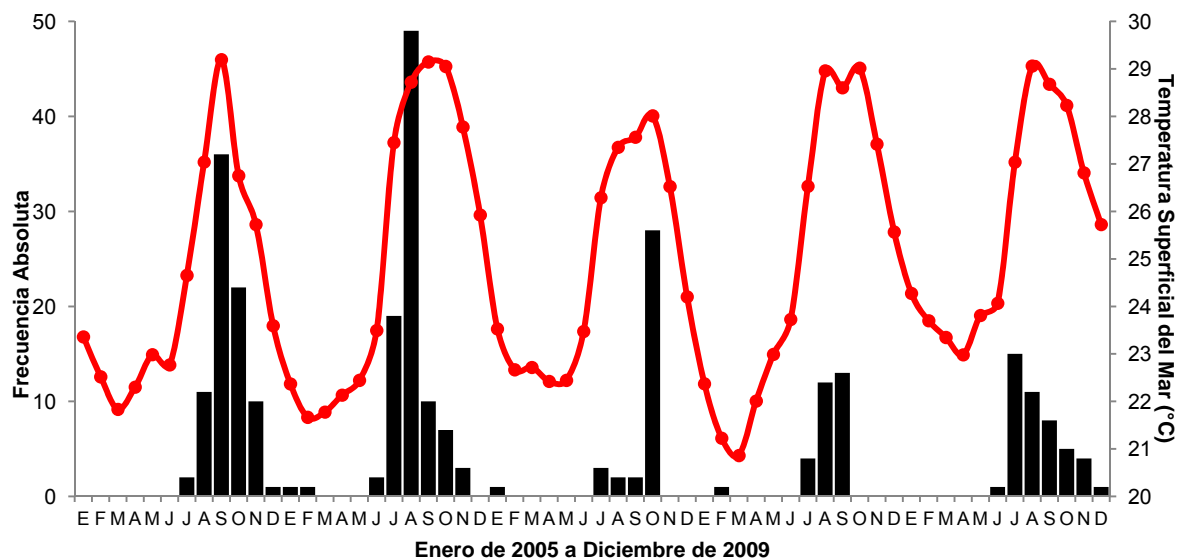
En el caso donde se encontraron diferencias estadísticas entre las curvas de crecimiento estimadas por cada nivel de corte, la prueba  $T^2$  de Hotelling (Bernard, 1981) fue utilizada para determinar entre cuáles niveles de corte existen esas diferencias y cuál o cuáles parámetros son diferentes estadísticamente. El procedimiento para el cálculo de esta prueba se describe en el Anexo 11.3.

## 7. RESULTADOS

### 7.1 Muestreo

Para el desarrollo de este trabajo fueron analizadas un total de 285 espinas de la aleta dorsal de marlin azul recolectadas en el periodo 2005-2009 (2005,  $n = 82$ ; 2006,  $n = 92$ ; 2007,  $n = 36$ , 2008,  $n = 30$ ; 2009,  $n = 45$ ). En la figura 4 se observa una

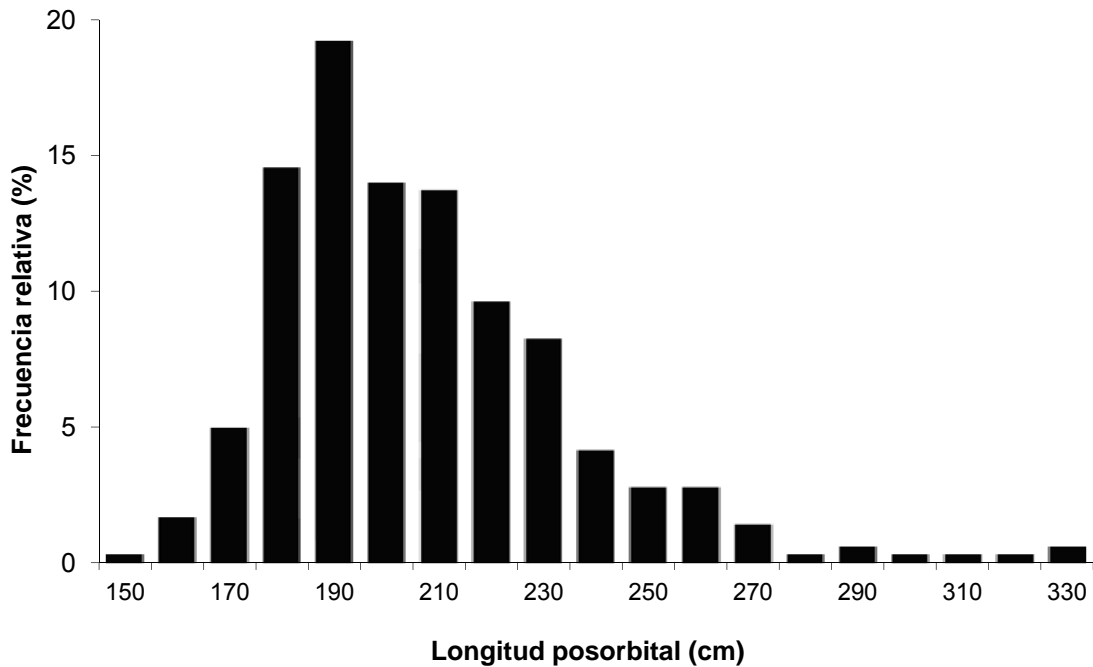
marcada estacionalidad de las capturas de marlin azul durante los meses de julio a noviembre, y que no se registraron descargas de esta especie en los primeros meses de cada año. El mayor número de individuos muestreados fue registrado en los meses en los cuales la temperatura superficial del mar promedio fue alta (Fig 4). Durante los meses de marzo, abril y mayo no se lograron obtener muestras debido a que en ese periodo la especie no estuvo disponible dentro del área donde opera la flota deportiva de Cabo San Lucas.



**Figura 4.** Número de individuos de marlin azul *Makaira nigricans* muestreados por mes (barras) del periodo 2005-2009, y temperatura superficial del mar (línea) en el área de operación de la flota deportiva de Cabo San Lucas, B.C.S, México.

Todos los marlines azules muestreados fueron hembras en el intervalo de tallas de 141 a 330 cm de longitud posorbital (Fig. 5). La distribución de frecuencias de longitudes fue unimodal en los cinco años analizados, con el 88 % de las tallas entre 161 y 240 cm. En la figura 5 también se observa la escasez de individuos de tallas inferiores a 170 cm así como de tallas superiores a 240 cm.





**Figura 5.** Estructura de tallas de hembras de marlin azul *Makaira nigricans* desembarcadas por la flota deportiva en Cabo San Lucas, B.C.S. en el periodo 2005-2009.

## 7.2 Evaluación del crecimiento alométrico entre las dimensiones de las espinas de la aleta dorsal y la longitud posorbital de los peces

En la tabla III se muestran los coeficientes de alometría ( $f$ ) que resultaron de la relación alométrica entre la longitud posorbital y las seis medidas en la zona basal de cada una de las cinco espinas de la aleta dorsal del marlin azul (Tabla I). Las distancias cuyo crecimiento tendieron a la isometría ( $f \rightarrow 1$ ) fueron la D3, D5, D6, D6 y D6, cada una respectivamente para la espinas 1, 2, 3, 4 y 5. El coeficiente de alometría para la distancia D6 de la espina 4 ( $f = 0.7587$ ) fue el más próximo al crecimiento isométrico.

**Tabla III.** Valores de los coeficientes de alometría ( $f$ ) que resultaron de la relación alométrica entre la longitud posorbital y las medidas en la zona basal (Tabla I) de cada una de las cinco espinas de la aleta dorsal del marlin azul *Makaira nigricans*.

Medida	Espina 1	Espina 2	Espina 3	Espina 4	Espina 5
D1	0.2061	0.5157	0.658	0.6059	0.5757
D2	0.3721	0.5236	0.5637	0.6637	0.6758
D3	0.396	0.5881	0.6121	0.6346	0.658
D4	0.2926	0.582	0.6465	0.7387	0.7218
D5	0.3143	0.5893	0.6054	0.6539	0.631
D6	0.2039	0.5866	0.696	0.7587	0.7295

De forma general se observó que los valores del coeficiente de alometría ( $f$ ) son más altos de la espina 1 a la espina 4, pero menores en la 5 con respecto a la 4. De entre las 5 espinas analizadas, la espina 4 fue la que presentó medidas cuyo crecimiento respecto a la longitud posorbital de los organismos fueron más cercanas a la isometría (Tabla III). La prueba  $t$  de Student mostró que los coeficientes de alometría ( $f$ ) de todas las relaciones fueron significativamente diferentes de 1, ya que los valores de  $p$  fueron menores que el nivel de significación (0.05) (ver Anexo 11.4), lo cual implica que el crecimiento de las dimensiones de la zona basal de cualquiera las cinco espinas respecto a la longitud posorbital de los organismos fue alométrico negativo. Es decir, dado que los coeficientes de alometría fueron menores de 1, significa que las diferentes dimensiones de la espina crecieron a una tasa mayor que lo que crecieron los organismos en longitud posorbital.

La distancia D6 de la espina 4 fue la que presentó un coeficiente más próximo al valor del crecimiento isométrico y es la distancia que se sugiere utilizar para posicionar el nivel de corte sobre las espinas. Sin embargo, dado que en este trabajo los análisis se realizaron utilizando la distancia D1, se establecieron dos relaciones lineales para convertir la distancia D1 en la distancia D6 y viceversa, la distancia D6 en la distancia D1, las ecuaciones son las siguientes:  $D6 = 1.09574 + 0.91253 * D1$  ( $R^2 = 0.8541$ ,  $p < 0.01$ ) y  $D1 = -0.52518 + 0.93598 * D6$  ( $R^2 = 0.8541$ ,  $p < 0.01$ ).

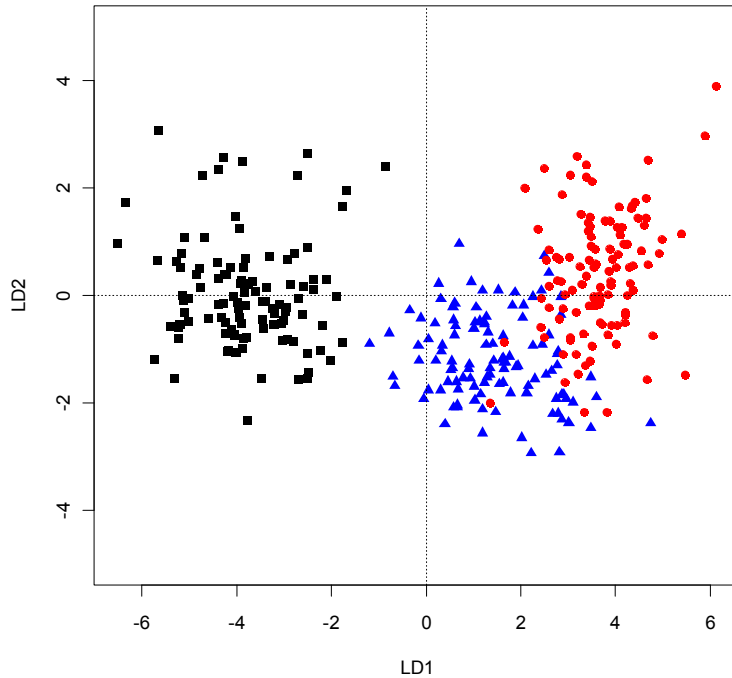
## 7.3 Verificación de la posición anatómica de la espina recolectada

### 7.3.1 Morfometría tradicional (MT)

La localización relativa de las espinas en las funciones de discriminación lineal (LD1 y LD2) se muestra en la figura 6. Como resultado de incluir tres grupos (espinas 1, 4 y 5) en el análisis, se obtuvieron dos funciones discriminantes que explicaron el 100 % (LD1 95 % y LD2 5 %) de la varianza entre grupos. Sobre la base de los coeficientes con valores más altos en las funciones de discriminación lineal (Tabla IV), las distancias que contribuyeron más en la discriminación de las espinas analizadas fueron: para LD1 la distancia entre las apófisis superiores de la espina (D2) y la distancia entre la apófisis inferior izquierda a la apófisis superior derecha (D4); y para LD2 la distancia entre las apófisis inferiores de la espina (D1) y la distancia entre las apófisis superiores de la espina (D2).

La matriz de reclasificación de las espinas del periodo 2007-2009 derivada del LDA se presenta en la tabla V. La espina 1 fue reclasificada correctamente en el 100 % de los casos, mientras que las espinas 4 y 5 fueron reclasificadas correctamente en el 94 % y 92 % de los casos, respectivamente. El porcentaje de espinas reclasificadas erróneamente fue bajo (Tabla V), y corresponde al área de traslape en la figura 6.

El LDA mostró una discriminación significativa entre las espinas analizadas (Lambda de Wilks = 0.069,  $F = 229.28$ ,  $p < 0.05$ ). El valor de la Lambda de Wilks fue cercano a cero, lo que indica un grado de discriminación alto.



**Figura 6.** Diagrama de dispersión de las espinas en las funciones de discriminación lineal (LD1 y LD2). Cuadros: espina 1; triángulos: espina 4; círculos: espina 5.

**Tabla IV.** Coeficientes de las funciones de discriminación lineal (LD1 y LD2). D1-D2 y D4-D6 corresponden a las medidas en la zona basal de las espinas (Tabla I).

<b>Distancia</b>	<b>LD1</b>	<b>LD2</b>
<b>D1</b>	-10.95	-34.79
<b>D2</b>	30.72	-15.64
<b>D4</b>	39.30	5.58
<b>D5</b>	-0.55	1.66
<b>D6</b>	25.10	-8.73

La posición de las 174 estructuras recolectadas como espina 4 durante el periodo 2005-2006 fue verificada con la función de clasificación derivada del LDA, resultando que el 78 % de los casos (136) correspondieron a las características morfológicas de la espina 4 y el otro 22 % (38) a las de la espina 5.

**Tabla V.** Matriz de reclasificación de las espinas recolectadas en 2007-2009 derivada del LDA.

Grupo	Espina 1	Espina 4	Espina 5	Clasificación correcta (%)	Clasificación incorrecta (%)
Espina 1	111	0	0	100	0
Espina 4	0	104	7	93.7	6.3
Espina 5	0	9	102	91.9	8.1

### 7.3.2 Morfometría geométrica (MG)

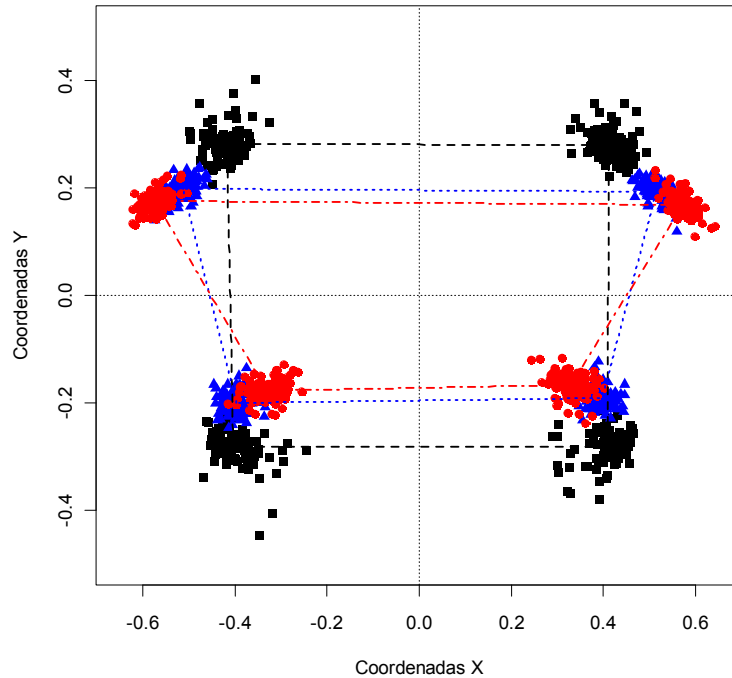
En la figura 7 se muestra la superposición de las landmarks (coordenadas) de las espinas derivada del Análisis Generalizado Procrustes, donde es posible observar una discriminación morfológica entre las espinas 1, 4 y 5. La espina 1 mostró apófisis inferiores y apófisis superiores del mismo ancho (forma cuadrada); la espina 5 presentó apófisis superiores más anchas que las apófisis inferiores (forma de trapecio); la espina 4 tuvo apófisis superiores ligeramente más anchas que las apófisis inferiores (forma intermedia entre la espina 1 y la espina 5).

El diagrama de dispersión de las espinas en los ejes de variables canónicas (CV1 y CV2) derivado del CVA se muestra en la figura 8. Al igual que en el LDA, como resultado de incluir tres grupos (espinas 1, 4 y 5) en el análisis, se obtuvieron dos ejes de variables canónicas que explicaron el 100 % de la varianza entre grupos, 95 % y 5 % para el CV1 y CV2, respectivamente. Las landmarks **c** y **d** tuvieron los valores más altos de los coeficientes en los ejes de variables canónicas (Tabla VI).

La reclasificación de las espinas recolectadas en 2007-2009 derivada del análisis de variables canónicas es presentada en la tabla VII. La espina 1 fue reclasificada correctamente en el 100 % de los casos, mientras que las espinas 4 y 5 fueron reclasificadas correctamente en el 93 % y 91 % de los casos, respectivamente. El porcentaje de espinas reclasificadas erróneamente fue bajo (Tabla VII), y corresponde al área de traslape en la figura 8.

Los resultados del MANOVA para el primer eje de variables canónicas mostraron diferencias significativas entre las espinas (Lambda Wilks = 0.071,  $\chi^2_{(3)} = 189.67$ ,  $p <$

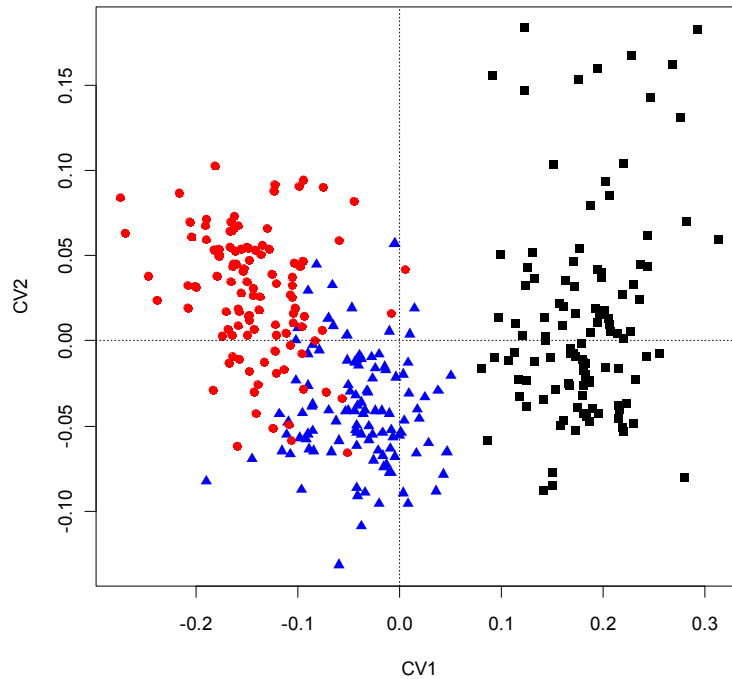
0.05). El valor de la Lambda de Wilks fue cercano a cero, lo que indica un grado de discriminación alto.



**Figura 7.** Superposición de las landmarks (coordenadas) y forma promedio de la zona basal de las espinas derivada del Análisis Generalizado Procrustes. Cuadros: espina 1; triángulos: espina 4; círculos: espina 5.

**Tabla VI.** Valor de los coeficientes de los ejes de variables canónicas (CV1 y CV2). Las letras (a-d) corresponden a las landmarks ubicadas en la base de las espinas (Fig. 1).

Landmark	CV1	CV2
a	0.071	0.18
b	-0.07	0.03
c	-0.48	0.75
d	0.86	0.62



**Figura 8.** Diagrama de dispersión de las espinas en los ejes de variables canónicas (CV1 y CV2). Cuadros: espina 1; triángulos: espina 4; círculos: espina 5.

**Tabla VII.** Matriz de reclasificación de las espinas recolectadas en 2007-2009 derivada del CVA.

Grupo	Espina 1	Espina 4	Espina 5	Clasificación correcta (%)	Clasificación incorrecta (%)
<b>Espina 1</b>	111	0	0	100	0
<b>Espina 4</b>	0	103	8	92.8	7.2
<b>Espina 5</b>	0	10	101	91	9

La posición de las 174 estructuras recolectadas como espina 4 durante el periodo 2005-2006 fue verificada con el CVA, resultando que el 78 % de los casos (136) las características morfológicas correspondieron a las de la espina 4 y el 22 % (38) a las de la espina 5.

### 7.3.3 Método de partición recursiva (PR)

Para cada análisis realizado con este método, en la tabla VIII se resume el mejor número de particiones y el error de clasificación asociado para cada una de las posibles particiones.

**Tabla VIII.** Mejor número de particiones y error de clasificación asociado a cada una de las posibles particiones para cada análisis de datos de acuerdo a la Tabla II.

Análisis de datos	Número de particiones	Error de clasificación
1	8	0.17
2	10	0.41
3	7	0.35
4	2	0.13

Sobre la base del error de clasificación mínimo (0.13), se seleccionó el modelo con dos particiones resultante del análisis de datos 4 para clasificar a las espinas, el cual se basó en proporciones entre las distancias originales medidas en la base de las mismas (Tabla VIII). La característica que definió las dos particiones es un coeficiente o proporción que resulta de dividir la distancia D2 con respecto a la distancia D1 con un valor de 1.47. Sobre la base de estos resultados, en el cuadro 1 se presenta una clave sencilla y práctica para discriminar a las espinas 4 y 5.

**Cuadro 1.** Clave para la verificación de la posición anatómica de las espinas de la aleta dorsal del marlin azul *Makaira nigricans*.

Proporción menor a 1.47 como resultado de dividir la distancia entre las apófisis superiores de la espina con respecto a la distancia entre las apófisis inferiores de la misma espina.....	Espina 4
Proporción mayor o igual a 1.47 como resultado de dividir la distancia entre las apófisis superiores de la espina con respecto a la distancia entre las apófisis inferiores de la misma espina.....	Espina 5

Utilizando la clave de clasificación (Cuadro 1), la reclasificación de las espinas del 2007-2009 fue correcta en el 96 % de los casos para la espina 4 y en el 91 % para la espina 5 (Tabla IX). El porcentaje de espinas reclasificadas erróneamente fue bajo (7 %). A su vez, la verificación de las estructuras recolectadas como espina 4 durante el periodo 2005-2006 resultó en que 138 (79 %) correspondieron a las características morfológicas de la espina 4 y 36 (21 %) a las características de la espina 5.



**Tabla IX.** Matriz de reclasificación de las espinas recolectadas en 2007-2009 derivada de la clave de identificación del cuadro 1.

<b>Grupo</b>	<b>Espina 4</b>	<b>Espina 5</b>	<b>Clasificación correcta (%)</b>	<b>Clasificación incorrecta (%)</b>
<b>Espina 4</b>	106	5	95.5	4.5
<b>Espina 5</b>	10	101	91	9

### 7.3.4 Evaluación de la concordancia entre métodos

Los tres métodos utilizados en este trabajo para clasificar morfológicamente a las 285 estructuras recolectadas como cuarta espina durante el periodo 2005-2009 coincidieron en clasificar cada estructura de la misma forma, lo que fue indicado por el valor pequeño del coeficiente de variación promedio ( $CV_{2005-2009} = 0.43 \%$ ). El coeficiente de variación promedio de las 174 espinas recolectadas en 2005-2006 ( $CV_{2005-2006} = 0.25 \%$ ) fue más bajo que el coeficiente de variación promedio de las 111 espinas recolectadas en 2007-2009 ( $CV_{2007-2009} = 0.61 \%$ ).

En una perspectiva de comparación por pares, el coeficiente de variación promedio ( $CV_{2005-2009}$ ) en la clasificación de las espinas fue de 0 % entre los métodos MT y MG, 0.32 % entre los métodos MT y PR, y de 0.32 % entre los métodos MG y PR.

### 7.4 Establecimiento del nivel de corte

En la cuarta espina de todos los organismos analizados, el número de marcas o niveles comparables fue de nueve (1 marca al 50 % de D1 denominada  $A_{1/2}$  y 8 marcas en múltiplos consecutivos de D1, denominadas  $A_1... A_8$ ), por lo que se obtuvieron 9 modelos que relacionan el diámetro de las espinas y la longitud posorbital de los organismos. Los coeficientes resultantes para cada nivel a lo largo de la espina se presentan en la tabla X. De forma general se observó que los valores del coeficiente de alometría ( $f$ ) aumentaron a partir de la marca más cercana a la base de la espina ( $A_{1/2}$ ) hasta la posición de la marca  $A_2$ , para posteriormente disminuir progresivamente hasta la posición de marca  $A_8$ .

**Tabla X.** Coeficientes del modelo alométrico que relaciona la longitud posorbital de los organismos y el diámetro de las espinas en cada una de las nueve posiciones.

Posición de marca	Parámetros del modelo	
	<i>u</i>	<i>f</i>
A <sub>1/2</sub>	107.00	0.5531
A <sub>1</sub>	133.89	0.6330
A <sub>2</sub>	156.29	0.6603
A <sub>3</sub>	171.14	0.6437
A <sub>4</sub>	187.30	0.6353
A <sub>5</sub>	207.14	0.5710
A <sub>6</sub>	225.93	0.4658
A <sub>7</sub>	233.38	0.2852
A <sub>8</sub>	218.32	0.0859

Sobre la base del comportamiento de los coeficientes de alometría a lo largo de la cuarta espina, los dos niveles seleccionados para inferir geoméricamente el nivel de corte donde el coeficiente *f* pudiera incrementar o idealmente se aproxime a la isometría fueron los niveles A<sub>2</sub> y A<sub>3</sub>.

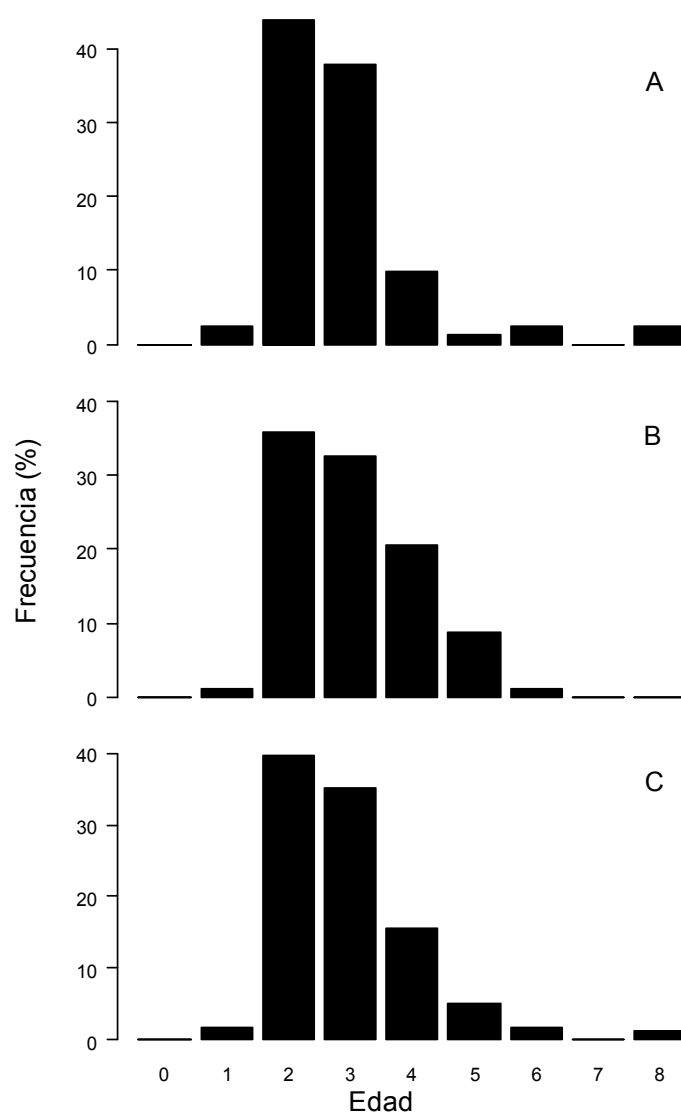
Los diámetros en los niveles A<sub>2</sub> y A<sub>3</sub> de la cuarta espina fueron los valores utilizados en la simulación iterativa de las dimensiones de trapecios isósceles hasta encontrar otro nivel donde el coeficiente de alometría calculado fuera mayor a los obtenidos para A<sub>2</sub> y A<sub>3</sub>. De este análisis resultó que el diámetro de la espina ubicado a 2.5 veces la distancia D1 desde la base y sobre el eje principal de la cuarta espina con un coeficiente de alometría de 0.6942, es el nivel de corte sugerido para realizar el retrocálculo de longitudes y la estimación de los parámetros de crecimiento individual.

### 7.5 Conteo de marcas de crecimiento y estructura por edades

La composición por edades del marlin azul en las capturas desembarcadas por la flota de pesca deportiva en Cabo San Lucas, B.C.S., fue estimada para los años 2005 y 2006. Todos los cortes transversales de la única espina de la aleta dorsal recolectada por organismo fueron legibles (n = 174), es decir, en todos los cortes fue

posible observar y contar marcas de crecimiento. La concordancia entre las edades asignadas de manera independiente por dos lectores fue elevada, indicado por el valor pequeño del coeficiente de variación promedio ( $CV_{2005-2006} = 2.04 \%$ ), lo que permite afirmar que existió consistencia entre los conteos de ambos lectores. La discrepancia inicial entre lectores fue en el 9.2 % del total de cortes. Después del conteo de marcas conjunto entre ambos lectores, únicamente en una lectura (0.5 % del total de cortes) no hubo consenso, por lo que ese organismo no se incluyó en los análisis posteriores.

La captura incidió sobre 7 grupos de edad (1 al 6 y 8 en 2005, y 1 al 6 en 2006). Los grupos de edad 0 y 7 estuvieron ausentes en la captura y los grupos de edad mayores al 3 fueron escasos (Fig. 9). Los individuos de los grupos de edad 2 y 3 fueron los más abundantes en la captura representando el 74 % del total de ejemplares muestreados. El intervalo de tallas de las hembras de estas edades fue de 171 a 210 cm de longitud posorbital. La comparación de las estructuras por edades de los años 2005 y 2006 mostró diferencias significativas entre éstas ( $\chi^2_{(0.05, 6)} = 18.16$ ).



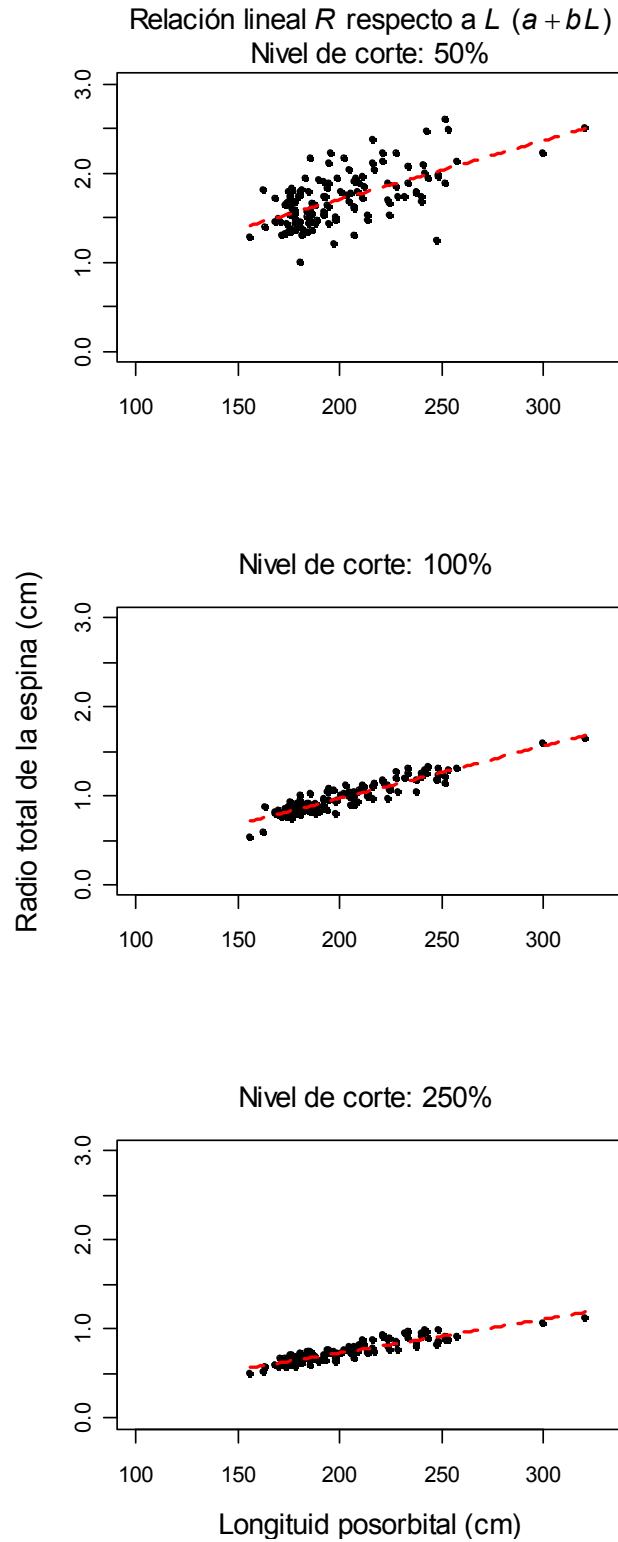
**Figura 9.** Estructura por edades de la captura anual de hembras de marlin azul *Makaira nigricans* desembarcadas en Cabo San Lucas, B.C.S. durante los años 2005 (A), 2006 (B) y para el periodo 2005-2006 (C).

### 7.6 Retrocálculo de longitudes

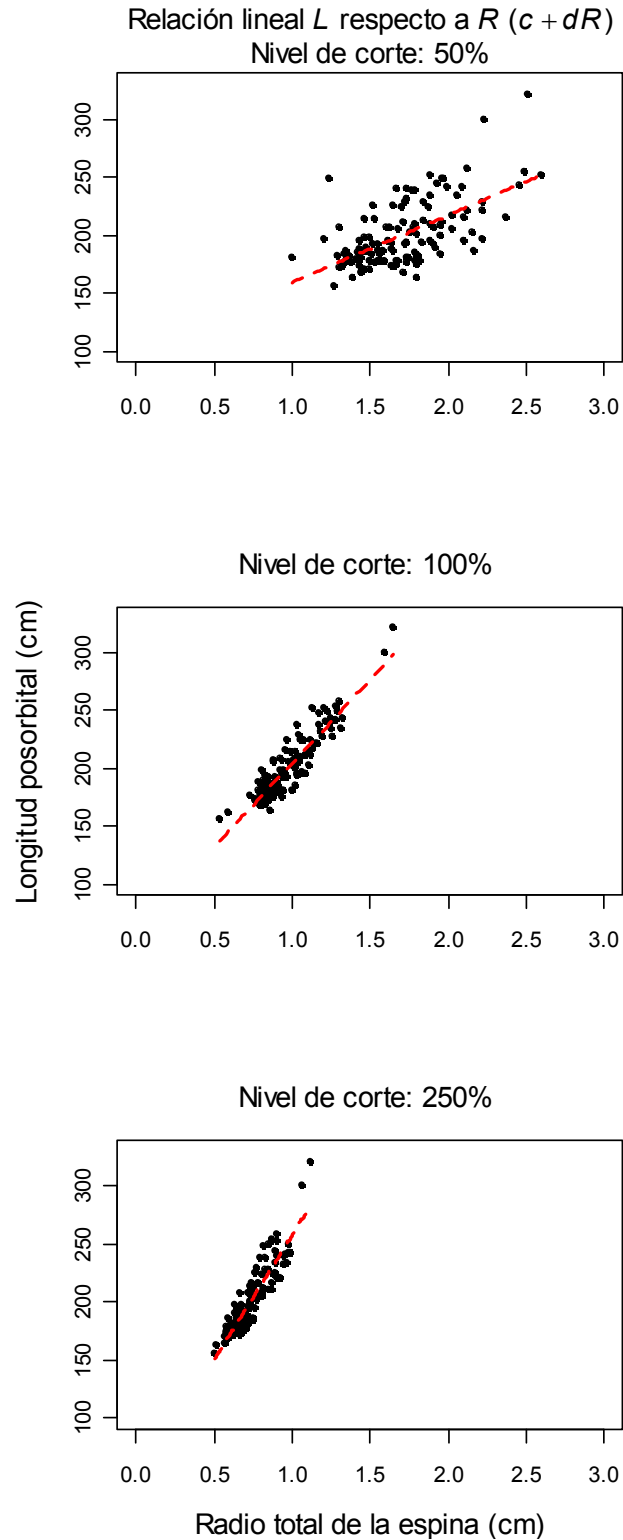
La representación gráfica de las diferentes relaciones entre el radio de la espina y la longitud del pez para los tres niveles de corte (al 50 %, 100 % y 250 % de D1) se presenta en las figuras 10, 11 y 12. Los coeficientes estimados de estas relaciones se presentan en las tablas XI, XII y XIII. Estos coeficientes fueron los que se utilizaron en los diferentes métodos de retrocálculo (sección 6.9.1).

Los diagramas de dispersión y las relaciones lineales calculadas entre el radio de las espinas y la longitud del pez para cada nivel de corte muestran que el radio de la espina se incrementa conforme los organismos aumentan en longitud (Figs. 10 y 11), indicando ciertamente una relación general entre el crecimiento de la espina y el pez, pero de ninguna manera muestran que sea sobre una base de isometría.

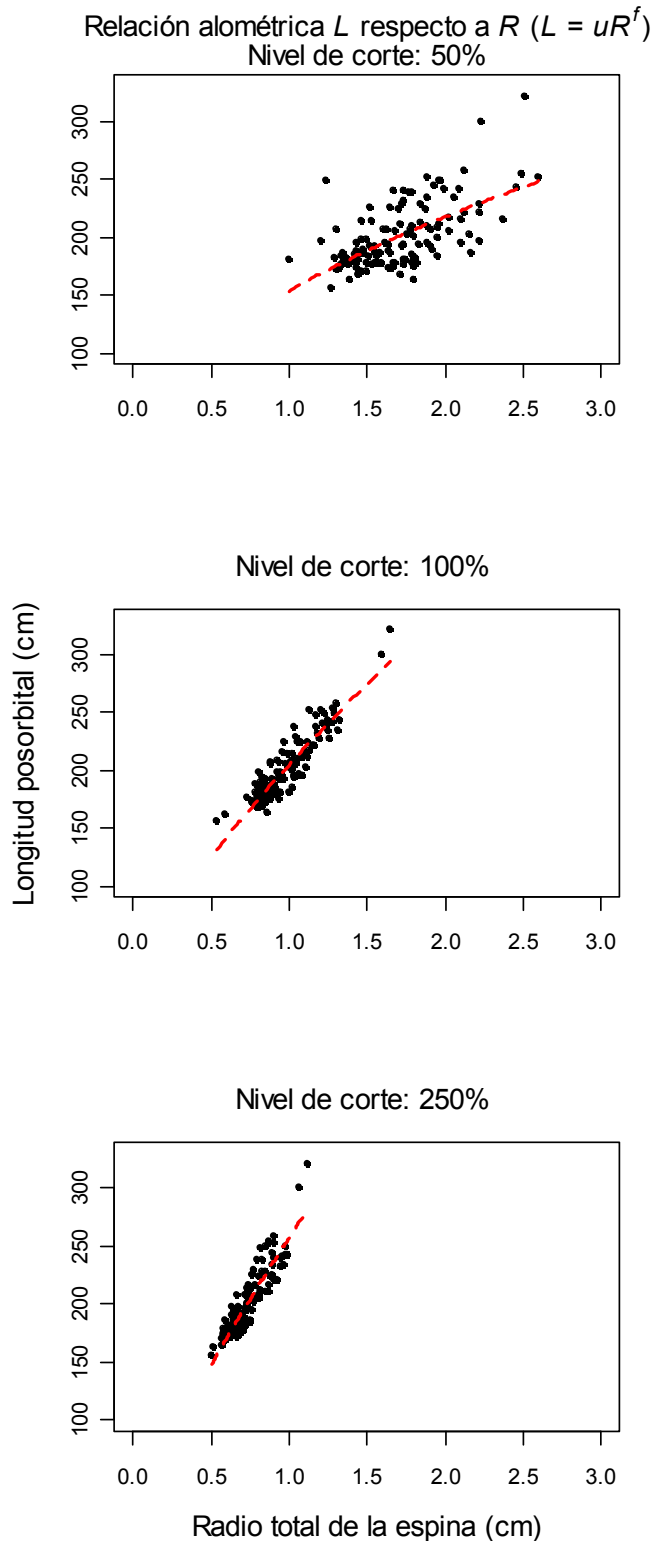
Los coeficientes ( $f$ ) estimados para la relación alométrica de cada nivel de corte son significativamente menores a 1 (Tabla XIII), lo que indica que el crecimiento entre el radio de las espinas y la longitud del pez es alométrico negativo, es decir, el crecimiento del radio de la espina es relativamente más rápido que el crecimiento en longitud del pez. Los valores del coeficiente de alometría ( $f$ ) aumentaron progresivamente del nivel de corte del 50 % al nivel de corte del 250 % (Tabla XIII). El crecimiento entre el radio de las espinas y la longitud del pez en el nivel de corte del 250 % fue el que más se acercó a la isometría en comparación a los niveles de corte al 50 % y 100 %.



**Figura 10.** Relación lineal  $R$  respecto a  $L$  ( $R = a + bL$ ) para los tres niveles de corte de hembras de marlin azul *Makaira nigricans* desembarcadas por la flota deportiva en Cabo San Lucas, B.C.S. en el periodo 2005-2006.



**Figura 11.** Relación lineal  $L$  respecto a  $R$  ( $L = c + dR$ ) para los tres niveles de corte de hembras de marlin azul *Makaira nigricans* desembarcadas por la flota deportiva en Cabo San Lucas, B.C.S. en el periodo 2005-2006.



**Figura 12.** Relación alométrica  $L$  respecto a  $R$  ( $L = uR^f$ ) para los tres niveles de corte de hembras de marlin azul *Makaira nigricans* desembarcadas por la flota deportiva en Cabo San Lucas, B.C.S. en el periodo 2005-2006.



**Tabla XI.** Coeficientes de la relación lineal  $R$  respecto a  $L$  ( $R = a + bL$ ) para los tres niveles de corte de hembras de marlin azul *Makaira nigricans* desembarcadas por la flota deportiva en Cabo San Lucas, B.C.S. en el periodo 2005-2006 ( $n = 136$ ).

Nivel de corte	$a$	$B$	$R^2$
50 %	0.3862	0.0065	0.3766
100 %	-0.2089	0.0058	0.8132
250 %	-0.0250	0.0037	0.8462

**Tabla XII.** Coeficientes de la relación lineal  $L$  respecto a  $R$  ( $L = c + dR$ ) para los tres niveles de corte de hembras de marlin azul *Makaira nigricans* desembarcadas por la flota deportiva en Cabo San Lucas, B.C.S. en el periodo 2005-2006 ( $n = 136$ ).

Nivel de corte	$c$	$D$	$R^2$
50 %	101.53	57.87	0.3766
100 %	60.65	143.95	0.8132
250 %	42.60	215.40	0.8462

**Tabla XIII.** Coeficientes de la relación alométrica  $L$  respecto a  $R$  ( $L = eR^f$ ) para los tres niveles de corte de hembras de marlin azul *Makaira nigricans* desembarcadas por la flota deportiva en Cabo San Lucas, B.C.S. en el periodo 2005-2006 ( $n = 136$ ).

Nivel de corte	$u$	$f$	$R^2$
50 %	153.91	0.4993	0.3678
100 %	205.30	0.7145	0.8100
250 %	257.54	0.8004	0.8368

Dentro de cada relación lineal y alométrica, la prueba  $t$  de Student mostró que las pendientes entre dos niveles de corte son significativamente diferentes, ya que los valores de  $p$  son menores que el nivel de significación (0.05) (Tabla XIV), con excepción de la comparación entre los niveles 50 % y 100 % de la relación  $R = a + bL$ .

**Tabla XIV.** Resultados de la prueba *t* de Student relativas a la comparación de pendientes entre niveles de corte dentro de cada una de las relaciones establecidas entre los radios de los cortes y la longitud posorbital de los organismos ( $R = a + bL$ ,  $L = c + dR$ ,  $L = uR^f$ ).

Comparación entre niveles de corte	$R = a + bL$		$L = c + dR$		$L = uR^f$	
	<i>t</i>	<i>p</i>	<i>t</i>	<i>p</i>	<i>t</i>	<i>p</i>
50 % - 100 %	-0.9053	0.3661	10.095	2.4E-20	3.4264	0.0007
50 % - 250 %	3.671	0.0002	-13.8014	1.1E-32	-4.5477	8.4E-06
100 % - 250 %	-7.6109	5.4E-13	6.6105	2.2E-10	1.9792	0.0488

Las longitudes promedio por grupo de edad observadas y retrocalculadas con cada uno de los métodos de retrocálculo utilizados para el nivel de corte al 50 % se presentan gráficamente en las figuras 14-21 del anexo 11.5, para el nivel de corte al 100 % en figuras 22-29 del anexo 11.6 y para el nivel de corte al 250 % en las figuras 30-37 del anexo 11.7. Las longitudes promedio por grupo de edad observadas y retrocalculadas, y las diferencias entre ellas para el nivel de corte al 50 % se presentan en la tabla XV, para el nivel de corte al 100 % en la tabla XVI y para el nivel de corte al 250 % en la tabla XVII. Debido a que los individuos del grupo edad 7 estuvieron ausentes en las capturas de los años 2005 y 2006, no se presentan comparaciones para ese grupo de edad.

Ya fue mencionado anteriormente en este trabajo que la técnica de retrocálculo es utilizada para aumentar el número de datos de longitud a edades anteriores a la captura de los organismos y en edades raramente observadas en la muestra. En este trabajo se observó que los individuos de longitudes menores a 170 cm (Fig. 5), así como los de 1 año de edad son escasos, asimismo que los individuos de edad 7 no estuvieron representados en las muestras (Fig. 9), por lo que el uso de esta técnica permitió incrementar el tamaño de muestra en esas edades con baja representatividad para propósitos de la estimación los parámetros de crecimiento individual.

**Tabla XV.** Longitudes promedio por grupo de edad observadas, retrocalculadas a partir de secciones transversales establecidas a 0.5 veces la distancia entre las apófisis inferiores de la cuarta espina dorsal de hembras de marlin azul *Makaira nigricans* desembarcadas en Cabo San Lucas, B.C.S. en el periodo 2005-2006, y diferencias entre las longitudes observadas y calculadas.

Método de retrocálculo	Edad													
	1		2		3		4		5		6		8	
	Longitud promedio	Diferencia cm (%)	Longitud promedio	Diferencia cm (%)	Longitud promedio	Diferencia cm (%)	Longitud promedio	Diferencia cm (%)	Longitud promedio	Diferencia cm (%)	Longitud promedio	Diferencia cm (%)	Longitud promedio	Diferencia cm (%)
<b>Observadas</b>	165.33		180.44		196.88		223.96		243.29		253.33		310.50	
<b>Regresión</b>	160.00	5.3 (3.2)	182.69	2.2 (1.2)	195.87	1.01 (0.51)	203.95	20.01 (8.9)	210.29	33 (13.5)	215.79	37.5 (14.8)	234.61	75.8 (24.4)
<b>Dahl-Lea</b>	118.11	47 (28.5)	164.47	15.9 (8.8)	192.47	4.41 (2.2)	216.69	7.27 (3.2)	237.04	6.24 (2.5)	257.36	4.03 (1.5)	301.35	9.15 (2.94)
<b>Fraser-Lee</b>	159.07	6.27 (3.7)	181.94	1.5 (0.83)	202.57	5.69 (2.8)	224.09	0.13 (0.05)	244.41	1.13 (0.46)	263.67	10.3 (4.08)	304.34	6.16 (1.9)
<b>Intercepto biológico</b>	118.08	47 (28.5)	164.45	15.99 (8.8)	192.47	4.42 (2.2)	216.68	7.28 (3.2)	237.04	6.25 (2.5)	257.36	4.02 (1.5)	301.35	9.15 (2.9)
<b>SPH</b>	94.48	70.8 (42)	154.38	26.06 (14.4)	186.65	10.23 (5.1)	212.42	11.54 (5.1)	232.79	10.49 (4.3)	253.72	0.39 (0.15)	299.63	10.87 (3.5)
<b>BPH</b>	159.53	5.81 (3.5)	182.62	2.18 (1.2)	203.56	6.68 (3.3)	225.29	1.33 (0.59)	246.05	2.76 (1.1)	265.52	12.19 (4.8)	305.24	5.26 (1.6)
<b>Alométrico 1</b>	179.81	14.4 (8.7)	192.00	11.56 (6.4)	209.69	12.81 (6.5)	230.41	6.45 (2.8)	252.02	8.74 (3.5)	261.50	10.17 (4)	308.22	2.28 (0.73)
<b>Alométrico 2</b>	159.26	6.07 (3.6)	182.83	2.39 (1.3)	199.96	3.08 (1.5)	225.84	1.88 (0.83)	246.03	2.75 (1.1)	257.79	4.46 (1.7)	306.93	3.57 (1.1)

**Tabla XVI.** Longitudes promedio por grupo de edad observadas, retrocalculadas a partir de secciones transversales establecidas a 1 vez la distancia entre las apófisis inferiores de la cuarta espina dorsal de hembras de marlin azul *Makaira nigricans* desembarcadas en Cabo San Lucas, B.C.S. en el periodo 2005-2006, y diferencias entre las longitudes observadas y calculadas.

Método de retrocálculo	Edad													
	1		2		3		4		5		6		8	
	Longitud promedio	Diferencia cm (%)	Longitud promedio	Diferencia cm (%)	Longitud promedio	Diferencia cm (%)	Longitud promedio	Diferencia cm (%)	Longitud promedio	Diferencia cm (%)	Longitud promedio	Diferencia cm (%)	Longitud promedio	Diferencia cm (%)
<b>Observadas</b>	165.33		180.44		196.88		223.96		243.29		253.33		310.50	
<b>Regresión</b>	144.89	20.4 (12.3)	176.64	3.80 (2.1)	199.06	2.18 (1.1)	218.27	5.69 (2.5)	235.23	8.06 (3.3)	250.86	2.48 (0.97)	287.09	23.41 (7.5)
<b>Dahl-Lea</b>	121.61	43.7 (26.4)	166.31	14.14 (7.8)	194.25	2.63 (1.3)	219.10	4.86 (2.1)	241.98	1.31 (0.53)	261.05	7.72 (3)	301.35	9.15 (2.9)
<b>Fraser-Lee</b>	145.01	20.3 (12.2)	176.28	4.16 (2.3)	199.84	2.96 (1.5)	222.96	1 (0.44)	245.29	2 (0.82)	264.19	10.85 (4.2)	303.14	7.36 (2.3)
<b>Intercepto biológico</b>	121.48	43.8 (26.5)	166.25	14.19 (7.8)	194.23	2.66 (1.3)	219.08	4.88 (2.17)	241.96	1.33 (0.54)	261.04	7.71 (3)	301.34	9.16 (2.9)
<b>SPH</b>	135.30	30 (18.1)	172.15	8.30 (4.5)	197.52	0.64 (0.32)	221.36	2.60 (1.16)	243.92	0.63 (0.25)	262.89	9.55 (3.7)	302.40	8.1 (2.6)
<b>BPH</b>	144.97	20.3 (12.3)	176.30	4.14 (2.2)	199.93	3.04 (1.54)	223.09	0.87 (0.38)	245.46	2.17 (0.89)	264.35	11.02 (4.3)	303.24	7.26 (2.3)
<b>Alométrico 1</b>	144.07	21.2 (12.8)	176.25	4.19 (2.3)	200.29	3.41 (1.7)	223.63	0.33 (0.14)	246.27	2.98 (1.2)	260.38	7.04 (2.7)	303.96	6.54 (2.1)
<b>Alométrico 2</b>	160.13	5.2 (3.1)	183.36	2.92 (1.6)	200.11	3.23 (1.6)	225.87	1.91 (0.85)	246.33	3.04 (1.2)	288.47	5.13 (2)	305.83	4.67 (1.5)

**Tabla XVII.** Longitudes promedio por grupo de edad observadas, retrocalculadas a partir de secciones transversales establecidas a 2.5 veces la distancia entre las apófisis inferiores de la cuarta espina dorsal de hembras de marlin azul *Makaira nigricans* desembarcadas en Cabo San Lucas, B.C.S. en el periodo 2005-2006, y diferencias entre las longitudes observadas y calculadas.

Método de retrocálculo	Edad													
	1		2		3		4		5		6		8	
	Longitud promedio	Diferencia cm (%)	Longitud promedio	Diferencia cm (%)	Longitud promedio	Diferencia cm (%)	Longitud promedio	Diferencia cm (%)	Longitud promedio	Diferencia cm (%)	Longitud promedio	Diferencia cm (%)	Longitud promedio	Diferencia cm (%)
<b>Observadas</b>	165.33		180.44		196.88		223.96		243.29		253.33		310.50	
<b>Regresión</b>	145.81	19.5 (11.8)	176.44	4 (2.2)	197.41	0.53 (0.26)	215.17	8.79 (3.9)	228.63	14.66 (6)	233.94	19.39 (7.6)	270.78	39.7 (12.7)
<b>Dahl-Lea</b>	131.42	33.9 (20.5)	169.69	10.75 (5.9)	193.99	2.90 (1.4)	217.85	6.11 (2.7)	238.52	4.76 (1.9)	257.45	4.12 (1.6)	301.59	8.91 (2.8)
<b>Fraser-Lee</b>	145.67	19.6 (11.8)	175.99	4.45 (2.4)	198.06	1.17 (0.59)	220.94	3.02 (1.3)	241.42	1.86 (0.76)	260.20	6.86 (2.7)	302.84	7.66 (2.4)
<b>Intercepto biológico</b>	131.24	34.1 (20.6)	169.61	10.83 (6)	193.94	2.95 (1.4)	217.81	6.15 (2.7)	238.48	4.8 (1.9)	257.42	4.08 (1.6)	301.57	8.93(2.8)
<b>SPH</b>	133.63	31.7 (19.1)	170.67	9.77 (5.4)	194.62	2.26 (1.1)	218.33	5.63 (2.5)	238.97	4.31 (1.77)	257.88	4.55 (1.7)	301.78	8.72 (2.8)
<b>BPH</b>	145.70	19.6 (11.8)	176.05	4.39 (2.4)	198.16	1.28 (0.65)	221.11	2.85 (1.2)	241.66	1.62 (0.66)	260.51	7.17 (2.8)	302.98	7.52 (2.4)
<b>Alométrico 1</b>	145.28	20 (12.1)	176.09	4.35 (2.4)	198.40	1.52 (0.77)	221.45	2.51 (1.1)	242.21	1.08 (0.44)	261.19	7.86 (3.1)	303.37	7.13 (2.2)
<b>Alométrico 2</b>	160.38	4.9 (3)	181.22	0.78 (0.43)	198.93	2.05 (1)	224.33	0.37 (0.16)	245.16	1.87 (0.76)	258.19	4.85 (1.9)	305.79	4.71 (1.5)

De forma general, para los 3 niveles de corte, las longitudes retrocalculadas con cada uno de los ocho métodos utilizados fueron menores a las longitudes observadas, con las diferencias mayores para los grupos de edad 1 y 2. Longitudes retrocalculadas mayores a las observadas fueron estimadas con los métodos de Fraser-Lee, SPH, BPH, y principalmente con el método alométrico 1 y método alométrico 2. Cuando las longitudes retrocalculadas en los grupos de edad más jóvenes (e.g. edad 1 y 2) son menores a las observadas, se le conoce como fenómeno de Lee. Con el método alométrico 2 se redujo la diferencia entre la longitud promedio retrocalculada y la longitud promedio observada para el grupo de edad 1 y se obtuvieron longitudes retrocalculadas mayores a las observadas en los grupos de edad 1, 2 y 3 principalmente, reduciéndose en gran medida el fenómeno de Lee, observado comúnmente en este tipo de estimaciones.

Las longitudes promedio retrocalculadas para los grupos de edad 1 y 2 que mostraron mayores diferencias respecto a las observadas correspondieron a las estimadas con los métodos de Dahl-Lea, intercepto biológico y SPH (Tablas XV, XVI y XVII). Para esos mismos grupos de edad, las diferencias menores fueron para los métodos alométrico 2, regresión, BPH y Fraser-Lee. En cada grupo de edad comprendido del 3 al 6 y el 8, las diferencias entre las longitudes observadas y retrocalculadas fueron mínimas para todos los métodos aplicados, excepto para aquellas longitudes retrocalculadas con el método de regresión.

Los métodos de Dahl-Lea e intercepto biológico produjeron longitudes retrocalculadas similares, esto posiblemente debido a que en el método de Dahl-Lea se hace uso de la relación lineal con intercepto en el origen, y en el método del intercepto biológico se utilizan valores de  $L_0$  y  $R_0$  muy cercanos a 0. Los métodos de Fraser-Lee y BPH también produjeron resultados similares.

Aunque el método de regresión produjo longitudes retrocalculadas con diferencias menores respecto a las observadas para los grupos de edad 1 y 2, también produjo diferencias grandes para los grupos de edad 4 al 6 y 8. En contraste, los métodos en

los que resultaron diferencias menores entre las longitudes observadas y retrocalculadas fueron el alométrico 2, Fraser-Lee y BPH.

Con el método alométrico 2, las longitudes retrocalculadas en cada grupo de edad presentaron las diferencias menores respecto a las longitudes observadas en comparación con el resto de los métodos de retrocálculo utilizados (Tablas XV, XVI y XVII). Sobre la base de este resultado las longitudes retrocalculadas con el método alométrico 2 fueron las que se utilizaron para estimar los parámetros de crecimiento individual del modelo de von Bertalanffy para diferentes niveles de corte de las espinas.

### **7.7 Crecimiento individual**

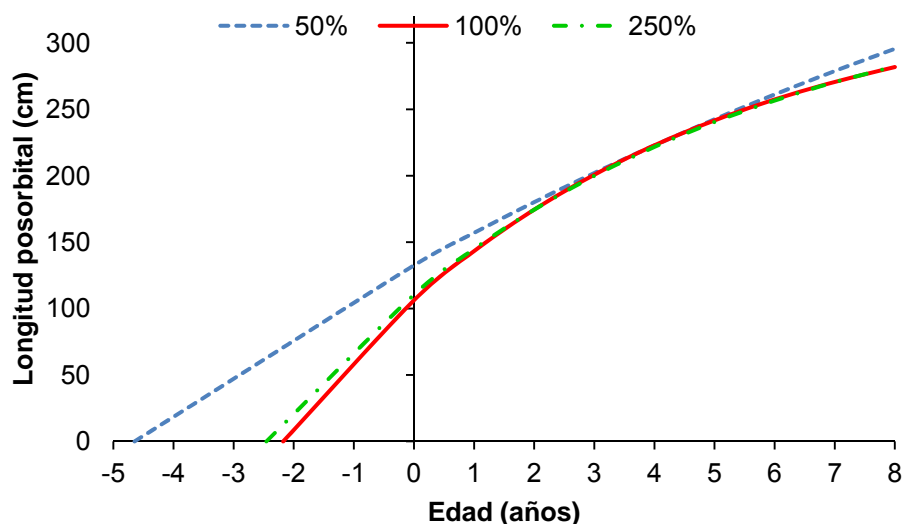
Los parámetros del modelo de von Bertalanffy que se presentan en esta sección fueron estimados con las longitudes posorbitales observadas y las retrocalculadas con el método alométrico 2, en los análisis también fue incluida la longitud de la larva más pequeña de marlin azul reportada (0.29 cm, Ueyanagi y Yabe, 1959).

Los parámetros del modelo de crecimiento de von Bertalanffy estimados para cada nivel de corte (50 %, 100 % y 250 %) se presentan en la tabla XVIII y las curvas de crecimiento resultantes en la figura 13. Se observa que los parámetros de crecimiento estimados a partir de los cortes al 50 % tuvieron la mayor longitud máxima promedio ( $L_{\infty}$ ), la menor tasa de crecimiento ( $k$ ) y que la edad hipotética cuando la longitud es igual a 0 ( $t_0$ ) fue subestimada. Los parámetros de crecimiento estimados a partir de los cortes al 100 % y 250 % fueron similares. Estas curvas comparadas con la del 50 %, presentaron longitud máxima promedio menor, tasa de crecimiento mayor y  $t_0$  mayor.

La comparación de las tres curvas de crecimiento mediante el análisis de la suma de cuadrados residuales expuso diferencias significativas ( $F_{(6,1620)} = 48.10, p < 0.05$ ).

**Tabla XVIII.** Valores de los parámetros del modelo de crecimiento de von Bertalanffy de hembras de marlin azul *Makaira nigricans* desembarcadas en Cabo San Lucas, B.C.S., en el periodo 2005-2006 estimados a través del uso de cortes transversales obtenidos desde la base y sobre el eje principal de la espina al 50 %, 100 % y 250 % de la distancia entre las apófisis inferiores de la misma espina. SCR: suma de cuadrados residuales del ajuste de cada modelo.

Nivel de Corte	$L_{\infty}$	$k$	$t_0$	SCR
50 %	597.40	0.0539	-4.64	149162
100 %	341.77	0.1711	-2.17	121777
250 %	354.75	0.1519	-2.45	94612



**Figura 13.** Curvas de crecimiento de hembras de marlin azul *Makaira nigricans* desembarcadas en Cabo San Lucas, B.C.S. en el periodo 2005-2006. Cada curva fue estimada a través del uso de diferentes cortes transversales obtenidos desde la base y sobre el eje principal de la espina al 50 %, 100 % y 250 % de la distancia entre las apófisis inferiores de la misma espina.

La prueba  $T^2$  de Hotelling reveló que existen diferencias significativas en el crecimiento [ $T^2 > T_0^2$ ] en todas las posibles comparaciones entre niveles de corte (Tabla XIX), asimismo, los 3 parámetros ( $L_{\infty}$ ,  $k$ ,  $t_0$ ) mostraron diferencias significativas ( $F_{L_{\infty}}, F_k, F_{t_0} > F_{\alpha}$ ). Las diferencias mayores en los parámetros resultaron entre los niveles de corte 50 %-100 % y 50 %-250 %, las diferencias menores entre los niveles



de corte 100 %-250 %. Lo anterior hizo evidente que los parámetros que fueron estimados a partir del nivel de corte al 50 % presentaron las diferencias mayores respecto a los obtenidos con los otros niveles, y que los parámetros de crecimiento obtenidos de estos dos últimos niveles de corte son los que presentan las diferencias menores, es decir, son parecidos.

**Tabla XIX.** Resultados de la prueba  $T^2$  de Hotelling para las comparaciones de los parámetros de crecimiento del modelo von Bertalanffy de hembras de marlin azul *Makaira nigricans* desembarcadas en Cabo San Lucas, B.C.S., en los años 2005 y 2006. Los parámetros fueron estimados a partir de cortes de la cuarta espina dorsal en los niveles al 50 %, 100 % y 250 % de la distancia entre las apófisis inferiores de la misma espina.

Comparación entre niveles de corte	$T^2$	$T_0^2$	$F_{\alpha(0.05)}$	$F_{L\infty}$	$F_k$	$F_{t_0}$
50 % - 100 %	21007.27	7.85	2.61	212.69	1372.05	1646.33
50 % - 250 %	14913.80	7.85	2.61	186.63	1025.57	1257.56
100 % - 250 %	759.99	7.85	2.61	22.03	45.11	105.87

Sobre la base de los resultados aquí presentados, el modelo que representa adecuadamente el crecimiento individual de las hembras de marlin azul, es el que se obtuvo a partir del nivel de corte al 250 %. Los parámetros de este modelo sugieren que el crecimiento de las hembras de marlin azul es muy acelerado en los primeros años de su vida ya que alcanza alrededor del 50 % (175 cm) y 56 % (200 cm) de su longitud máxima promedio (posorbital en cm) a la edad de 2 y 3 años respectivamente. A partir de la edad 3 el crecimiento se reduce sustancialmente.

## 8. DISCUSIÓN

### 8.1 Muestreo

Prince y Brown (1991) se refieren a los peces de pico como "especies de ocurrencia ocasional", lo que resulta en una evidente falta de información sobre sus movimientos, patrones de distribución e historia de vida básica. Esta situación fue evidente en Cabo San Lucas donde se observó una marcada estacionalidad en las

capturas de marlin azul, principalmente durante los meses de julio a noviembre. Incluso durante la temporada de captura de esta especie, un número bajo de peces fueron desembarcados durante los muestreos.

El mayor número de muestras para este estudio se obtuvo durante los meses más cálidos de los años analizados (2005-2009). Un patrón similar fue reportado previamente por Ortega-García *et al.* (2006) para los años de 1990 a 2002 en la misma área de estudio. Estos autores mostraron que las tasas de captura durante verano y otoño se incrementan en relación con la temperatura superficial del mar, por lo que sugirieron la preferencia del marlin azul por aguas cálidas.

En otras áreas del Pacífico también se han reportado capturas estacionales de marlin azul. Royce (1957) señaló que al norte del área ecuatorial la ocurrencia estacional del marlin azul sugiere un movimiento de verano hacia el norte seguido por un regreso al sur al final del otoño. Hopper (1990) reportó un cambio estacional en el número y composición de tallas de la captura de marlin azul en aguas hawaianas, donde ocurrieron capturas altas en verano dominadas típicamente por machos maduros que se caracterizaron por ser de tamaño más pequeño que las hembras, con capturas escasas en otoño con pobre representación de las clases de talla, y capturas escasas en primavera dominadas por peces grandes. Para esta misma área, Strasburg (1970) también reportó estacionalidad en las descargas de marlin azul, con las capturas más altas en el verano y las más bajas en el invierno. Nakamura (1985) y Skillman (1989) reportaron que el stock de marlin azul en el Pacífico muestra un patrón de migración estacional norte-sur, el cual corresponde cercanamente al desplazamiento estacional de la isoterma de 24 °C de la superficie oceánica. Esta migración estacional acarrea un gran número de individuos de marlin azul dentro de aguas hawaianas durante los meses de verano, lo que coadyuva al incremento en las descargas comerciales y recreacionales con máximos durante julio y agosto (Mitsuyasu, 1992).

Durante los muestreos realizados en Cabo San Lucas fueron encontradas solamente hembras, lo que sugiere que el marlin azul pudiera encontrarse segregado sexualmente. Este comportamiento fue reportado anteriormente para el marlin azul en otras áreas del Pacífico (Strasburg, 1970). Diferencias en el comportamiento migratorio de machos y hembras de marlin azul fueron propuestas por Nakamura (1949) y Nakamura *et al.* (1953) para explicar la distinta aparición estacional de cada sexo en las áreas de pesca. Howard y Ueyanagi (1965) sugirieron una migración diferencial por sexo, con los machos migrando más activamente que las hembras.

Ninguna de las hembras muestreadas en Cabo San Lucas mostró signos de actividad reproductiva. Es ampliamente aceptado que la presencia de huevos y larvas de peces indica proximidad al área de desove (Fuiman y Werner, 2002). En el Pacífico central oriental no se han registrado larvas de marlin azul (e.g. Ambrose *et al.*, 2000, 2002a, 2002b). Estudios centrados en la biología reproductiva del marlin azul en aguas hawaianas (Hopper, 1990) y en el suroeste de Japón (Shimose *et al.*, 2009) indican la presencia de una área de desove importante en el Pacífico noroccidental (al este de las Filipinas y Taiwán, y al suroeste de Japón). Esta conclusión fue apoyada por la ocurrencia de larvas de marlin azul (Ueyanagi y Yabe, 1959; Nishikawa *et al.*, 1985). Hopper (1990) encontró en aguas hawaianas un número mayor de machos que de hembras (proporción de 7:1) durante la época reproductiva en los meses de verano, en tanto que durante la misma época en el área de Cabo San Lucas las capturas que se registran están compuestas mayormente por hembras sexualmente inmaduras (Ortega-García *et al.*, 2006). Sobre la base de esos reportes y la aceptación de que el área de reproducción del marlin azul en el Pacífico ocurre sólo en aguas del Pacífico noroccidental (Nakamura, 1985), pudiera sugerirse que la ausencia de machos y de hembras maduras alrededor de la punta de la península se debe a que estos posiblemente estén migrando hacia el área de reproducción en el Pacífico occidental, por lo que las hembras capturadas cerca de la punta de la península de Baja California no migran al área de reproducción porque no muestran signos de actividad sexual. Cyr *et al.* (1990) sugirieron que las hembras inmaduras no son frecuentes en las áreas de

desove ya que estas generalmente migran hacia áreas donde el desove no ocurre. Por su parte, Abitia-Cárdenas (1992) reportó que la ocurrencia del marlin azul en el área de Cabo San Lucas, B.C.S. no está asociada a procesos reproductivos, por lo que sugiere que la presencia de la especie en la zona podría estar relacionada a aspectos alimentarios y medioambientales.

La presencia de individuos de tallas menores a 170 cm de longitud posorbital en las descargas fue escasa y no se encontraron individuos menores a 150 cm. Esto puede explicarse por el hecho de que las muestras provienen de las capturas obtenidas por la flota deportiva, la cual dirige su esfuerzo sobre organismos de tallas grandes, por lo que la obtención de muestras de individuos pequeños rara vez puede llevarse a cabo. Los individuos de tallas superiores a 250 cm de longitud posorbital también fueron escasos debido a que su disponibilidad es baja en el área de estudio.

## **8.2 Evaluación del crecimiento alométrico entre las dimensiones de las espinas de la aleta dorsal y la longitud posorbital de los peces**

Las espinas de las aletas son las estructuras duras más adecuadas para usarse en la estimación de la edad y parámetros de crecimiento individual de peces de pico, y son las estructuras utilizadas más comúnmente en la estimación de parámetros biológicos para la evaluación de stocks (Kopf *et al.*, 2010). Generalmente son más fáciles de recolectar y procesar que los otolitos y vértebras, su extracción no disminuye el valor económico de los peces y pueden almacenarse fácilmente para futuras reexaminaciones (e.g. Beamish, 1981; Hill *et al.*, 1989; Felizola-Freire *et al.*, 1999; Sun *et al.*, 2002; Chiang *et al.*, 2004; Kopf *et al.*, 2010). Los otolitos de peces de pico son pequeños y exhiben patrones de crecimiento complejos a lo largo de tres ejes, lo cual dificulta el conteo de marcas, además su preparación es costosa (Prince *et al.*, 1991; Radtke, 1983); las escamas son estructuras imprácticas para la estimación de la edad porque no despliegan marcas de crecimiento claras y otros huesos tales como vértebras no crecen en proporción a la longitud del cuerpo (Hill *et al.*, 1989).

La variación morfológica interna y externa de las espinas de peces de pico ha conducido a los investigadores a seleccionar una variedad de espinas diferentes como la más adecuada para la estimación de la edad (Kopf *et al.*, 2008, 2010). Las espinas más adecuadas para la estimación de la edad deben mostrar el área legible más grande relativa al área vascularizada, mostrar claramente el mayor número de anillos (Panfili *et al.*, 2002), y deben de crecer en proporción a la longitud corporal de los peces (Hill *et al.*, 1989). Idealmente debería seleccionarse aquella que presente el crecimiento más cercano a la isometría para utilizarse en el retrocálculo de longitudes y estimación de los parámetros de crecimiento individual.

El crecimiento entre las distintas dimensiones de la zona basal de las cinco primeras espinas de la aleta dorsal y la longitud posorbital de los peces fue alométrico negativo. Todos los coeficientes de alometría ( $f$ ) obtenidos de las relaciones entre las distancias medidas en las espinas (Tabla I) y la longitud posorbital del marlin azul fueron menores de 1 (Tabla III), indicando que las espinas de la aleta dorsal del marlin azul crecen a mayor tasa de lo que crecen los organismos en longitud posorbital. El crecimiento de otras estructuras calcificadas de los peces, como las escamas, es alométrico negativo (crecimiento relativamente más rápido que el crecimiento del cuerpo del pez), mientras que el crecimiento del otolito muestra alometría positiva (crecimiento relativamente menor que el crecimiento del cuerpo del pez) (Panfili *et al.*, 2002).

La cuarta espina de la aleta dorsal del marlin azul es la estructura más adecuada para emplearse en la estimación de la edad y los parámetros de crecimiento individual. El crecimiento entre esta espina y los peces fue la que presentó coeficientes más cercanos a la isometría, lo que la hace la estructura más adecuada para utilizarse en la estimación de la edad, retrocálculo de longitudes y parámetros de crecimiento individual. Además, estudios preliminares indican que las espinas de las aletas del marlin azul del Pacífico proveen estimaciones de edad más precisas y son más fáciles de recolectar y procesar que los otolitos sagita y vértebras (Hill *et al.*, 1989). Por otra parte, la selección de la cuarta espina de la aleta dorsal es

consistente con los criterios de un área legible grande relativa al área vascularizada en los cortes transversales y muestran marcas de crecimiento claramente visibles en contraste con lo que fue observado en otras espinas de la aleta dorsal de marlin azul, incrementando la posibilidad de contar y medir las marcas de crecimiento. La selección de esta estructura difirió de la de otros investigadores. Hill *et al.* (1989) usaron la sexta espina de la aleta dorsal para el marlin azul del Pacífico, Prince *et al.* (1984) utilizaron la quinta espina de la aleta dorsal del marlin azul del Atlántico, pero esta discrepancia es común entre investigadores (Prince y Pulos, 1983; McGowan *et al.*, 1987). Aunque la selección de la espina es importante, es igualmente importante usar consistentemente la misma estructura para evitar sesgos en la estimación de la edad y los parámetros de crecimiento individual. Las espinas de la aleta dorsal han sido usadas extensiva y exitosamente para estimar la edad de otras especies de la familia Istiophoridae, como el marlin rayado (*Kajikia audax*) (Melo-Barrera *et al.*, 2003; Melo-Barrera y Félix-Uraga, 2004; Kopf *et al.*, 2010), pez vela (*Istiophorus platypterus*) (Alvarado-Castillo y Félix-Uraga, 1998; Chiang *et al.*, 2004), y marlin negro (*Makaira indica*) (Speare, 2003).

### **8.3 Verificación de la posición anatómica de la espina recolectada**

La ausencia de peces de tallas pequeñas en las capturas hace evidente que para obtener estimaciones de crecimiento individual a través de las muestras recolectadas, es necesario realizar el retrocálculo de longitudes utilizando consistentemente la misma espina. Aunque no se conoce ningún reporte en donde se contraste la morfometría de espinas de posición anatómica equivalente para machos y hembras de marlin azul, y nuestro material no nos permite probar diferencias o similitudes, es reconocido que el marlin azul exhibe diferencias significativas en crecimiento entre sexos (e.g. Skillman y Yong, 1976; Nakamura, 1985; Hill *et al.*, 1989; Hopper, 1990; Wilson *et al.*, 1991; Mitsuyasu, 1992). Para otras especies de peces de pico con dimorfismo sexual en el crecimiento, García y Santos (2012) realizaron un análisis de la variación entre caracteres morfométricos de la segunda espina de la aleta anal para delinear stocks de pez espada *Xiphias gladius* en el océano Atlántico. Estos autores reportaron comparaciones entre sexos

para cada área y utilizando datos agrupados. Mostraron que en la mayoría de las relaciones morfométricas establecidas entre la longitud del pez espada y las mediciones de la estructura, no existieron diferencias estadísticamente significativas entre sexos, siendo la excepción la relación entre la longitud del pez y el ancho de la zona basal de la espina utilizando datos agrupados. Esta última medida del rayo de la aleta anal del pez espada es similar a nuestra medida D1 para las espinas de la aleta dorsal del marlin azul. La importancia de esta medida de las espinas se discute más adelante. La falta de más información sobre comparaciones morfométricas de espinas de las aletas por sexos nos hace sugerir que los resultados prácticos del Cuadro 1 (sección 7.3.3, i.e. clave para discriminar entre la cuarta y la quinta espina) sólo deberán ser utilizados para discriminar y verificar espinas de la aleta dorsal de hembras de marlin azul. Sin embargo, la metodología es replicable en estructuras homólogas para machos de marlin azul, en otras especies de peces de pico, entre otras espinas de las aletas que también son usadas para estudios de edad y crecimiento (e.g. espinas de la aleta anal de pez espada), e inclusive para estructuras análogas en otros grupos de peces.

La distancia entre las apófisis inferiores de la espina (D1) y la distancia entre las apófisis superiores de la espina (D2) son las características morfológicas que en mayor medida contribuyen en la discriminación de las espinas. Las medidas D1 y D2 son reconocidas por el método MT, la proporción entre ellas por el método PR, mientras que la posición de las landmarks c y d que delimitan D1 son reconocidas por el método MG. Este resultado es relevante ya que la distancia D2 actualmente es utilizada en estudios de edad de peces de pico para localizar el nivel de corte en espinas de la aleta dorsal de machos y hembras de las especies del género *Kajikia* (Kopf *et al.*, 2010; Kopf y Davie, 2011), *Istiophorus platypterus* (Chiang *et al.*, 2004), así como en espinas de la aleta anal de *Makaira nigricans* (Drew *et al.*, 2006) y *Xiphias gladius* (Sun *et al.*, 2002; DeMartini *et al.*, 2007). En la literatura la medida D2 frecuentemente es denominada como la longitud de la base del cóndilo o el ancho máximo de la base del cóndilo. Para la medida D1 fue mencionado anteriormente que el ancho de la zona basal de los rayos de la aleta anal del pez espada es un

carácter morfométrico que muestra diferencias significativas entre sexos (García y Santos, 2012). Además, se han descrito diferentes relaciones entre la longitud de los peces y el radio de cortes transversales de espinas de las aletas de machos y hembras utilizando espinas de la aleta anal en *Xiphias gladius* (DeMartini *et al.*, 2007) y espinas de la aleta dorsal en *Makaira nigricans* (Hill *et al.*, 1989) que refuerzan nuestra sugerencia que la clave para discriminar entre la cuarta y quinta espinas de la aleta dorsal sólo debería ser utilizada para discriminar y verificar espinas de hembras de marlin azul.

Los tres métodos utilizados para la discriminación de espinas coincidieron en clasificar a las mismas 136 espinas de las 174 recolectadas en el periodo 2005-2006 como espina cuatro. Estas espinas pueden ser utilizadas de manera confiable en la estimación de la edad y parámetros de crecimiento individual, el resto de espinas no pueden ser utilizadas para este propósito. Utilizar tres métodos para verificar la posición de las espinas recolectadas es similar al procedimiento para verificar la edad asignada, donde el conteo de marcas de crecimiento se realiza de manera independiente por dos lectores, en el caso donde las lecturas obtenidas no coinciden, se realiza una nueva lectura de manera conjunta y si persiste el desacuerdo entre el número de marcas de crecimiento asignado por cada lector, el ejemplar se excluye de los análisis. En el caso de la verificación de la posición de las espinas, si los tres métodos no coinciden en la clasificación de algunas espinas, estas se descartan de análisis posteriores. Además, que diferentes métodos nos lleven a los mismos resultados, le da solidez al análisis y nos da confianza de utilizar la clave generada en este estudio para verificar la posición anatómica de las espinas.

#### **8.4 Establecimiento del nivel de corte**

El nivel de corte más adecuado para estimar la edad, realizar el retrocálculo de longitudes y estimar los parámetros de crecimiento individual del marlin azul, es el que se obtiene al marcar desde la base y sobre el eje principal de la cuarta espina de la aleta dorsal 2.5 veces la distancia entre las apófisis inferiores (D1) de la misma espina. El crecimiento entre el diámetro de ese nivel de corte y la longitud posorbital



de los organismos fue el que más se aproximó a la isometría, por lo que es el nivel que se sugiere para obtener los cortes transversales de la cuarta espina de la aleta dorsal y lograr una estimación confiable de los parámetros de crecimiento individual a través del uso de longitudes retrocalculadas. Cabe aquí volver a puntualizar que el supuesto básico de los procedimientos de retrocálculo es el crecimiento isométrico entre la estructura dura utilizada para la estimación de la edad y la longitud corporal de los organismos (Carlander, 1981).

Dado que la morfología de las espinas cambia con la altura (su grosor o diámetro se reduce de la base a la punta), los cortes obtenidos a diferentes alturas de la misma modifican el radio de los cortes de las espinas y la distancia entre marcas de crecimiento. Kopf *et al.* (2010) recomiendan que después de que se selecciona la espina más adecuada para estimar la edad, al menos alguna forma de estandarización debe ser aplicada para que los cortes se obtengan del mismo nivel usando criterios consistentes.

En la mayoría de los estudios previos se ha reportado que los niveles inferiores de las espinas más largas o gruesas (Hill *et al.*, 1989; Speare, 2003) son los más adecuados para la estimación de la edad. Una forma empírica para estandarizar la posición de dónde obtener los cortes en espinas de peces de pico ha sido utilizando niveles relativos a la distancia entre sus apófisis superiores (Ehrhardt, 1992; Chiang, 2004). También se han utilizado proporciones relativas de la longitud de las espinas (Hill *et al.*, 1989; Speare, 2003), puntos de referencia externos (DeMarti *et al.*, 2007), o no se han utilizado procedimientos de estandarización (Davie y Hall, 1990; Hoolihan, 2006). Kopf *et al.* (2010) reportaron que entre  $\frac{1}{4}$  y 1 vez la distancia entre las apófisis superiores de la espina es el nivel más adecuado para obtener secciones transversales de las espinas para la estimación de la edad del marlin rayado. En ninguno de los estudios previos se reporta haber evaluado el crecimiento (isométrico o alométrico) entre el diámetro del nivel de corte de la espina y la longitud corporal de los organismos para seleccionar el nivel de corte más adecuado para utilizarse en los estudios de edad y crecimiento.

### **8.5 Conteo de marcas de crecimiento y estructura por edades**

Las marcas de crecimiento fueron notoriamente perceptibles en los cortes transversales de la cuarta espina de la aleta dorsal utilizados en este estudio. Tanto las bandas opacas como las hialinas se observaron y distinguieron claramente, por lo que el conteo de las mismas fue relativamente fácil, lo cual fue evidenciado por el valor pequeño del coeficiente de variación promedio ( $CV = 2.04 \%$ ) que indica una concordancia elevada entre los conteos efectuados de manera independiente por dos lectores y refleja consistencia en lo observado. Campana (2001) menciona que no hay un valor *a priori* de  $CV$  que pueda ser designado como nivel objetivo para los estudios de estimación de edad debido a que es altamente influenciado por las especies y la naturaleza de la estructura dura, y no sólo por el lector de las marcas de crecimiento, pero sugiere que un  $CV$  de  $5 \%$  sirve como punto de referencia, valores menores indican una elevada concordancia entre los conteos de marcas de crecimiento entre lectores. Valores del  $CV$  entre  $10$  y  $15 \%$  son comunes para peces pelágicos grandes (DeMartini *et al.*, 2007). Cortes transversales de espinas con un  $CV$  mayor del  $15 \%$  deberían ser reexaminados y descartados si no se puede alcanzar un consenso en la edad estimada (Kopf *et al.*, 2010).

De manera general, las bandas opacas son más anchas que las bandas hialinas y conforme se incrementa el número de marcas en los cortes, el ancho de cada banda disminuye. Una marca de crecimiento completa consiste de una banda opaca amplia (crecimiento rápido) seguida por una banda hialina estrecha (crecimiento lento) (Berkley y Houde, 1983; Fablet, 2006). En ocasiones se encontraron marcas de crecimiento falsas, las cuales fueron detectadas fácilmente debido a que eran muy difusas y no formaban un anillo completo alrededor del foco de los cortes transversales de la espina. Las marcas de crecimiento falsas han sido reportadas como segmentos parciales que no se extienden alrededor de los cortes de las espinas (Berkley y Houde, 1983; Speare, 2003).

En algunos cortes se observaron bandas dobles o triples, pero fueron consideradas como una sola marca de crecimiento durante el conteo ya que todas las bandas en

esos cortes presentaban la misma característica. Este patrón de marcas dobles o triples ha sido observado en otros peces de pico como el pez vela (Hedgepet y Jolley, 1983; Alvarado-Castillo y Félix-Uraga, 1998; Chiang *et al.*, 2004; Ramírez-Perez, 2005), el marlin rayado (Melo-Barrera *et al.*, 2003; Davie y Hall, 1990) y el pez espada (Berkeley y Houde, 1983; Tserpes y Tsimenides, 1995).

La mayor dificultad relativa para contar las marcas de crecimiento en los cortes de espina de marlin azul fue debida a la presencia de una matriz vascularizada en el núcleo de los cortes, la que tiende a oscurecer las primeras marcas de crecimiento, principalmente en peces viejos. Este oscurecimiento o enmascaramiento de marcas de crecimiento por la matriz vascularizada es frecuentemente reportado en otros peces de pico cuando se utilizan espinas de la aleta dorsal o anal para la estimación de la edad (Prince *et al.*, 1984, 1986, 1987; Yatomi, 1990; Alvarado-Castillo y Félix-Uraga, 1998; Ramírez-Pérez, 2005).

Hill *et al.* (1989) propusieron un método estadístico para reemplazar las marcas de crecimiento que tienden a destruirse por la expansión de la matriz vascularizada en las espinas de la aleta dorsal y anal de organismos viejos. El método se basa en utilizar las mediciones de los radios de las marcas de crecimiento realizados en cortes de espina de organismos jóvenes en los que las primeras marcas son visibles. A pesar de que en los cortes utilizados para la estimación de edad del presente trabajo también se observó la matriz vascularizada, no fue necesario utilizar este método para reemplazar marcas de crecimiento debido a que la matriz vascularizada abarcaba sólo una pequeña porción del núcleo de los cortes, por lo cual, se consideró que las primeras marcas de crecimiento no fueron destruidas y pudieron contarse.

Jakes-Cota (2008) utilizó cortes de la cuarta espina de la aleta dorsal de los mismos organismos utilizados en este trabajo que fueron recolectados en los años 2005 y 2006 para inferir la periodicidad de formación de las marcas de crecimiento, encontró que el conjunto de una banda opaca seguida por una hialina tiene periodicidad anual.

Es así que las edades estimadas para las hembras de marlin azul analizadas en este estudio fueron de 1 a 8 años, siendo las hembras de 2 y 3 años las más abundantes, mientras que las de mayor edad fueron escasas (Fig. 9).

En la Tabla XX se resumen los estudios previos de edad y crecimiento del marlin azul. Es necesario señalar que en algunos de los estudios las estimaciones se realizaron utilizando métodos y estructuras duras diferentes a las analizadas en este trabajo. A excepción del estudio realizado para juveniles del Atlántico (Prince *et al.*, 1991) las estimaciones previas de edad para el marlin azul no fueron validadas. Sin esta validación, los datos de edad no pueden ser utilizados confiablemente para la administración de stocks (Beamish y McFarlane, 1983).

Hill *et al.* (1989) reportaron haber realizado estimaciones preliminares de edad señalando que los machos de marlin azul del Pacífico tienen una longevidad de al menos 18 años y las hembras de al menos 27 años. No obstante, estos autores reportaron que el macho y la hembra más viejos que encontraron fueron de 18 y 22 años de edad respectivamente. Mediante el análisis de frecuencia de tallas de marlin azul del Pacífico Skillman y Yong (1976) estimaron edades de 1 a 5 años en machos y de 1 a 8 años en hembras, señalando que los individuos de las edades 1 a 3 fueron escasos.

Para el marlin azul del Atlántico Prince *et al.* (1984) reportaron de 1 a 12 marcas de crecimiento en machos y de 3 a 21 marcas de crecimiento en hembras mediante el conteo de supuestas marcas anuales en otolitos y espinas de la aleta dorsal. En contraste, McGowan *et al.* (1987) estimó edades de 2 a 10 años usando espinas de la aleta dorsal. Por su parte Prince *et al.* (1991) estimaron edades de 21 a 495 días (1.4 años) sobre la base de contar marcas diarias en otolitos de juveniles, adultos jóvenes y adultos maduros, haciendo notar que sus datos sólo cubren la fase inicial de crecimiento de los adultos.

En un estudio comparativo del marlin azul del Atlántico y del Pacífico realizado por Wilson *et al.* (1991), estimaron edades de 1 a 19 años en machos y de 2 a 17 años en hembras del Atlántico, mientras que en el marlin azul del Pacífico reportaron edades de 2 a 17 años en machos y de 3 a 21 años en hembras. Concluyeron que el 53 % del marlin del Pacífico tuvo edades estimadas de 5 años o menores y que la abundancia de los grupos de edad mayor disminuía por la mortalidad natural y por pesca. También mencionaron que no sería sorprendente encontrar hembras excediendo los 30 años de edad.

Para el marlin azul del Océano Índico, Cyr *et al.* (1990) estimaron edades de hasta 24 años para machos y hembras sobre la base del conteo de marcas de crecimiento en otolitos, además, reportaron que las hembras de 9 a 12 años dominaron la captura, mientras que los machos de 3 a 12 años fueron los más abundantes.

Otro aspecto importante que señalar es que los distintos estudios de edad reportados para la especie se llevaron a cabo en diferentes regiones geográficas y periodos de tiempo con condiciones oceánicas-climatológicas distintas (e.g. Bigg, 2003) y donde las diferentes actividades pesqueras han variado en el transcurso del tiempo. La respuesta de las poblaciones de peces a las variaciones del clima oceánico (e.g. Stenseth *et al.*, 2004), aunada al efecto que la pesca ejerce, influyen en la estructura de las poblaciones, por lo que intentar explicar las diferencias en la estructura por edades encontrada en este trabajo con la reportada por otros autores pudiera ser especulativo. Sin embargo, considerando la coincidencia reportada en trabajos previos utilizando estructuras duras para estimar la edad y sobre la base de los resultados de este estudio, se puede observar de forma general que en el área de Cabo San Lucas se capturan hembras jóvenes, sexualmente inmaduras (Ortega-García *et al.*, 2006), mientras que en el área de reproducción de la especie en el Pacífico occidental (Nakamura, 1985), particularmente en Hawái, se capturan organismos sexualmente maduros (Hopper, 1990) y de edades mayores a las encontradas en el área de Cabo San Lucas.

Para el Pacífico mexicano sólo existe el estudio realizado por Jakes-Cota (2008), en el cual se utilizaron los mismos organismos utilizados en el presente trabajo, por lo que la estructura de edades es la misma. Los resultados aquí presentados sientan las bases para que de continuar con los estudios de esta especie en años posteriores, se pueda evaluar cómo afecta la variación del clima oceánico y la pesca que se realiza en esta región en la demografía de la especie.

### **8.6 Retrocálculo de longitudes**

Las relaciones lineales entre el radio de las espinas y la longitud de los peces ( $R = a + bL$  y  $L = c + dR$ ) para los tres niveles de corte indican que el radio de las espinas se incrementa conforme los organismos aumentan en longitud. Jakes-Cota (2008) justificó el uso de la cuarta espina de la aleta dorsal para el retrocálculo de longitudes de marlin azul sobre la base de una relación positiva alta entre el radio de la espina y la longitud del pez ( $R^2 = 0.853$ ,  $p < 0.01$ , relación lineal  $L = c + dR$ ). Sin embargo, los coeficientes de esa relación lineal, al igual que los coeficientes de la relación lineal  $R = a + bL$ , se refieren al intercepto y la pendiente de las rectas calculadas, pero no brindan información acerca del tipo de crecimiento (isométrico o alométrico) entre el radio de las espinas y la longitud de los peces, por lo que su utilización en el retrocálculo de longitudes puede ser cuestionada.

De forma similar, en otros estudios donde se estimó la edad del marlin azul se ha encontrado una relación lineal entre la estructura utilizada para determinar la edad y la longitud de los organismos. Hill *et al.* (1989) observaron esta relación lineal entre el tamaño de vértebras, otolitos y espinas de la aleta anal y dorsal, y la longitud de los organismos. También que el número de marcas se incrementó con el crecimiento de cada estructura. Ambas observaciones para apoyar el empleo de estas estructuras en los estudios de edad. Prince *et al.* (1984) encontraron relaciones lineales positivas altas entre la longitud mandíbulo-furcal del marlin azul y el radio de la espina dorsal y con el peso del otolito, también entre la longitud mandíbulo-furcal y el número de marcas de crecimiento en espinas y otolitos, sugiriendo que estos datos justifican en general el uso de estas estructuras duras como una fuente de información sobre la

edad y el crecimiento. Además concluyeron que las espinas pueden ser la mejor estructura para utilizarse en el retrocálculo de longitudes comparándolas con los otolitos. En otras especies de picudos también han reportado una relación lineal entre el radio de cortes transversales de espinas dorsales y la longitud de los organismos, como en el caso del pez vela (Jolley, 1974; Alvarado-Castillo y Félix-Uraga, 1998; Felizola-Freire *et al.*, 1999; Chiang *et al.*, 2004; Ramírez-Pérez, 2005), marlin rayado (Yatomi, 1990; Melo-Barrera *et al.*, 2003), marlin blanco (Prince *et al.*, 1984) y pez espada (Sun *et al.*, 2002).

El crecimiento entre el radio de las espinas y la longitud posorbital de los peces para los tres niveles de corte fue alométrico negativo (crecimiento en radio de las espinas relativamente más rápido que el crecimiento en longitud de los peces). Lo que indica que no se cumplió el supuesto básico para el retrocálculo de longitudes. Casselman (1990) discutió que el crecimiento isométrico es solamente una etapa transitoria que rara vez y posiblemente nunca ocurre. Sobre la base de estos incumplimientos, mismos que son reiterativos en los estudios de crecimiento de los peces, en este trabajo se planteó que el crecimiento entre la longitud corporal del pez y el tamaño de la estructura dura que se pretende utilizar para estimar la edad y los parámetros de crecimiento es alométrico, por lo que bajo este supuesto se propusieron dos métodos de retrocálculo nuevos, el método alométrico 1 y el método alométrico 2.

Los coeficientes de las relaciones entre el radio de los cortes y la longitud posorbital de los organismos ( $R = a + bL$ ,  $L = c + dR$ ,  $L = eR^f$ ) fueron significativamente diferentes entre niveles de corte. Los coeficientes de esta relación fueron utilizados en las diferentes fórmulas de retrocálculo, por lo que de cada nivel de corte se obtuvieron diferentes longitudes retrocalculadas y por ende diferentes estimaciones de los parámetros de crecimiento individual.

Como fue mencionado anteriormente, Jakes-Cota (2008) validó la periodicidad con que se forman las marcas de crecimiento en los cortes transversales de la cuarta espina de la aleta dorsal de ejemplares marlin azul muestreados en Cabo San Lucas.

La validación correcta de la periodicidad de formación de las marcas de crecimiento es obligatoria, independientemente de la estructura dura que se esté utilizando (Araya y Cubillos, 2002; Panfili *et al.*, 2002). Es esencial conocer cuando se formó cada una de las marcas de crecimiento en las estructuras utilizadas con el fin de que las longitudes retrocalculadas a partir de dichas marcas puedan utilizarse para el ajuste de alguna curva de crecimiento (Smith, 1983).

No se encontró evidencia de que las marcas en los cortes de espina cambiaran sus dimensiones (e.g. radio o diámetro) después de haberse formado. Las longitudes retrocalculadas de los peces estarían sesgadas si el tamaño de la marca de crecimiento cambiara después de ser depositada (Panfili *et al.*, 2002). En el caso de los otolitos, a diferencia de las espinas, generalmente se cree que las estructuras no cambian después de su deposición, en parte porque el otolito se considera como una estructura inerte, no celular. Por otro lado, las escamas pueden tener reabsorción, especialmente en peces que se acercan a la longitud asintótica (Casselman, 1990), y por esta razón las longitudes retrocalculadas a partir de escamas pueden estar sesgadas.

Con el retrocálculo fue posible incrementar el número de registros de longitud para los primeros grupos de edad y fueron estimadas longitudes para el grupo de edad 7, no presente en los muestreos realizados. Cuando los parámetros del modelo de crecimiento individual se estiman utilizando longitudes por edad de las capturas de la pesca deportiva, es frecuente sobreestimar la longitud de los primeros grupos de edad, debido a que este tipo de pesca está dirigida a capturar organismos de tallas grandes y por lo mismo ejemplares de tallas pequeñas son escasos o están completamente ausentes.

Las longitudes retrocalculadas fueron menores a las longitudes observadas para los tres niveles de corte en la cuarta espina de la aleta dorsal (fenómeno de Lee, Ricker, 1975). Esto puede deberse a tasas de mortalidad diferenciales por talla o edad, métodos de muestreo no aleatorios o métodos de retrocálculo inadecuados (Bagenal



y Tesch, 1978). Para interpretar las diferencias entre las tallas observadas y las calculadas, también debe considerarse que las longitudes observadas por grupo de edad incluye todas las longitudes de los organismos de un grupo de edad hasta antes de pasar al siguiente grupo. Por ejemplo, para el grupo de edad 3 se incluyen las tallas para individuos cuya edad cumplida es de 3 años y las tallas de peces de edades intermedias hasta antes de que cumplan 4 años. Las longitudes retrocalculadas son estimadas para cuando cumplieron o iniciaron la edad. Casselman (1987) sugiere construir la relación entre el radio de la estructura utilizada para estimar la edad y la longitud de los peces, y llevar a cabo el retrocálculo de longitudes, a partir de muestras recolectadas justo antes de la formación de las marcas de crecimiento.

Todos los métodos de retrocálculo estimaron diferentes longitudes a edades previas. Francis (1990) sostiene que utilizar diferentes métodos de retrocálculo podía resultar en diferencias grandes en las longitudes retrocalculadas. El método alométrico 2 fue el que se utilizó para el retrocálculo de longitudes de marlin azul utilizando cortes transversales de la cuarta espina de la aleta dorsal. Con este método las longitudes retrocalculadas promedio por grupo de edad presentaron las diferencias menores respecto a las longitudes observadas promedio por grupo de edad. En la fórmula de retrocálculo de este método se introdujo la corrección del crecimiento alométrico a través del uso del coeficiente de alometría ( $f$ ). Un sólo método de retrocálculo no puede considerarse como mejor que todos los demás y no hay un procedimiento específico que pueda ser recomendado como tal. Sin embargo, deben considerarse los supuestos y limitaciones de los diferentes procedimientos de retrocálculo, y cuidadosamente verificar el patrón de las longitudes retrocalculadas contra los patrones de las longitudes observadas a edades comparables. Francis (1990) recomendó el uso de más de un procedimiento durante el retrocálculo por varias razones. En primer lugar, permitiría la posibilidad de determinar qué modelo coincide mejor con los datos observados. En segundo lugar, la variabilidad en las longitudes retrocalculadas utilizando diferentes métodos podría dar un indicio de la variabilidad en las longitudes retrocalculadas resultantes de la elección del procedimiento.

Jobling (2002) sugirió que el método a utilizar dependerá del tipo de relación entre la longitud del pez y las dimensiones de la estructura dura utilizada en el procedimiento de retrocálculo.

### **8.7 Crecimiento individual**

Se encontró un efecto claro del crecimiento alométrico entre la espina de la aleta dorsal y la longitud de los organismos en la estimación de los parámetros de crecimiento individual. Esta conclusión se basa en que: i) el crecimiento entre las dimensiones de las espinas (Tabla I) y la longitud de los organismos fue alométrico (Tabla III); ii) el crecimiento entre los radios de los cortes de cada uno de los 3 niveles (50 %, 100 % y 250 %) y la longitud posorbital de los organismos fue alométrico (Tabla XIII); iii) existieron diferencias significativas (Tabla XIV) en los coeficientes de las relaciones entre los radios de los cortes de cada uno de los 3 niveles y la longitud posorbital de los organismos ( $R = a + bL$ ,  $L = c + dR$ ,  $L = eR^f$ ); iv) utilizar estos coeficientes en el retrocálculo produce que se estimen longitudes diferentes para cada nivel de corte (Tablas XV, XVI y XVII); y v) los parámetros de crecimiento individual fueron estimados utilizando esas longitudes retrocalculadas para cada uno de los tres niveles de corte, resultando parámetros significativamente diferentes (Tabla XIX).

Los parámetros que representan adecuadamente el crecimiento individual de las hembras de marlin azul y que aquí se discuten, fueron estimados a partir de las longitudes observadas y retrocalculadas por grupo de edad (método alométrico 2, nivel de corte del 250 %) junto con la longitud de la larva más pequeña reportada en la literatura.

Prince *et al.* (1987) señalaron la importancia de añadir al análisis de crecimiento la longitud de larvas para obtener una mejor estimación de  $t_0$ . Jakes-Cota (2008) recomendó incluir la longitud de la larva al eclosionar del huevo y en caso de no contar con este dato, la longitud de la larva más pequeña reportada.

Los parámetros de crecimiento para el periodo de estudio 2005-2006 sugieren que el crecimiento de marlin azul es muy acelerado en los primeros años de vida ya que pueden alcanzar hasta el 60 % de su longitud máxima promedio (posorbital en cm) a la edad de 3 años, después de esta etapa de crecimiento rápido, la tasa de crecimiento disminuye progresivamente hasta valores mínimos al llegar a los 8 años de edad.

Aunque existen diversos estudios de estimación de edad para el marlin azul (e.g. Prince *et al.*, 1984; McGowan *et al.*, 1987; Prince *et al.*, 1987; Hill *et al.*, 1989; Cyr *et al.*, 1990; Wilson *et al.*, 1991), son escasos aquellos en los que se reportan parámetros de crecimiento individual.

Prince *et al.* (1991) basados en lecturas de marcas diarias en otolitos reportan para juveniles, adultos jóvenes y adultos maduros de marlin azul del Atlántico valores de  $L_{\infty}=210$  cm,  $k=1.533$  y  $t_0=-0.15$ , pero los datos solo cubren la fase inicial del crecimiento de los adultos (hasta 1.4 años de edad). Mencionaron además que la tasa relativa de crecimiento máxima (sexos combinados, 1.66 cm/día) ocurre a una longitud de 39 cm y a una edad estimada de 50 días, después decrece continuamente hasta cerca de 0.09 cm/día a los 495 días, por lo cual sugirieron que durante su primer año de vida el marlin azul es uno de los teleósteos de más rápido crecimiento en términos de tasa absoluta de crecimiento (cm/día).

Skillman y Yong (1976) a través del análisis de frecuencia de tallas estimaron los parámetros de crecimiento del modelo de von Bertalanffy para el marlin azul del Pacífico usando dos métodos, en el primero ajustaron el modelo por el método de mínimos cuadrados a las longitudes observadas de peces de edad supuesta, en el segundo ajustaron el modelo por el método de mínimos cuadrados a las longitudes observadas y datos en intervalos de tiempo conocido; para machos reportaron  $L_{\infty}=368$  cm,  $k=0.315$  y  $t_0=0.39$  y  $L_{\infty}=298.8$  cm,  $k=0.560$  y  $t_0=0.39$  para el primer y segundo método respectivamente, y para hembras  $L_{\infty}=626.6$  cm,  $k=0.123$  y  $t_0=-0.202$  y  $L_{\infty}=540.2$  cm,  $k=0.175$  y  $t_0=-0.202$  para el primer y segundo método

respectivamente. Estos autores mencionan que para los machos, las estimaciones de  $L_{\infty}$  son más grandes que la longitud asintótica comúnmente aceptada de 300 cm, mientras que en el caso de las hembras, las curvas de crecimiento describieron bien los datos, pero las estimaciones de longitud asintótica parecen ser demasiado grandes. Por otro lado, Mitsuyasu (1992) reportó que los parámetros de crecimiento individual típicos para el marlin azul capturado en Hawái son: para machos  $L_{\infty}=276$  cm,  $k=0.285$  y  $t_0=0.106$  y para hembras  $L_{\infty}=505$  cm,  $k=0.186$  y  $t_0=-0.161$ , pero no señaló la fuente de la cual obtuvo los datos ni el método utilizado para estimar los parámetros.

En la literatura es comúnmente reportado que el marlin azul exhibe diferencias significativas en crecimiento entre sexos, donde las hembras alcanzan tallas somáticas mayores a las de los machos a una misma edad, además de que el crecimiento en machos es acelerado hasta alcanzar cerca de 200 cm de longitud (6 años de edad), después el crecimiento se vuelve muy lento y casi asintótico. En cambio, el crecimiento de las hembras reportado es variable, además continúan creciendo a través de toda su vida, pero con una disminución de la tasa de crecimiento con la edad (Wilson *et al.*, 1991; Hill *et al.*, 1989; Skillman y Yong, 1976).

Los escasos estudios donde se reportan parámetros de crecimiento para el marlin azul muestran diferentes estimaciones, mismas que pueden ser debidas a numerosas razones, incluyendo diferencias geográficas, rango de tallas analizadas, métodos de estimación de los parámetros o tamaño de las muestras (Tabla XX). Es así que los parámetros estimados por Prince *et al.* (1991) y Skillman y Yong (1976) no pueden ser directamente comparados con los estimados en el presente estudio debido a que, en el primer caso trabajaron con marlin azul juvenil, y sin discriminar sexos de adultos jóvenes y adultos maduros (de hasta 1.4 años) y en el presente estudio se utilizaron hembras (de 1 hasta 8 años). Los parámetros reportados por Skillman y Yong, (1976) tampoco pueden ser comparados directamente debido a que provienen de métodos de estimación totalmente diferentes, ya que utilizaron el análisis de frecuencias de tallas mientras que el presente estudio se basa en lecturas

de marcas en cortes de la cuarta espina de la aleta dorsal. En cambio, Mitsuyasu (1992) aunque no menciona la forma en que se estimaron los parámetros, los presenta separados por sexo. Comparando los parámetros que reportó para hembras con los de este estudio, existen diferencias en  $L_{\infty}$ ,  $k$  y  $t_0$ , posiblemente debido a que se analizaron intervalos de talla distintos.

Para que se pueda llevar a cabo la comparación de parámetros de crecimiento de marlin azul entre diferentes áreas de estudio es necesario estandarizar la metodología, que incluye desde la selección y recolecta de las espinas de la aleta dorsal, establecimiento de nivel de corte, conteo de marcas de crecimiento, validación de la periodicidad de formación de las marcas de crecimiento, entre otros aspectos, que una vez definidos y aplicados consistentemente, reducirán sesgos en la estimación. Kopf *et al.* (2008) sugirieron que es importante estandarizar las metodologías de estimación de edad y parámetros de crecimiento individual de peces de pico para que futuros modelos de crecimiento de diferentes regiones puedan ser comparables. Esos autores señalaron que ha existido una amplia variedad de métodos para estimar la edad y que muchas estimaciones difieren ampliamente entre sí, lo que es de particular importancia para especies migratorias como los peces de pico porque un solo stock puede ser estudiado por múltiples investigadores de diferentes naciones.

Debido a que pocos estudios han sido capaces de validar las estimaciones de edad y crecimiento individual de peces de pico, es incierto si las discrepancias en talla a la edad y crecimiento pueden ser atribuibles a diferencias biológicas o a diferencias metodológicas entre investigadores (Kopf *et al.*, 2010).

**Tabla XX.** Estimaciones de edad y parámetros de crecimiento individual para el marlin azul *Makaira nigricans* del Pacífico y del Atlántico reportadas en la literatura por área y periodo de estudio, sistema de muestro y método de estimación. Edad Min-Max, Edad mínima y máxima reportada; Predominantes, edades predominantes en el estudio.

Autor(es)	Área de estudio	Periodo de estudio	Procedencia de las muestras	Método	Parámetros estimados	Machos	Hembras	Ambos Sexos
Skillman y Yong, 1976	Hawái	1960-1970	Pesca palangrera	Análisis de frecuencias de tallas (2 variantes)	$L_{\infty}$	368; 298.8	626.6; 540	-
					$k$	0.31; 0.56	0.12; 0.17	-
					$t_0$	0.39; 0.39	-0.2; -0.2	-
					Edad Min-Max	1-5	1-8	-
					Predominantes	2-3	4-5	-
Hill <i>et al.</i> , 1990	Hawái	1982-1984	Torneos de pesca deportiva	Ótolitos, vértebras, espinas dorsales y anales	Edad Min-Max	1-18	1-22	-
					Predominantes	-	-	-
Mitsuyasu, 1992	Hawái	-	-	-	$L_{\infty}$	276	505	-
					$k$	0.28	0.18	-
					$t_0$	0.10	-0.16	-
Wilson <i>et al.</i> , 1991	Pacífico: Hawái	1980-1981	Pesca comercial y deportiva	Ótolitos	Edad Min-Max	2-17	3-21	1-14
	Atlántico: Golfo de México, Bahamas y Puerto Rico	1981-1984	Pesca comercial y pesca deportiva	Ótolitos	Predominantes	2-9	3-9	1-4
					Edad Min-Max	1-19	2-17	3
					Predominantes	1-5	2-8	3
Prince <i>et al.</i> , 1984	Oeste del Atlántico, Mar Caribe y Golfo de México	1980-1983	Taxidermistas y torneos de pesca deportiva	Ótolitos y espinas dorsales	Edad Min-Max	1-12	3-21	-
					Predominantes	9-10	10-14	-
Prince <i>et al.</i> , 1991	Oeste del Atlántico, Mar Caribe y Golfo de México	1980-1983	Taxidermistas, torneos de pesca deportiva, y pesca comercial	Ótolitos (marcas diarias)	$L_{\infty}$	-	-	210
					$k$	-	-	1.53
					$t_0$	-	-	-0.15
					Edad Min-Max	-	-	0.024-1.4
					Predominantes	-	-	-
McGowan <i>et al.</i> , 1987	Atlántico	-	-	Espinass dorsales	Edad Min-Max	-	-	2-10
					Predominantes	-	-	-
Cyr <i>et al.</i> , 1990	Océano Índico	1985-1988	Pesca deportiva	Ótolitos	Edad Min-Max	0-24	0-24	-
					Predominantes	3-12	9-12	-

## 9. CONCLUSIONES

- La predominancia de hembras de marlin azul de tallas grandes (161 a 240 cm) desembarcadas por la flota deportiva en Cabo San Lucas, B.C.S. durante 2005-2009 hace evidente la necesidad de realizar el retrocálculo de longitudes para obtener datos de longitudes pequeñas o ausentes en la captura para ser utilizadas en la estimación de los parámetros de crecimiento individual.
- El crecimiento entre las espinas de la aleta dorsal (1-5) y la longitud posorbital del marlin azul es alométrico negativo (crecimiento de las dimensiones de las espinas relativamente más rápido que el crecimiento en longitud de los peces).
- La cuarta espina de la aleta dorsal del marlin azul es la estructura más adecuada para estimar la edad, realizar el retrocálculo de longitudes y estimar los parámetros de crecimiento individual. La cuarta espina es la estructura cuyo crecimiento respecto a la longitud posorbital de los peces se acercó más a la isometría.
- Los tres métodos utilizados para la discriminación de espinas de la aleta dorsal coincidieron en clasificar a las mismas 136 espinas de las 174 recolectadas en el periodo 2005-2006 como espina cuatro.
- El nivel de corte más adecuado para la estimación de la edad, retrocálculo de longitudes y parámetros de crecimiento individual del marlin azul es el equivalente al marcar a la cuarta espina de la aleta dorsal desde la base y sobre el eje principal el 2.5 veces la distancia entre sus apófisis inferiores.
- La flota deportiva de Cabo San Lucas, B.C.S durante 2005-2006 incidió sobre 7 grupos de edad (1-6 y 8), siendo los individuos de 2 y 3 años los más abundantes.

- El crecimiento entre el radio de las espinas y la longitud posorbital de los peces para los tres niveles de corte es alométrico negativo (el crecimiento del radio de las espinas es relativamente más rápido que el crecimiento en longitud de los peces). Implicando que no se cumple con la suposición básica del crecimiento isométrico entre el pez y la estructura dura para efectos del retrocálculo.
- Los coeficientes de las relaciones entre el radio de los cortes y la longitud posorbital de los organismos ( $R = a + bL$ ,  $L = c + dR$ ,  $L = eR^f$ ), son significativamente diferentes entre niveles de corte, lo que produce que las longitudes retrocalculadas también sean diferentes entre niveles de corte.
- Se recomienda al método alométrico 2 para propósitos del retrocálculo de longitudes a edades previas utilizando cortes transversales de la cuarta espina dorsal. El método presupone que el crecimiento entre la estructura dura para estimar la edad y la longitud de los peces es alométrico y utiliza una relación potencial, no una relación lineal.
- Los parámetros de crecimiento individual de las hembras de marlin azul estimados a partir de cortes transversales de diferentes niveles de la cuarta espina dorsal del marlin azul son diferentes significativamente. El crecimiento alométrico entre el radio de la espina de la aleta dorsal y la longitud de los organismos afecta la estimación de los parámetros de crecimiento individual.
- Los parámetros que definen el crecimiento individual de las hembras de marlin azul ( $L_{\infty}=354.75$ ,  $k=0.0.1519$  y  $t_0=-2.45$ ) indican que son organismos de crecimiento muy acelerado en los primeros años de vida.



## 10. BIBLIOGRAFÍA

- Abitia-Cárdenas, L.A. 1992. Espectro trófico energético del marlin rayado *Tetrapturus audax* (Philippi, 1887) y marlin azul *Makaira mazara* (Jordan y Snider, 1901), del área de Cabo San Lucas, B.C.S., México. *Tesis de Maestría*. CICIMAR-IPN. La Paz, B.C.S., México. 76 p.
- Alvarado-Castillo, R.M. y R. Félix-Uraga. 1998. Crecimiento de *Istiophorus platypterus* en la boca del Golfo de California. *Revista de Biología Tropical*, **46**(1): 115-118.
- Álvarez-Ramírez, I.M. 2003. Análisis comparativo de la morfometría de la anchoveta norteña (*Engraulix mordax* Girard, 1856. Clupeiformes: Engraulididae) de la costa occidental de Baja California y del Golfo de California. Tesis de Maestría. CICIMAR-IPN. La Paz, B. C. S., México, 85 p.
- Ambrose, D.A., R.L. Charter, H.G. Moser, y S.B. Reilly. 2000. Ichthyoplankton and station data for surface tows taken during the 1988 eastern tropical Pacific dolphin survey on the research vessels David Starr Jordan and McArthur. *NOAA-Technical Memorandum-NMFS-SWFC-288*, 40 p.
- Ambrose, D.A., R.L. Charter, H.G. Moser, S.R. Charter y W. Watson. 2002. Ichthyoplankton and station data for surface (manta) and oblique (bongo) plankton tows taken during a survey in the Eastern Tropical Pacific Ocean, July 30 - December 9, 1998. *NOAA-Technical Memorandum-NMFS-SWFSC-337*, 126 pp.
- Ambrose, D.A., R.L. Charter, H.G. Moser, B.S. MacCall y W. Watson. 2002. Ichthyoplankton and station data for surface (manta) and oblique (bongo) plankton tows taken during a survey in the Eastern Tropical Pacific Ocean July 28 - December 9, 2000. *NOAA-Technical Memorandum-NMFS-SWFSC-342*, 130 pp.
- Anónimo. 2002. Las pesquerías de atún aleta azul del Pacífico, atún albacora, pez espada, y marlin azul en el océano Pacífico, y evaluaciones de estas especies. *Comisión Interamericana del Atún Tropical*, Manzanillo, México, **69**: 1-13.

- Araya, M. y L. Cubillos. 2002. El Análisis Retrospectivo del Crecimiento en Peces y Sus Problemas Asociados. *Guyana (Concepción)*, **66**(2): 161-179.
- Aubone, A. y O.C. Wöhler, O.C. 2000. Aplicación del método de máxima verosimilitud a la estimación de parámetros y comparación de curvas de crecimiento de von Bertalanffy. *INIDEP Informe Técnico 37*, 21 p.
- Bagenal, T.B. y F.W. Tesch. 1978. Age and Growth, 101-136. *En*: Bagenal, T. (Ed.). *Methods for assessment of fish production in freshwater*. 3ra edition. Blackwell Scientific Publications, Oxford, England.
- Beamish R.J. 1981, Use of fin-ray sections to age walleye pollock, pacific cod, and albacore, and the importance of this method. *Transactions of the American Fisheries Society*, **110**: 287–299.
- Beamish, R.J. y G.A. McFarlane. 1983. The forgotten requirement for age validation in fisheries biology. *Transactions of the American Fisheries Society*, **112**: 735–743.
- Beamish, R.J. y G.A. McFarlane. 1987. Current trends in age determination methodology, 15-42. *En*: Summerfelt, R.C. y G.E. Hall (Eds.). *Age and Growth of Fish*. Iowa State University Press, Ames, Iowa, 544 p.
- Berkeley, S.A. y E.D. Houde. 1983. Age determination of broadbill swordfish, *Xiphias gladius*, from the Straits of Florida, using anal fin spine sections. *NOAA Tech. Rep. NMFS*, **8**: 137-143.
- Bernard, D.R. 1981. Multivariate analysis as a means of comparing growth in fish. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, **38**: 233-236.
- Bigg, G. R. 2003. The Oceans and Climate. 2da edición, *Cambridge University Press*, United Kingdom, 273 p.
- Breiman L., J.H. Friedman, R.A. Olshen y C.J. Stone. 1984. Classification and Regression Trees. *Wadsworth and Brooks/Cole*, Belmont, California.
- Busacker, G.P., I.A. Adelman y E.M. Goolish. 1990. Growth, 363-377. *En*: Schreck, C.B. y P.B. Moyle (Eds.) *Methods for fish biology*. American Fisheries Society, Bethesda, Maryland, 684 p.
- Campana, S.E. 1990. How reliable are growth back-calculations based on otoliths?. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, **47**:2219-2227.

- Campana, S.E. 2001. Accuracy, precision and quality control in age determination, including a review of the use and abuse of age validation methods. *Journal of Fish Biology*, **59**: 197-242.
- Carlander, K.D. 1981. Caution on the use of the regression method of back-calculating lengths from scale measurements. *Fisheries*, **6**(1): 2-4.
- Carlander, K.D. 1987. A history of scale age and growth studies of North American freshwater fish, 3-14. *En*: Summerfelt, R.C. y G.E. Hall (Eds.). *Age and Growth of Fish*. Iowa State University Press, Ames, Iowa, 544 p.
- Carpenter, K.E., J.I. Sommer, y L.F. Marcus. 1996. Converting truss interlandmark distances to cartesian coordinates, 103-111. *En*: Marcus, L.F., M. Corti, A. Loy, G.J.P. Naylor y D.E. Slice (Eds.). *Advances in Morphometrics*. *Plenum Press*, New York.
- Casselman, J.M. 1987. Determination of age and growth, 209-242. *En*: Weatherley, A.H. y H.S. Gill (Eds.). *The Biology of Fish Growth*. *London Academic Press*, London England.
- Casselman, J. M. 1990. Growth and Relative Size of Calcified Structures of Fish. *Transactions of the American Fisheries Society*, **119**: 673-688.
- Chiang, W.C., C.L. Sun y S.Z. Yeh. 2004 . Age and growth of sailfish (*Istiophorus platypterus*) in waters off eastern Taiwan. *Fishery Bulletin*, **102**(2): 251-263.
- Claude, J. 2008. *Morphometrics with R*. *Springer*, New York, 316 p.
- Cyr, E. C., J. M. Dean, I. Jehangeer y M. Nallee. 1990. Age, Growth, and Reproduction of Blue Marlin and Black Marlin from the Indian Ocean, 309-316. *En*: Stroud, R. H. (Ed.). *Planning the Future of Billfishes. Research and Management in the 90s and beyond*. Proceedings of the Second International Billfish Symposium, Kailua-Kona, Hawaii, August 1–5, 1988. Part 2: Contributed papers. *National Coalition for Marine Conservation, Inc.*, Savannah, Georgia, 361 p.
- Davie, P.S. y I. Hall. 1990. Potencial of dorsal and anal spines and otoliths for assessing the age structure of the recreational catch of striped marlin, 287-294. *En*: Stroud, R.H. (editor). *Planning the Future of Billfishes. Research and Management in the 90s and Beyond*. Proceeding of the Second International

- Billfish Symposium, Kailua-Kona, Hawaii, August 1-5, 1988. Part 2: Contributed papers. *National Coalition for Marine Conservation, Inc.*, Savannah, Georgia, 361 p.
- De Sylva, D.P. 1957. Atlantic sailfish studies on the age and growth of the *Istiophorus americanus* (Cuvier), using length frequency curves. *Bull. Mar. Sci. Gulf Caribb.*, **7**: 1-20.
- DeMartini, E.E., J.H. Uchiyama, R.L. Humphreys, J.D. Sampaga y H.A. Williams. 2007. Age and growth of swordfish (*Xiphias gladius*) caught by the Hawaii-based pelagic longline fishery. *Fishery Bulletin*, **105**: 356–367.
- Dos Reis, S.F., L.M. Pessoa y R. Strauss. 1990. Application of size-free canonical discriminant analysis to studies of geographic differentiation. *Brazil J. Genetics*, **13**(3): 509-520.
- Drew, K., D. Die y F. Arocha. 2006. Current efforts to develop an age and growth model of blue marlin (*Makaira nigricans*) and white marlin (*Tetrapturus albidus*). *Col. Vol. Sci. Pap. ICCAT*, **59**(1): 274-281.
- Ehrhardt, N.M. 1990. The potencial of using allometric growth characters for resolving routine size and age estimations of billfishes, 277-285. *En*: Stroud, R.H. (Ed.) *Planning the Future of Billfishes. Research and Management in the 90s and Beyond. Proceedings of the Second International Billfish Symposium, Kailua-Kona, Hawaii, August 1–5, 1988. Part 2: Contributed papers. National Coalition for Marine Conservation, Inc.*, Savannah, Georgia, 361 p.
- Ehrhardt N.M. 1992. Age and growth of swordfish, *Xiphias gladius*, in the northwestern Atlantic. *Bull. Mar. Sci.*, **50**: 292–301.
- Fablet R. 2006. Semi-local extraction of ring structures in images of biological hard tissues: Application to the Bayesian interpretation of fish otoliths for age and growth estimation. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **63**: 1414–1428.
- Felizola-Freire, K.M., A. Vasconcelos-Ferreira, R.P. Lessa y J.E. Lins-Oliveira. 1999. First studies on age and growth of sailfish (*Istiophorus albicans*) caught off northeastern Brazil. *Boletín del Instituto de Pesca, São Paulo*, **25**: 7-12.
- Folkvord, A. y H. Mosegaard. 2002. Some uses of individual age data. A. Growth and growth analysis, 146-166. *En*: Panfili J., H. de Pontual, J. Troadec y P.J.

- Wright (Eds.). Manual of fish sclerochronology. *IFREMER-IRD coedition*, Brest, France.
- Francis, R.I.C.C. 1990. Back-calculation of fish length: a critical review. *Journal of Fish Biology*, **36**: 883-902.
- Fraser, C.M. 1916. Growth of the spring salmon. *Transactions of the Pacific Fisheries Society*, 29–39.
- Fuiman, L.E. y R.G. Werner. 2002. Fishery Science. The unique contributions of early life stages. *Blackwell Science*, Oxford, U.K., 326 p.
- Garcia, A. y M.N. Santos. 2012. Fin ray morphometrics for swordfish (*Xiphias gladius* L. 1758) from the Atlantic Ocean. *Journal of Applied Ichthyology*, **29**(1): 247–251.
- Graves, J.E. y J.R. McDowell. 1995. Inter-ocean genetic divergence of istiophorid billfishes. *Marine Biology*, **122**: 193-203.
- Graves, J.E. y J.R. McDowell. 2003. Stock structure of the world's istiophorid billfishes: a genetic perspective. *Marine and Freshwater Research*, **54**: 287-298.
- Grudtsev, M.E. y L.I. Korolevich. 1986. Studies of frigate tuna *Auxis thazard* (Lacépède) age and growth in the eastern part of the equatorial Atlantic. *Int. Comm. Conserv. Atl. Tunas. Coll. Vol. Sci. Pap*, **25**: 269-274.
- Hand, D.J. 1981. Discrimination and classification. *John Wiley & Sons*, New York.
- Hedgepeth, M.Y. y J.W. Jolley. 1983. Age and Growth of sailfish, *Istiophorus platypterus*, using cross sections from the fourth dorsal spine. *En: Proceedings of the International Workshop on Age Determination of Oceanic Pelagic fishes: Tunas, Billfishes, and Sharks. NOAA Tech. Rep. NMFS*, **8**: 131-135.
- Hile, R. 1941. Age and growth of the rock bass, *Ambloplites rupestris* (Rafinesque), in Nebish Lake, Wisconsin. *Transactions of the Wisconsin Academy of Sciences, Arts and Letters*, **33**: 189-337.
- Hill, K.T., G.M. Cailliet y R.L. Radtke. 1989. A comparative analysis of growth zones in four calcified structures of pacific blue marlin, *Makaira nigricans*. *Fisheries Bulletin*, **87**(4): 829-843.

- Hinton, M.G. 2001. Status of blue marlin in the Pacific Ocean, 284-319. En: Hinton, M.G. (Ed.). Stock Assessment Report 1, Status of Tuna and Billfish Stocks in 1999. *Inter-American Tropical Tuna Commission*, La Jolla, California.
- Hoolihan, J.P. 2006. Age and growth of indo-pacific sailfish, *Istiophorus platypterus*, from the Arabian gulf. *Fisheries Research*, **78**: 218–226.
- Hopper, C.N. 1990. Patterns of blue marlin reproduction in Hawaiian waters, 29-39. En: Stroud, R.H. (Ed.). Planning the Future of Billfishes. Research and Management in the 90s and Beyond. Proceedings of the Second International Billfish Symposium, Kailua-Kona, Hawaii, August 1–5, 1988. Part 2: Contributed papers. *National Coalition for Marine Conservation, Inc.*, Savannah, Georgia, 361 p.
- Howard, J.K. y S. Ueyanagi. 1965. Distribution and relation abundance of billfishes (Istiophoridae) of the Pacific Ocean. *Stud. Trop. Oceanogr*, **2**: 1-134.
- Humphries, J.M., F.L. Bookstein, B. Chernoff, G.R. Smith, R.L. Elder y S. Poss. 1981. Multivariate discrimination by shape in relation to size. *Systematic Zoology*, **30**: 291-308.
- Hyams, D.G. 2001. Curve Expert (a curve fitting system for Windows) versión 1.38. <http://curveexpert.webhop.net>.
- Jakes-Cota, U. 2008. Edad y crecimiento del marlin azul *Makaira nigricans* desembarcado en Cabo San Lucas, B.C.S., México. *Tesis de Maestría*. CICIMAR-IPN. La Paz, B. C. S., México, 90 p.
- Jakes-Cota, U. 2010. Revisión de los supuestos de los modelos de retrocálculo y su efecto en la estimación de los parámetros de crecimiento. *Ensayo predoctoral*. CICIMAR-IPN. La Paz, B. C. S., México, 69 p.
- Jearld, A. 1983. Age determination, 301-324. En: Nielsen, L.A. y D.L. Johnson (Eds.). *Fisheries techniques*. American Fisheries Society, Bethesda, Maryland, 468 p.
- Jobling, M. 2002. Environmental Factors and Rates of Development and Growth, 97-122. En: Hart, P.J.B. y J.D., Reynolds (editores). Handbook of Fish Biology and Fisheries. *Blackwell Scientific Publications*, Oxford, England.
- Jolley, J.W. 1974. On the Biology of Florida East Coast Atlantic Sailfish (*Istiophorus platypterus*), 81-88. En: Shomura, R.S. y F. Williams (editores). Proceeding of

- the international billfish symposium, Kailua-Kona, Hawaii, 9-12 august 1972, part 2: Review and contributed papers. *NOAA Tech Rep. NMFS SSRF*, **675**: 81-88.
- Joseph, J., W. Klawe y P. Murphy. 1986. Atunes y peces espada - Los peces sin patria. *Comisión Interamericana del Atún Tropical*, La Jolla California, 46 p.
- Klecka, W.R. 1980. Discriminant analysis. *Sara Miller McCune, Sage Publications, Inc.*, Beverly Hills, California, 71 p.
- Kleiber, P., M.G. Hinton y Y. Uozumi. 2003. Stock assessment of blue marlin (*Makaira nigricans*) in the Pacific using MUNTIFAN-CL. *Mar. Freshw. Res.*, **54**(4): 349–360.
- Kopf, R.K., K. Drew y R.L. Humphreys Jr. 2008. A protocol for age estimation of striped and white marlin (*Kajikia spp.*) using fin spine cross-sections. *SCRS*, **177**: 1-14.
- Kopf, R.K., K. Drew y R.L. Humphreys Jr. 2010. Age estimation of billfishes (*Kajikia spp.*) using fin-spine crosssections: the need for an international code of practice. *Aquatic Living Resources*, **23**:13–23.
- Kopf, R.K. y P.S. Davie. 2011. Fin-Spine Selection and Section Level Influence Potential Age Estimates of Striped Marlin (*Kajikia audax*). *Copeia*, **1**: 153-160.
- Kume, S. y J. Joseph. 1969. Size composition and sexual maturity of billfish caught by the japanese longline fishery in the Pacific Ocean East of 130° W. *Bull. Far. Seas Fish. Res. Lab., Shimizu*, **2**: 115-162.
- Lea, E. 1910. On the methods used in the herring investigations. *Publications de Circonstance, Conseil Permanent International pour l'Exploration de la Mer*, **53**:7–25.
- Lee, R. M. (1920). A review of the methods of age and growth determination in fishes by means of scales. *Fisheries Investigations, Series II, Marine Fisheries*, Great Britain Ministry of Agriculture, Fisheries and Food, **4**(2):1–35.
- Macías, Z.R. 1993. Relaciones entre la pesca deportiva y comercial de pez vela (*Istiophorus platypterus*) en el pacífico mexicano. *Tesis de maestría*. CICIMAR-IPN. La Paz, B.C.S., México. 71 p.

- McGowan, M.F., E.D. Prince, y D.W. Lee. 1987. An inexpensive microcomputer-based system for making rapid and precise counts and measurements of zonation in video displayed skeletal structures of fish, 385-395. *En: Summerfelt R.C. y G.E. Hall (Eds.). The age and growth of fish. Iowa State University Press, Ames, Iowa, 544 p.*
- Melo-Barrera, F.M. y R. Félix-Uraga. 2004. Estructura de tallas y edad del marlin rayado *Tetrapturus audax* (Pisces: Xiphidae), en Cabo San Lucas, Baja California Sur, México. *Revista de Biología Tropical*, **52**(4): 981-989.
- Melo-Barrera, F.N., R. Félix-Uraga y C. Quiñónez-Velázquez. 2003. Crecimiento y relación peso longitud del marlin rayado, *Tetrapturus audax* (Pisces: Istiophoridae), en Cabo San Lucas, Baja California Sur, México. *Ciencias Marinas*, **29**(3): 305-313.
- Mitsuyasu, M.K. 1992. Pacific Blue Marlin Management in Hawaii: Review of the Blue Marlin Fishery and an Assessment of the Current Management Needs. *Marine Resource Management Program*, 54 p.
- Molinaro, A., K. Lostritto y S. Weston. 2009. partDSA: partitioning using deletion, substitution and addition moves. <http://cran.r-project.org/web/packages/>.
- Molinaro, A., K. Lostritto, y M. van der Laan. 2010. partDSA: deletion/substitution/addition algorithm for partitioning the covariate space in prediction. *Bioinformatics*, **26**(10): 1357-1363.
- Morales, B. 1984. Aplicación del retrocálculo en la determinación del crecimiento de *Genypterus capensis* (Smith, 1847). *ICSEAF Coll. Sci. Pap*, **11**(2): 7-12.
- Nakamura, H. 1949. The tunas and their fisheries. *Takeuchi Shobo*, Tokyo, 118 p.
- Nakamura, H., Y. Tabuta, y S. Ueyanagi. 1953. Relation between the spawning season and the sex ratio of some fishes of the Family Istiophoridae. *Contrib. Nankai Reg. Fish. Res. Lab. 1*, **13**: 1-8.
- Nakamura, I. 1985. FAO Species Catalogue. Vo1. 5. Billfishes of the world. An annotated and illustrated catalogue marlins, sailfishes, spearfishes and swordfishes known to date. *FAO Fisheries Synopsis*, 65 p.



- Nishikawa, Y., M. Honma, S. Ueyanagi y S. Kikawa. 1985. Average distribution of larvae of oceanic species of scombrid fishes, 1956–1981. *Far Seas Fisheries Research Laboratory, Shimizu Ser.*, **12**: 1–99.
- Ortega-García, S., A. Klett-Traulsen y R. Rodríguez-Sánchez. 2006. Some biological aspects of blue marlin (*Makaira nigricans*) in the recreational fishery at Cabo San Lucas, Baja California Sur, Mexico. *Bulletin Of Marine Science*, **79**(3): 739-746.
- Osuna, F. I. 1991. Análisis de la pesquería del pez vela *Istiophorus platypterus* (Shaw y Nodder, 1971) en el Océano Pacífico Oriental con énfasis en la Zona Económica Exclusiva de México. *Tesis de maestría*. CICIMAR-IPN. La Paz, B.C.S., México. 100 p.
- Panfili, J., H. Pontual, H. Troadec y P.J. Wright. 2002. Manual of Fish Sclerochronology. *IFREMER-IRD Coedition*, Brest, France, 464 p.
- Pérez Valencia, S. A. 2004. Estudio de la pesca deportivo-recreativa en la región de Los Cabos, B.C.S., con énfasis en el destino de las capturas. *Tesis de Maestría*. CIBNOR. La Paz, B. C. S., México. 73 p.
- Pierce, C.L., J.B. Rasmussen y W.C. Leggett. 1996. Back-calculation of fish length from scales: empirical comparison of proportional methods. *Transactions of the American Fisheries Society*, **125**: 889-898.
- Powles, P.M. y S.M. Warlem. 1988. Estimation of hatch periods for yellow perch, based on otolith reading from juveniles (age-0). *Transactions of the American Fisheries Society*, **5**: 60-67.
- Prince, E.D. y B.B. Brown. 1991. Coordination of the ICCAT enhanced research program for billfish, 13-18. En: (Guthrie, D., J.M. Hoenig, M. Holliday, C.M. Jones, M.J. Mills, S.A. Moberly, K.H. Pollock y D.R. Talhelm (Eds.). *Creel and Angler Surveys in Fisheries Management American Fisheries Society Symposium 12*, Bethesda, Maryland.
- Prince, E.D. y L.M. Pulos. 1983. Proceedings of the International Workshop on Age Determination of Oceanic Pelagic Fishes: Tunas, Billfishes, and Sharks, Miami, Florida, February 15-18, 1982. *NOAA Tech. Rep. NMFS 8*, 211 p.

- Prince, E.D., D.W. Lee, C.A. Wilson y J.M. Dean. 1984. Progress in estimating age of blue marlin, *Makaira nigricans*, and white marlin, *Tetrapturus albidus*, from the western Atlantic Ocean, Caribbean Sea, and Gulf of Mexico. *Int. Comm. Conserv. Atl. Tunas. Coll. Vol. Sci. Pap*, **20**(2): 435-447.
- Prince., E.D., D.W. Lee, C.A. Wilson y J.M. Dean. 1986. Longevity and age validation of a tag-recaptured atlantic sailfish, *Istiophorus platypterus*, using dorsal spines and otoliths. *Fishery Bulletin*, **84**(3): 493-502.
- Prince, E.D., D.W. Lee y R. Conser. 1987. Estimating age and growth rate of atlantic blue marlin (*Makaira nigricans*): progress and future work plan. *ICCAT*, **26**(2): 426-435.
- Prince, E.D., D.W. Lee y J.R. Zweifel. 1991. Estimating age and growth of young Atlantic blue marlin, *Makaira nigricans* from otolith microstructure. *Fisheries Bulletin*, **89**(3): 441-459.
- Radtke, R.L. 1983. Istiophorid otoliths: Extraction, morphology, and possible use as ageing structures, 123-129. *En*: Prince, E.D. y L.M. Pulos (Eds.). Proceedings of the international workshop on age determination of oceanic pelagic fishes: tunas, billfishes, and sharks. *NOAA Tech. Rep. NMFS 8*.
- Ramírez-Perez, J. S. 2005. Edad, crecimiento y mortalidad del pez vela *Istiophorus platypterus* (Shaw y Nodder, 1791) de la costa sur de Sinaloa, México. *Tesis de Maestría*. CICIMAR-IPN. La Paz, B. C. S., México. 50 p.
- Ratkowsky, D.A. 1983. Nonlinear regression modeling. Marcel Dekker, Inc., New York, NY. 276 p.
- Ricker, W.E. 1975. Computation and interpretation of biological statistics of fish populations. *Bull. Fish. Res. Board Can*, **191**: 1-382.
- Rohlf, J.F. y D.E. Slice. 1990. Extension of the Procrustes method for the optimal superimposition of landmarks. *Systematic Biology*, **39**: 40–59.
- Royce, W. F. 1957. Observations on the spearfishes of the central Pacific. *U.S. Fish. Wildl. Serv., Fish. Bull*, **57**: 497-554.
- Schirripa, M.J. 2002. An evaluation of back-calculation methodology using simulated otolith data. *Fisheries Bulletin*, **100**: 789-799.

- Shafi, M. y B.M. Jasim. 1982. Some aspects of the biology of a cyprinid, *Aspius vorax* Heckel. *Journal of Fish Biology*, **20**: 271-278.
- Sheets, H.D. 2011a. CoordGen7. Coordinate Generation program for calculating shape coordinates. Disponible en: <http://www3.canisius.edu/~sheets/imp7.htm>.
- Sheets, H.D. (2011b). CVA Gen67. Canonical Variates Analysis program for the analysis of shape, based on partial warp scores. Disponible en: <http://www3.canisius.edu/~sheets/imp7.htm>.
- Shimose, T., M. Fujita, K. Yokawa, H. Saito y K. Tachihara. 2009. Reproductive biology of blue marlin *Makaira nigricans* around Yonaguni Island, southwestern Japan. *Fisheries Science*, **75**(1): 109-119.
- Skillman, R. 1989. Status of Pacific billfish stocks, 179-195. *En*: Stroud, R. H. (Ed.). Planning the Future of Billfishes: Research and Management in the 90s and Beyond. Proceeding of the Second International Billfish Symposium, Kailua.Kona, Hawaii, August 1-5, 1988. Part 1: Fishery and Stock Synopses, Data Needs and Management. National Coalition for Marine Conservation, Inc., Savannah, Georgia.
- Skillman, R. y M. Yong. 1976. Von Bertalanffy growth curves for striped marlin, *Tetrapterus audax* and blue marlin, *Makaira nigricans* in the North Central Pacific. *Fishery Bulletin*, **74**(3): 553-566.
- Smith, C.L. (1983). Summary of Round Table Discussions on Back Calculation, 45-47. *En*: E. D., Prince, E.D. y L.M., Pulos (editores). *Proceedings of the International Workshop on Age Determination of Oceanic Pelagic fishes: Tunas, Billfishes, and Sharks*. NOAA Technical Report NMFS 8.
- Sparre, P. y S.C. Venema. 1997. Introducción a la evaluación de recursos pesqueros tropicales. Parte I: Manual. *FAO Fisheries Technical Paper*, **306**(1): 420 p.
- Speare, P. 2003. Age and growth of black marlin, *Makaira indica*, in east coast Australian waters. *Marine and Freshwater Research*, **54**(4): 307-314.
- StatSoft, Inc. 2001. STATISTICA (data analysis software system), version 6. [www.statsoft.com](http://www.statsoft.com).

- Stenseth, N.C., G. Ottersen, J.W. Hurrell y A. Belgrano. 2004. Marine Ecosystems and Climate Variation. The North Atlantic. A Comparative Perspective. *Oxford University Press*, New York, 252 p.
- Stergiou, K.I., P. Economidis y A. Sinis. 1992. Age, growth and mortality of red bandfish, *Cepola macrophthalmia* (L.), in the western Aegean Sea. *Journal of Fish Biology*, **40**: 395-418.
- Strasburg, D.W. 1970. A report on the billfishes of the Central Pacific Ocean. *Bulletin of Marine Science*, **20**(3): 575-604.
- Strauss, R.E. 1985. Evolutionary allometry and variation in body form in the south American catfish genus *Corydoras* Callichthyidae. *Systematic Zoology*, **34**(4): 381-396.
- Strauss, R.E. (1990). Patterns of quantitative variation in lepidopteran wing morphology: The convergent groups Heliconiinae and Ithomiinae (Papilionoidea: Nymphalidae). *Evolution*, **44**: 86-103.
- Strauss, R.E. (2010). Discriminating groups of organisms, 73-91. *En*: Ashraf, E. (Ed.). Morphometrics for Nonmorphometricians. *Lecture Notes in Earth Sciences 121*, Springer-Verlag.
- Strauss, R.E. y F.L. Bookstein. 1982. The truss-body form reconstructions in morphometrics. *Systematic Zoology*, **31**: 113-135.
- Sun, C. L., S. P. Wang y S. Z. Yeh. 2002. Age and growth of the swordfish (*Xiphias gladius* L.) in the waters around Taiwan determined from anal-fin rays. *Fishery Bulletin*, **100**: 822-835.
- The R Project for Statistical Computing. 2009. R version 2.9.2. <http://www.r-project.org/>
- Tserpes, G. y N. Tsimenides. 1995. Determination of age and growth of swordfish, *Xiphias gladius* L., 1758, in the eastern Mediterranean using anal-fin spines. *Fishery Bulletin*, **93**: 594-602.
- Ueyanagi S. y H. Yabe. 1959. Larvae of the black marlin (*Eumakaira nigra* Nakamura). *Reports of the Nankai Regional Fisheries Research Laboratory*, **10**: 151-169.

- Weisberg, S., G. Spangler y L.S. Richmond. 2010. Mixed effects models for fish growth. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, **67**: 269-277.
- Whitney, R.R. y K.D. Carlander. 1956. Interpretation of body–scale regression for computing body length of fish. *Journal of Wildlife Management*, **20**: 21–27.
- Wilson, C.A., E.B. Brothers, J.M. Casselman, C.L. Smith y A. Wild. 1983. Glossary, 207-208. *En*: Proceedings of the International Workshop on Age Determination of Oceanic Pelagic fishes: Tunas, Billfishes, and Sharks. *NOAA Tech. Rep. NMFS 8*.
- Wilson, C.A., J.M. Dean, E.D. Prince, y D.W. Lee. 1991. An examination of sexual dimorphism in Atlantic and Pacific blue marlin using body weight, sagittae weight, and age estimates. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, **151**(2): 209-225.
- Yatomi, H. 1990. A potential problem in estimating the ages of the striped marlin using fin spines. 317-321. *En*: R. H. Stroud, R.H. (Ed.). Planning the Future of Billfishes. Research and Management in the 90s and Beyond. Proceedings of the Second International Billfish Symposium, Kailua.Kona, Hawaii, 1-5 August, 1988. Part 2: Contributed papers. *National Coalition for Marine Conservation, Inc.*, Savannah, Georgia, 361 p.
- Zar, J. H. 2010. *Biostatistical Analysis*. *Prentice Hall*, Upper Saddle River, New Jersey, 944 p.

## 11. ANEXOS

### 11.1 Pasos de la corrección del efecto de la talla (Álvarez-Ramírez, 2003)

A partir de las mediciones (Tabla I) realizadas para cada una de las espinas, se construye una matriz en la que las espinas corresponden a los renglones y las variables a las columnas. Esta matriz de datos crudos ([A]) fue transformada para obtener los residuales libres del efecto de la talla.

1. Transformación logarítmica: La matriz original ([A]) se transforma en logaritmos base 10 con la finalidad de homogenizar las variancias, y se denomina matriz [B].
2. Centrar por grupos: Para los cinco grupos (cinco espinas) se calcula la media de cada variable. A cada elemento de la matriz [B] se le resta la media correspondiente, de tal forma que ahora todas las variables de los grupos tienen media cero. Esta matriz centrada se denomina matriz [Z].
3. Covariancia: A partir de la matriz [Z], se calcula la matriz de covariancia, denominada matriz [Q]. En esta matriz simétrica, los elementos diagonales son las variancias de cada variable, mientras que los elementos por arriba y por debajo de la diagonal son las covariancias correspondientes.
4. Análisis de componentes principales: Con la matriz [Q] se efectúa un análisis de componentes principales, del que se extrae solamente el primer eigenvector [ $e_1$ ].
5. Estimación del patrón alométrico común: A partir de [ $e_1$ ] y [Z] se calcula el vector de crecimiento que representa el patrón alométrico común para los grupos. Este vector ([ $S_w$ ]) se denomina “vector talla dentro del grupo”.

$$[S_w] = [Z] * [e_1]$$

6. Restaurar medias: Se restauran las medias de las variables de cada grupo, multiplicando [ $e_1$ ] por la matriz [B], obteniéndose el “vector talla entre los grupos” ([ $S_a$ ]).

$$[S_a] = [B] * [e_1]$$

7. Regresiones lineales: Se realiza una serie de regresiones entre cada una de las variables transformadas logarítmicamente (columnas de [B] y el vector [S<sub>w</sub>]). El modelo de regresión utilizado es un modelo lineal con ordenada al origen:  $y = b x$

$$[\log 1] = \alpha_1 * [S_w]$$

$$[\log 2] = \alpha_2 * [S_w]$$

$$\cdot \quad \cdot \quad \cdot$$

$$\cdot \quad \cdot \quad \cdot$$

$$[\log 6] = \alpha_6 * [S_w]$$

donde [log 1] a [log 6] corresponde a las columnas de los logaritmos de cada una de las medidas efectuadas en las espinas (Tabla 1) y  $\alpha_i$  es un escalar que corresponde a la pendiente de la regresión. Todas las pendientes se pueden arreglar en un vector renglón [ $\alpha$ ].

8. Calcular valores predichos por la regresión: Se calcula la matriz de valores predichos por el vector [S<sub>a</sub>], multiplicando este vector de pendientes [ $\alpha$ ] obtenido en el punto 7.

$$[B]_{(pred)} = [S_a] [\alpha]$$

9. Calcular residuales: Se calculan los residuales restando a los valores observados ([B]), los valores predichos [B]<sub>(pred)</sub> calculados en el paso anterior.

$$[B] - [B]_{(pred)} = [R]$$

10. Centrar los residuales: Finalmente la matriz de residuales es centrada con respecto a su gran media. Esta matriz de residuales centrados representa las nuevas variables libres del efecto de la talla.

## 11.2 Rutinas en R para la corrección del efecto de la talla

```
# Importo los datos (Matriz [A])
Dat <- read.table("Medidas.txt", sep="\t", header=TRUE)

# Defino los grupos
A <- Dat[complete.cases(Dat), c(1:12)]
  E1 <- sum(ifelse(A$Espina=="1E", 1,0))
  E2 <- sum(ifelse(A$Espina=="2E", 1,0)) + E1
  E3 <- sum(ifelse(A$Espina=="3E", 1,0)) + E2
  R4 <- sum(ifelse(A$Espina=="4R", 1,0)) + E3
  R5 <- sum(ifelse(A$Espina=="5R", 1,0)) + R4

#Eliminación del Efecto de la Talla
#1. Transformación Logarítmica
  B <- as.matrix(log10(A))

  #2. Centrar por Grupos
  Z1 <- scale(B[1:E1, ], center=T, scale=F)
  Z2 <- scale(B[(E1+1):E2, ], center=T, scale=F)
  Z3 <- scale(B[(E2+1):E3, ], center=T, scale=F)
  Z4 <- scale(B[(E3+1):R4, ], center=T, scale=F)
  Z5 <- scale(B[(R4+1):R5, ], center=T, scale=F)

  Z <- rbind(Z1, Z2, Z3, Z4, Z5)
  #3. Covariancia
  Q <- cov(Z, use = "pairwise.complete.obs")

  #4. Análisis de Componentes Principales
  eig <- princomp(covmat=Q)
  e1 <- eig$loadings[, 1] #Se extrae el primer eigenvector
```



#5. Estimación del Patrón Alométrico Común

```
Sw <- Z %**% e1      #Vector Talla Dentro del Grupo
```

#6. Restaurar Medias

```
Sa <- B %**% e1      #Vector Talla Entre Los Grupos
```

#7. Regresiones Lineales

```
xy.lm <- lm(B ~ Sw + 0, na.action=na.exclude)
```

```
vecpend <- as.vector(xy.lm$coefficients) #Vector de Pendientes
```

#8. Calcular valores predichos por la regresión

```
Bpred <- Sa %**% vecpend
```

#9. Calcular residuales

```
R <- B - Bpred
```

#10. Centrar los residuales

```
Rc <- scale(R, center = T, scale = F)
```

### 11.3 Prueba $T^2$ de Hotelling

Esta prueba tiene como hipótesis nula  $H_0$ : no existen diferencias en los parámetros de crecimiento, y como hipótesis alternativa  $H_a$ : existen diferencias en los parámetros de crecimiento. El estadístico de prueba a utilizar es el siguiente:

$$T^2 = \frac{N_1 N_2}{N_1 + N_2} [\hat{P}_1 - \hat{P}_2]' S^{-1} [\hat{P}_1 - \hat{P}_2]$$

donde:

$\hat{P}_1$  = Vector columna del juego de parámetros de crecimiento 1

$\hat{P}_2$  = Vector columna del juego de parámetros de crecimiento 2

$S^{-1}$  = Inversa de la matriz de covariancia común al juego 1 y 2 (S)

$$S = \frac{(N_1 - 1)S_1 + (N_2 - 1)S_2}{N_1 + N_2 - 2}$$

donde:

$S_1$  = Matriz de covariancia del juego de parámetros 1

$S_2$  = Matriz de covariancia del juego de parámetros 2

$N_1$  = Número de organismos en el juego de parámetros 1

$N_2$  = Número de organismos en el juego de parámetros 2

Para el contraste de esta prueba se utilizará:

$$T_0^2 = \frac{n(N_1 + N_2 - 2)F\alpha}{N_1 + N_2 - n - 1}$$

$$F\alpha = F(\alpha = 0.05, n, N_1 + N_2 - 2)$$

donde:

$n$  = Número de parámetros del modelo (3)

$F\alpha$  = Valor de la distribución F

Si  $T^2 > T_0^2 \Rightarrow$  El crecimiento es significativamente diferente

Si hay diferencia en el crecimiento, por lo menos un parámetro es diferente, para detectar cual parámetro es significativamente diferente se calcula:

$$F_{oj} = \frac{N_1 N_2 (N_1 + N_2 - n - 1) (P_{1j} - P_{2j})^2}{n(N_1 + N_2)(N_1 + N_2 - 2)S_{jj}}$$

donde:

$F_{oj}$  = Estadístico calculado respecto al parámetro  $j$  ( $L_{\infty}$ ,  $k$  y  $t_0$ )

$P_{ij}$  = Valor del parámetro  $j$  del juego  $i$  (juego 1 y juego 2)

$S_{jj}$  = Valor tomado de la matriz de covariancia

Si  $F_{oj} > F\alpha$  El parámetro  $j$  es diferente

**11.4 Resultados de la prueba *t* de Student para evaluar si los coeficientes de alomería (*f*) obtenidos de la relación alométrica entre las diferentes distancias medidas en cada una de las 5 espinas de la aleta dorsal respecto a la longitud posorbital de los organismos son significativamente diferentes de 1.**

**Tabla XXI.** Valores de los coeficientes de la relación alométrica entre las distancias medidas en la espina 1 y la longitud posorbital de los organismos, y resultados de la prueba *t* de Student para pendientes. D1-D6 representan una medida de acuerdo a la nomenclatura de la tabla I.

<b>Coeficientes</b>	<b>D1</b>	<b>D2</b>	<b>D3</b>	<b>D4</b>	<b>D5</b>	<b>D6</b>
<b>e</b>	1.76E+02	1.55E+02	1.78E+02	1.57E+02	1.82E+02	1.69E+02
<b>f</b>	0.2061	0.3721	0.396	0.2926	0.3143	0.2039
<b>t</b>	-0.03562211	-0.03212813	-0.02942985	-0.03317168	-0.03445879	-0.03476909
<b>p</b>	0.028356	0.025576	0.023428	0.026406	0.027429	0.027676

**Tabla XXII.** Valores de los coeficientes de la relación alométrica entre las distancias medidas en la espina 2 y la longitud posorbital de los organismos, y resultados de la prueba *t* de Student para pendientes. D1-D6 representan una medida de acuerdo a la nomenclatura de la tabla I.

<b>Coeficientes</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
<b>u</b>	1.16E+02	1.16E+02	1.47E+02	9.99E+01	1.46E+02	9.92E+01
<b>f</b>	0.5157	0.5236	0.5881	0.582	0.5893	0.5866
<b>t</b>	-0.02815337	-0.02680555	-0.02274318	-0.02393137	-0.02352197	-0.02431867
<b>p</b>	0.022415	0.021342	0.018108	0.019054	0.018727	0.019362

**Tabla XXIII.** Valores de los coeficientes de la relación alométrica entre las distancias medidas en la espina 3 y la longitud posorbital de los organismos, y resultados de la prueba *t* de Student para pendientes. D1-D6 representan una medida de acuerdo a la nomenclatura de la tabla I.

<b>Coeficientes</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
<b>u</b>	8.35E+01	9.51E+01	1.35E+02	7.89E+01	1.34E+02	7.40E+01
<b>f</b>	0.658	0.5637	0.6121	0.6465	0.6054	0.696
<b>t</b>	-0.02542973	-0.03028799	-0.0235605	-0.02672606	-0.02760051	-0.02394943
<b>p</b>	0.02025	0.024117	0.018761	0.021281	0.021975	0.019071

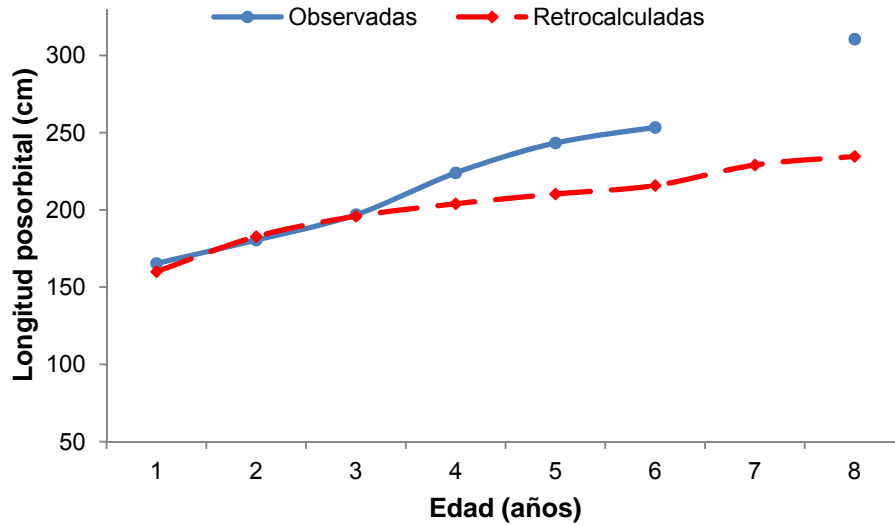
**Tabla XXIV.** Valores de los coeficientes de la relación alométrica entre las distancias medidas en la espina 4 y la longitud posorbital de los organismos, y resultados de la prueba *t* de Student para pendientes. D1-D6 representan una medida de acuerdo a la nomenclatura de la tabla I.

<b>Coefficientes</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
<i>u</i>	9.19E+01	7.29E+01	1.34E+02	6.76E+01	1.32E+02	6.55E+01
<i>f</i>	0.6059	0.6637	0.6346	0.7387	0.6539	0.7587
<i>t</i>	-0.02840117	-0.02771733	-0.02249949	-0.02393651	-0.02075624	-0.02291317
<i>p</i>	0.022615	0.02207	0.017916	0.019061	0.016529	0.018245

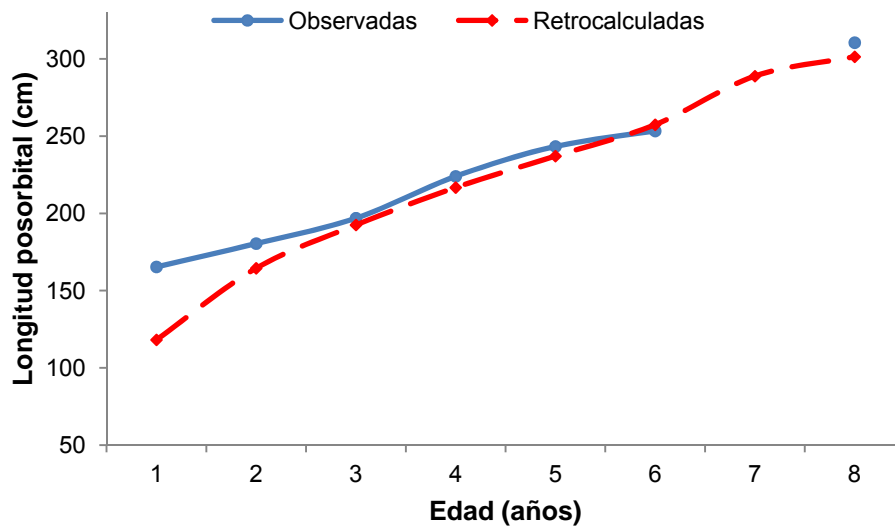
**Tabla XXV.** Valores de los coeficientes de la relación alométrica entre las distancias medidas en la espina 5 y la longitud posorbital de los organismos, y resultados de la prueba *t* de Student para pendientes. D1-D6 representan una medida de acuerdo a la nomenclatura de la tabla I.

<b>Coefficientes</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
<i>u</i>	1.07E+02	6.43E+01	1.28E+02	6.84E+01	1.32E+02	6.68E+01
<i>f</i>	0.5757	0.6758	0.658	0.7218	0.631	0.7295
<i>t</i>	-0.02297182	-0.01972811	-0.01748701	-0.01819418	-0.02115855	-0.01703515
<i>p</i>	0.018288	0.015706	0.013922	0.014485	0.016844	0.013563

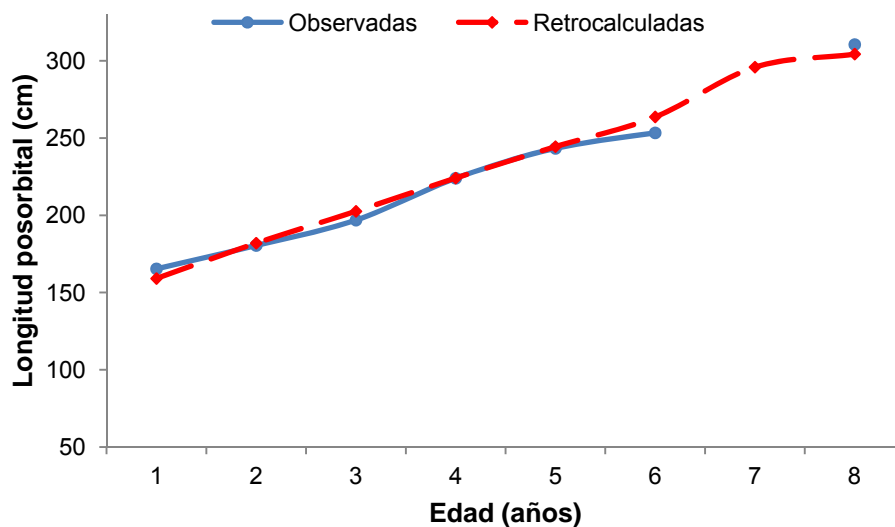
### 11.5 Longitudes promedio por grupo de edad observadas y retrocalculadas con los diferentes métodos de retrocálculo para el nivel de corte del 50 %.



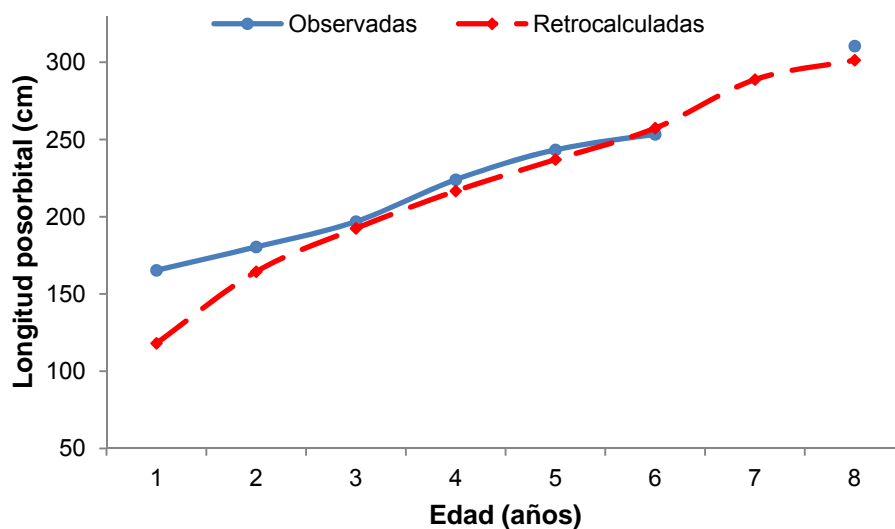
**Figura 14.** Longitudes promedio por grupo de edad observadas y retrocalculadas con el método de regresión para el nivel de corte del 50 % de hembras de marlin azul *Makaira nigricans* desembarcadas en Cabo San Lucas, B.C.S. en el periodo 2005-2006.



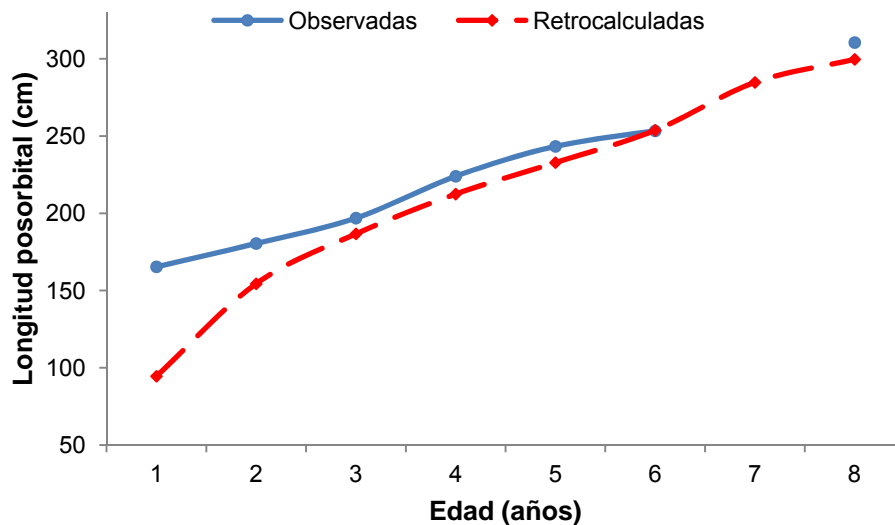
**Figura 15.** Longitudes promedio por grupo de edad observadas y retrocalculadas con el método de Dahl-Lea para el nivel de corte del 50 % de hembras de marlin azul *Makaira nigricans* desembarcadas en Cabo San Lucas, B.C.S. en el periodo 2005-2006.



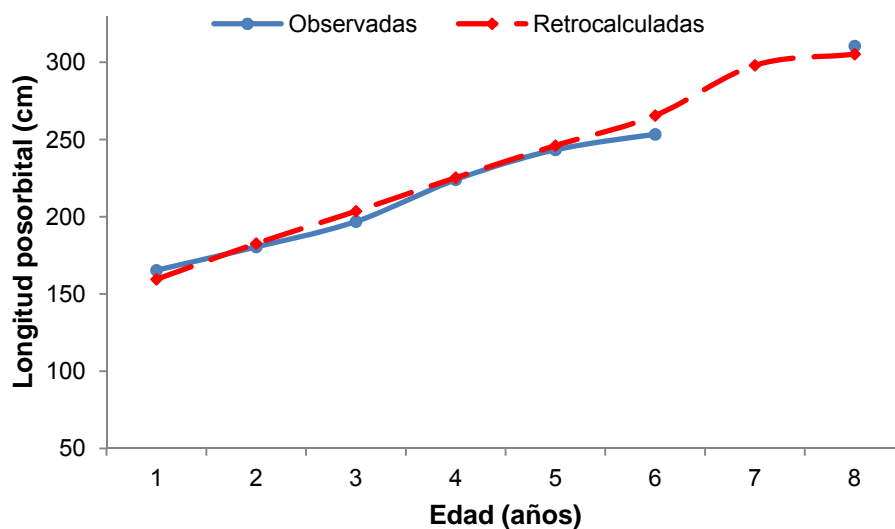
**Figura 16.** Longitudes promedio por grupo de edad observadas y retrocalculadas con el método de Fraser-Lee para el nivel de corte del 50 % de hembras de marlin azul *Makaira nigricans* desembarcadas en Cabo San Lucas, B.C.S. en el periodo 2005-2006.



**Figura 17.** Longitudes promedio por grupo de edad observadas y retrocalculadas con el método del intercepto biológico para el nivel de corte del 50 % de hembras de marlin azul *Makaira nigricans* desembarcadas en Cabo San Lucas, B.C.S. en el periodo 2005-2006.

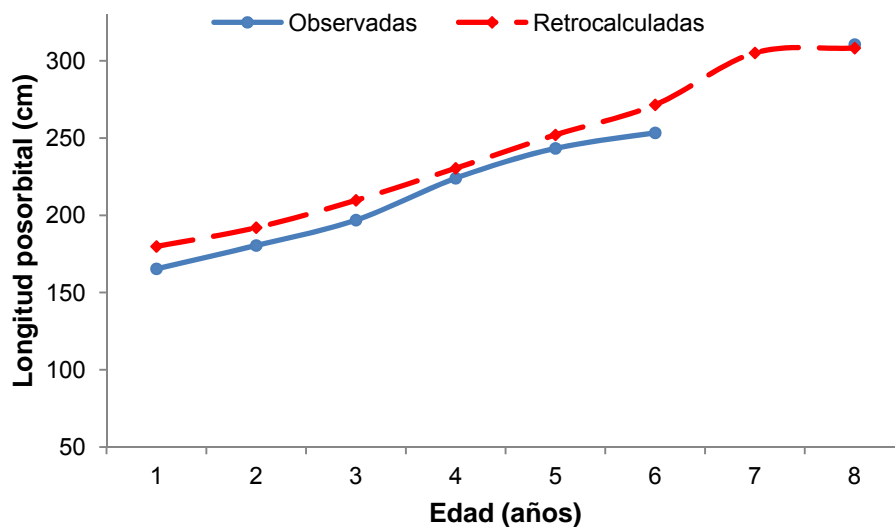


**Figura 18.** Longitudes promedio por grupo de edad observadas y retrocalculadas con el método de Hile (SPH) para el nivel de corte del 50 % de hembras de marlin azul *Makaira nigricans* desembarcadas en Cabo San Lucas, B.C.S. en el periodo 2005-2006.

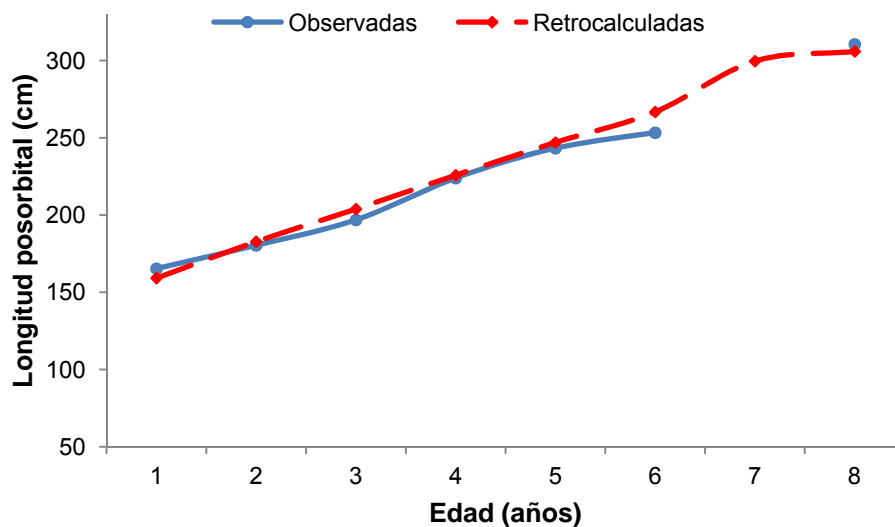


**Figura 19.** Longitudes promedio por grupo de edad observadas y retrocalculadas con el método de Whitney y Carlander (BPH) para el nivel de corte del 50 % de hembras de marlin azul *Makaira nigricans* desembarcadas en Cabo San Lucas, B.C.S. en el periodo 2005-2006.



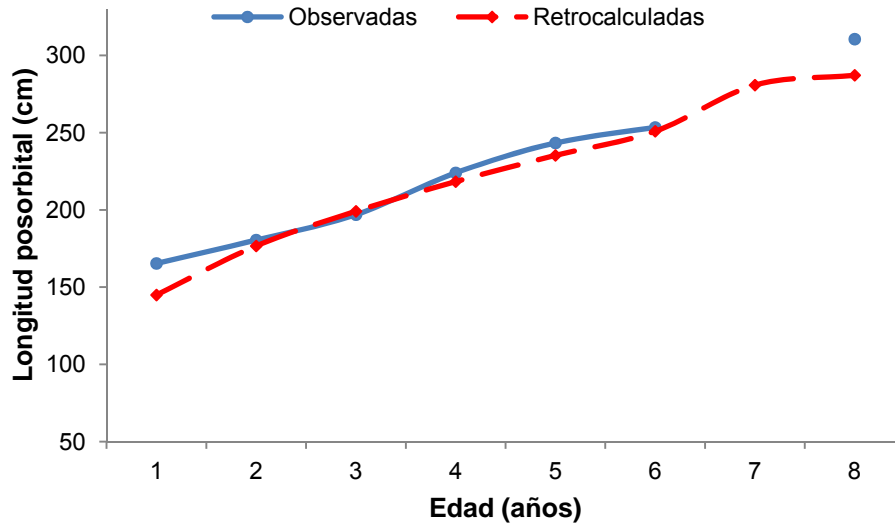


**Figura 20.** Longitudes promedio por grupo de edad observadas y retrocalculadas con el método alométrico 1 para el nivel de corte del 50 % de hembras de marlin azul *Makaira nigricans* desembarcadas en Cabo San Lucas, B.C.S. en el periodo 2005-2006.

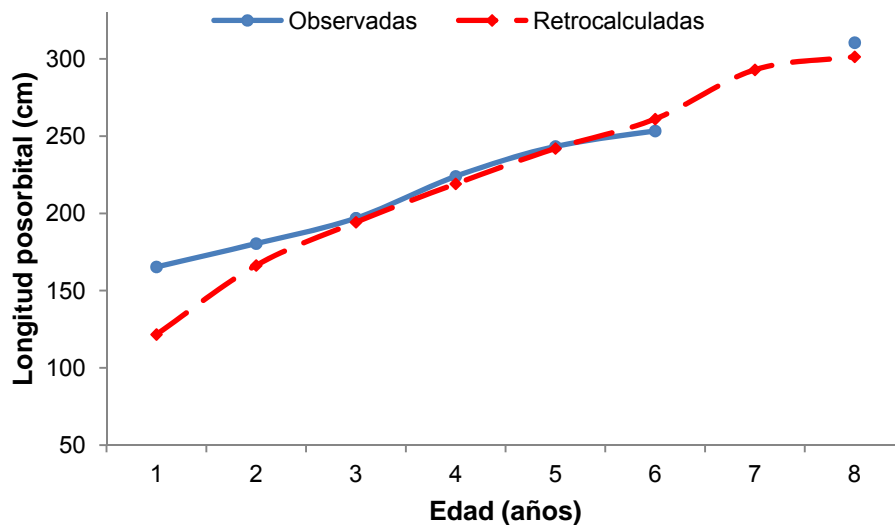


**Figura 21.** Longitudes promedio por grupo de edad observadas y retrocalculadas con el método alométrico 2 para el nivel de corte del 50 % de hembras de marlin azul *Makaira nigricans* desembarcadas en Cabo San Lucas, B.C.S. en el periodo 2005-2006.

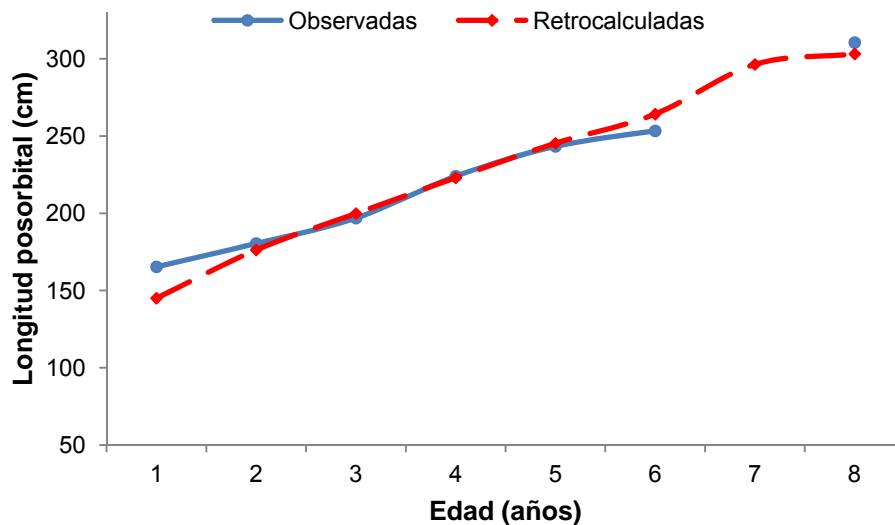
### 11.6 Longitudes promedio por grupo de edad observadas y retrocalculadas con los diferentes métodos de retrocálculo para el nivel de corte del 100 %.



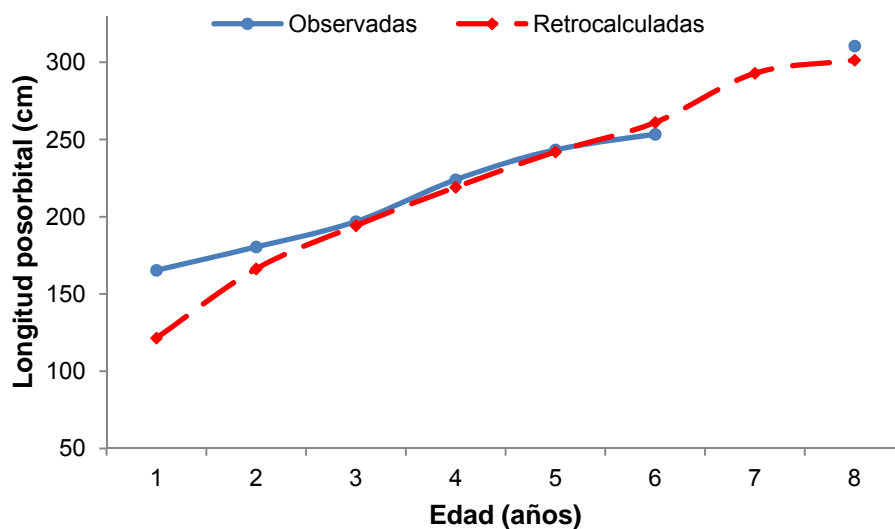
**Figura 22.** Longitudes promedio por grupo de edad observadas y retrocalculadas con el método de regresión para el nivel de corte del 100 % de hembras de marlin azul *Makaira nigricans* desembarcadas en Cabo San Lucas, B.C.S. en el periodo 2005-2006.



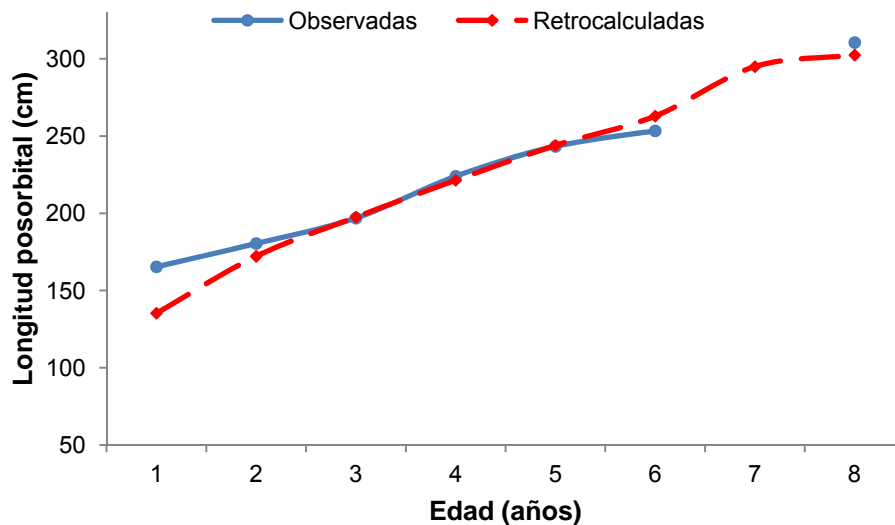
**Figura 23.** Longitudes promedio por grupo de edad observadas y retrocalculadas con el método de Dahl-Lea para el nivel de corte del 100 % de hembras de marlin azul *Makaira nigricans* desembarcadas en Cabo San Lucas, B.C.S. en el periodo 2005-2006.



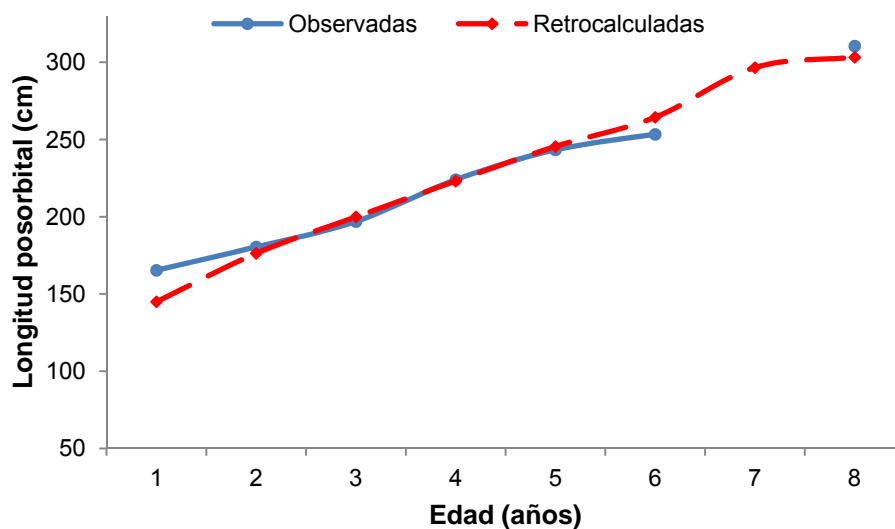
**Figura 24.** Longitudes promedio por grupo de edad observadas y retrocalculadas con el método de Fraser-Lee para el nivel de corte del 100 % de hembras de marlin azul *Makaira nigricans* desembarcadas en Cabo San Lucas, B.C.S. en el periodo 2005-2006.



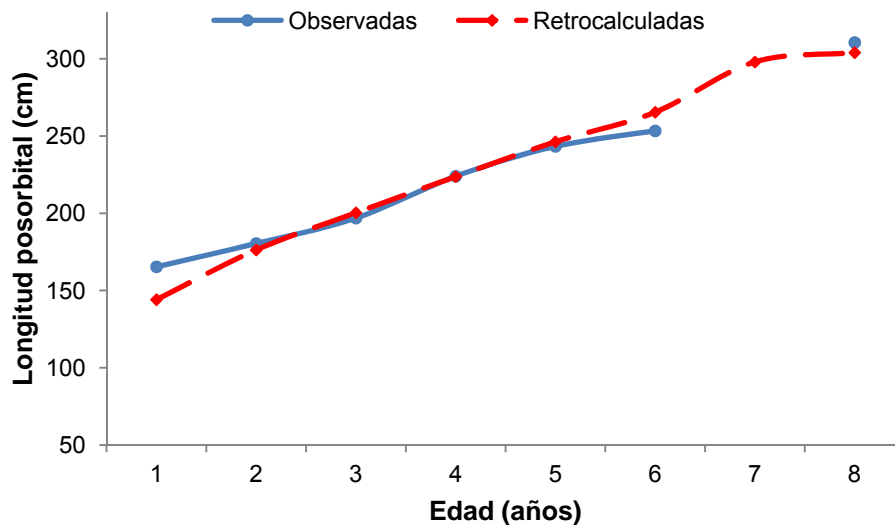
**Figura 25.** Longitudes promedio por grupo de edad observadas y retrocalculadas con el método del intercepto biológico para el nivel de corte del 100 % de hembras de marlin azul *Makaira nigricans* desembarcadas en Cabo San Lucas, B.C.S. en el periodo 2005-2006.



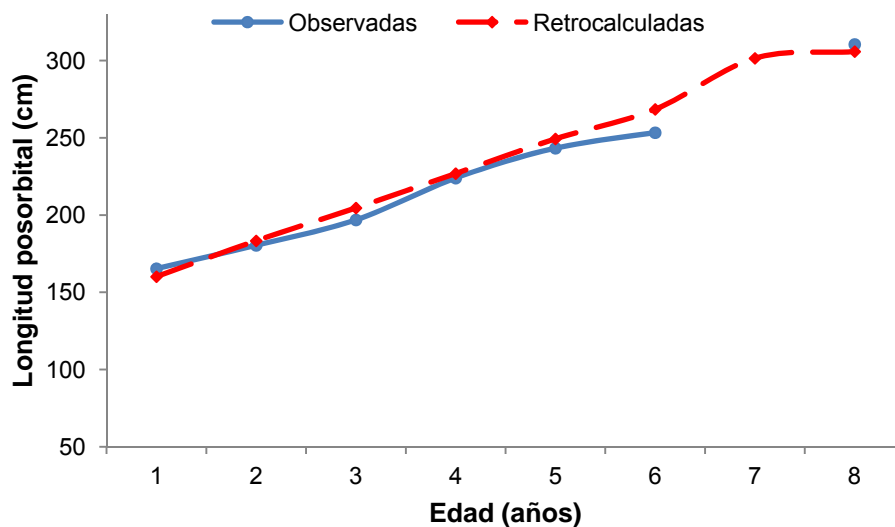
**Figura 26.** Longitudes promedio por grupo de edad observadas y retrocalculadas con el método de Hile (SPH) para el nivel de corte del 100 % de hembras de marlin azul *Makaira nigricans* desembarcadas en Cabo San Lucas, B.C.S. en el periodo 2005-2006.



**Figura 27.** Longitudes promedio por grupo de edad observadas y retrocalculadas con el método de Whitney y Carlander (BPH) para el nivel de corte del 100 % de hembras de marlin azul *Makaira nigricans* desembarcadas en Cabo San Lucas, B.C.S. en el periodo 2005-2006.

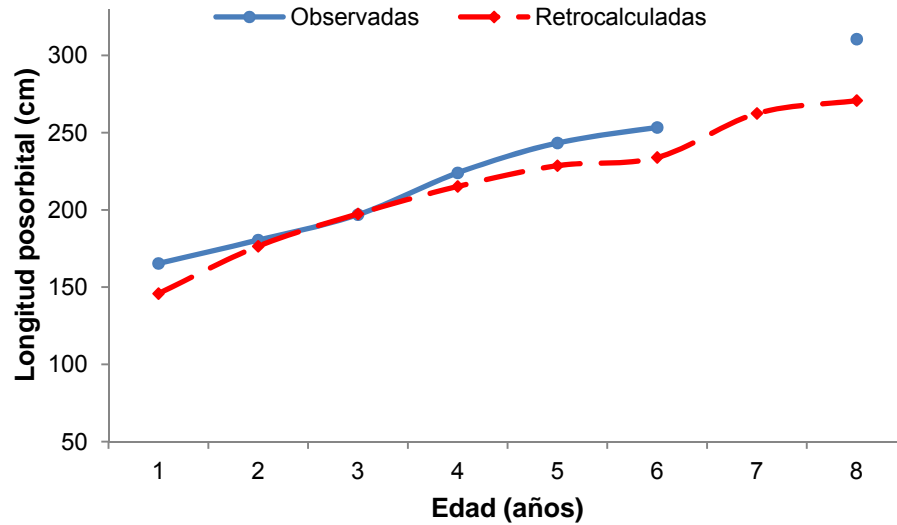


**Figura 28.** Longitudes promedio por grupo de edad observadas y retrocalculadas con el método alométrico 1 para el nivel de corte del 100 % de hembras de marlin azul *Makaira nigricans* desembarcadas en Cabo San Lucas, B.C.S. en el periodo 2005-2006.

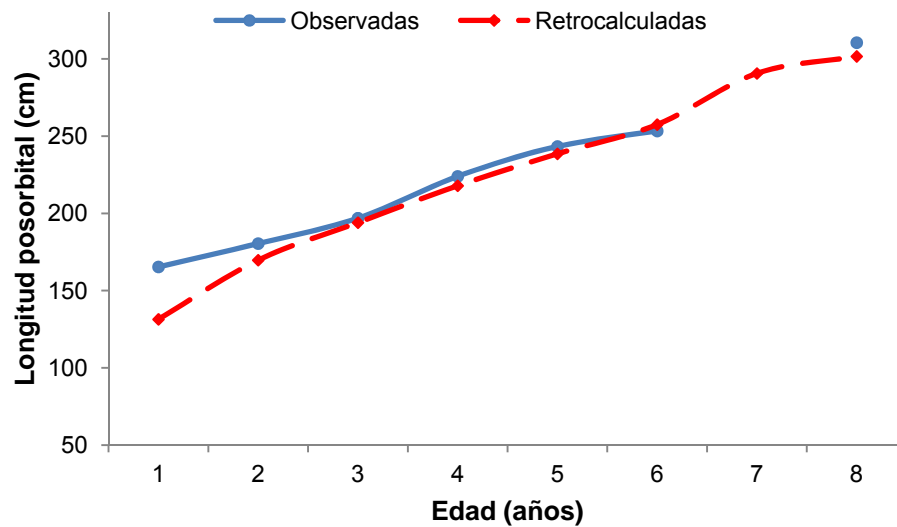


**Figura 29.** Longitudes promedio por grupo de edad observadas y retrocalculadas con el método alométrico 2 para el nivel de corte del 100 % de hembras de marlin azul *Makaira nigricans* desembarcadas en Cabo San Lucas, B.C.S. en el periodo 2005-2006.

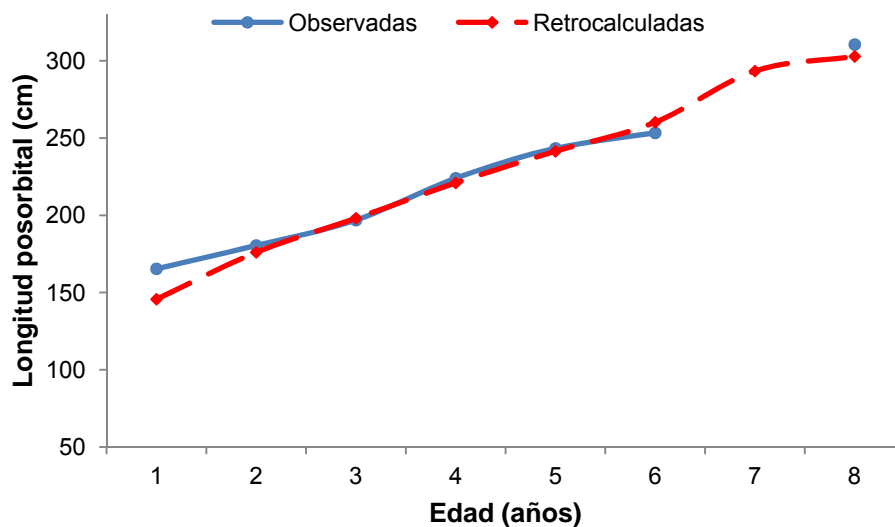
**11.7 Longitudes promedio por grupo de edad observadas y retrocalculadas con los diferentes métodos de retrocálculo para el nivel de corte del 250 %.**



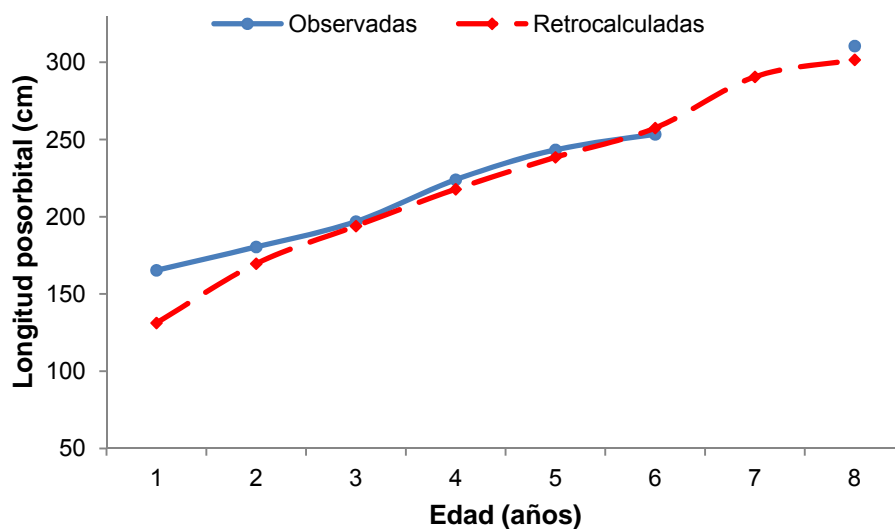
**Figura 30.** Longitudes promedio por grupo de edad observadas y retrocalculadas con el método de regresión para el nivel de corte del 250 % de hembras de marlin azul *Makaira nigricans* desembarcadas en Cabo San Lucas, B.C.S. en el periodo 2005-2006.



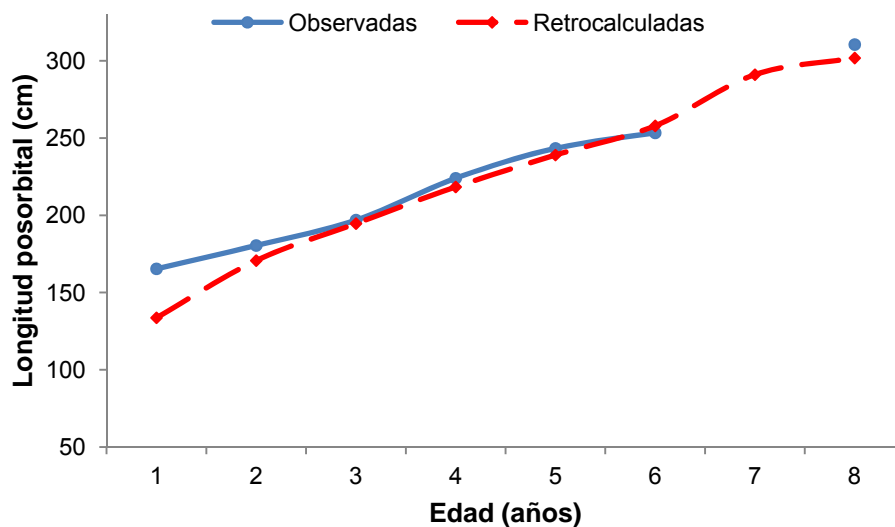
**Figura 31.** Longitudes promedio por grupo de edad observadas y retrocalculadas con el método de Dahl-Lea para el nivel de corte del 250 % de hembras de marlin azul *Makaira nigricans* desembarcadas en Cabo San Lucas, B.C.S. en el periodo 2005-2006.



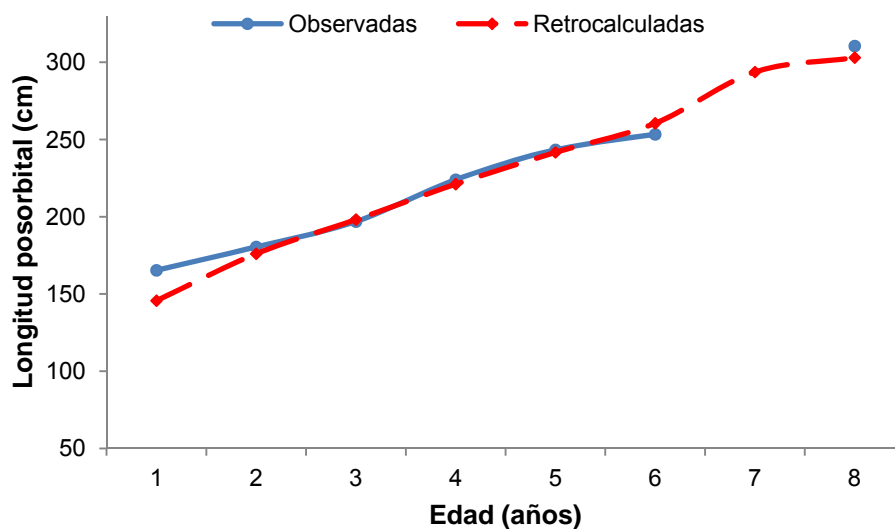
**Figura 32.** Longitudes promedio por grupo de edad observadas y retrocalculadas con el método de Fraser-Lee para el nivel de corte del 250 % de hembras de marlin azul *Makaira nigricans* desembarcadas en Cabo San Lucas, B.C.S. en el periodo 2005-2006.



**Figura 33.** Longitudes promedio por grupo de edad observadas y retrocalculadas con el método del intercepto biológico para el nivel de corte del 250 % de hembras de marlin azul *Makaira nigricans* desembarcadas en Cabo San Lucas, B.C.S. en el periodo 2005-2006.

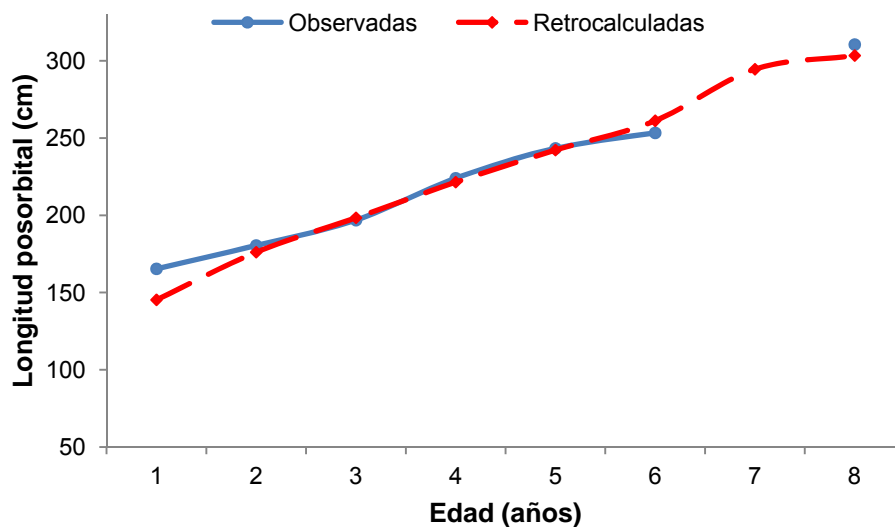


**Figura 34.** Longitudes promedio por grupo de edad observadas y retrocalculadas con el método de Hile (SPH) para el nivel de corte del 250 % de hembras de marlin azul *Makaira nigricans* desembarcadas en Cabo San Lucas, B.C.S. en el periodo 2005-2006.

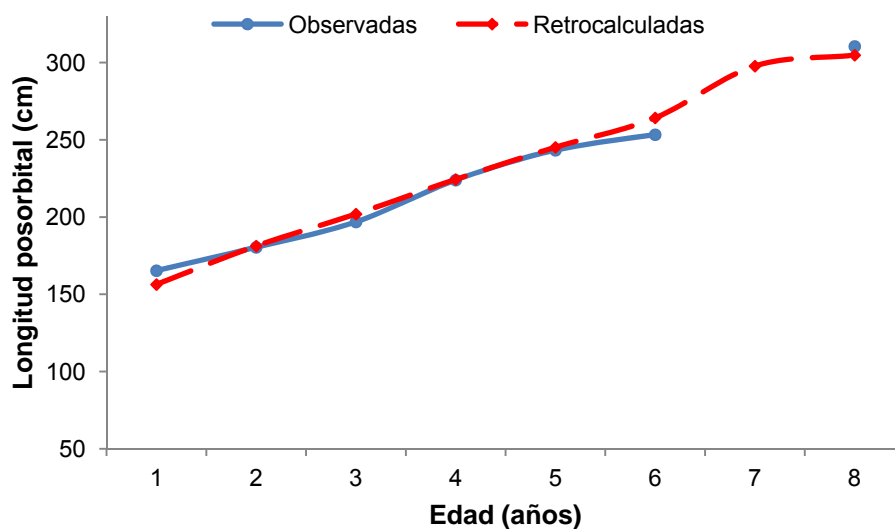


**Figura 35.** Longitudes promedio por grupo de edad observadas y retrocalculadas con el método de Whitney y Carlander (BPH) para el nivel de corte del 250 % de hembras de marlin azul *Makaira nigricans* desembarcadas en Cabo San Lucas, B.C.S. en el periodo 2005-2006.





**Figura 36.** Longitudes promedio por grupo de edad observadas y retrocalculadas con el método alométrico 1 para el nivel de corte del 250 % de hembras de marlin azul *Makaira nigricans* desembarcadas en Cabo San Lucas, B.C.S. en el periodo 2005-2006.



**Figura 37.** Longitudes promedio por grupo de edad observadas y retrocalculadas con el método alométrico 2 para el nivel de corte del 250 % de hembras de marlin azul *Makaira nigricans* desembarcadas en Cabo San Lucas, B.C.S. en el periodo 2005-2006.