

Teoría de la información, inferencia multimodelos y fuente de datos para modelar el crecimiento individual de almeja de sifón *Panopea globosa*

Eugenio Alberto Aragón-Noriega^{*Δ}, Rolando Cruz-Vásquez^{*}, Guillermo Rodríguez-Domínguez^{**}, Edgar Alcántara-Razo^{*}, Gustavo Cortez-Lucero^{*} y Carlos Alonso Razcón-León^{*}

Este trabajo describe el crecimiento de la almeja de sifón *Panopea globosa* en el Golfo de California, utilizando un enfoque multimodelo. Para ajustar los modelos se usaron datos totales y datos promedio de longitud a cada edad. Los parámetros de crecimiento individual fueron estimados por medio de cuatro modelos: von Bertalanffy, Logístico, Gompertz y Schnute. Los parámetros en cada uno de los modelos y su intervalo de confianza fueron calculados por el método de máxima verosimilitud. El modelo que mejor se ajustó a los datos de longitud-edad fue seleccionado utilizando el criterio de información de Akaike (AIC, por sus siglas en inglés). Según el AIC, el modelo logístico de crecimiento describe mejor el crecimiento de *P. globosa* en esta región. La longitud asintótica de la concha de la almeja de sifón *P. globosa* de Guaymas (localizada en la parte centro del Golfo de California) fue de 122.2 mm (95% IC, 116.3-128.1), al promediar los estimados de los cuatro modelos, en comparación con los datos promedio de los valores totales (114.98 mm, 95% IC, 112.91-117.04 mm). Se concluyó que el enfoque multimodelo y el uso de AIC son la forma más sólida para evaluar parámetros de crecimiento, por lo menos en la especie objeto de estudio. También se sugiere utilizar datos crudos para posteriores análisis de crecimiento, en lugar de datos promedio.

Palabras clave: *Panopea globosa*, Golfo de California, pesca, modelos de crecimiento.

Information theory, multi-model inference and source data to model individual growth of Cortes Geoduck *Panopea globosa*

This paper describes the growth of Cortes Geoduck clam *Panopea globosa* in the Gulf of California using a multi-model approach. Total and average data of length at each age were used to fit the models. Individual's growth parameters were estimated by four models: von Bertalanffy, Logistic, Gompertz and Schnute. The parameters in each model and their confidence interval were computed by using the maximum likelihood method. The best model fit was selected using Akaike's information criterion (AIC). According to the AIC the best description of the growth of *P. globosa* in this region was the Logistic growth model. The asymptotic length of the shell of Cortes Geoduck clam *P. globosa* off Guaymas (located in the central Gulf of California) was 122.2 mm (95% CI, 116.3-128.1) after averaging the estimates of the four models, compared to the average of total values (114.98 mm, 95% CI, 112.91-117.04 mm). The conclusions are that the multi-model inference and AIC are robust methods to evaluate growth parameters for the studied species. It is also recommended to use only the raw data instead of averaged data.

Key words: *Panopea globosa*, Gulf of California, fishery, growth models.

Introducción

Las especies del género *Panopea*, comúnmente conocidas como almejas de sifón (familia Hiatellidae), tienen una distribución cosmopolita. El género comprende varias especies, como

Panopea abbreviata (Valenciennes 1839) –endémica del suroeste Atlántico–, *P. zelandica* (Quoy y Gaimard 1835) –que se encuentra en el Pacífico suroeste–, *P. japonica* (Adams 1849) –que se distribuye desde las islas Aleutianas a Japón y Corea del Sur–, *P. globosa* (Dall 1898) –del Golfo de California y Bahía Magdalena en la Baja California Sur– y *P. generosa* (Gould 1850) –que se distribuye desde Alaska a Baja California, México–.

La explotación de las especies de almeja generosa que se realiza en el noroeste de México es sobre dos especies: *P. generosa* a lo largo de la

* Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, Unidad Sonora, Km 2.35 Camino al Tular, Estero de Bacoichibampo, Guaymas, Sonora 85454, México. ^Δ aaaron04@cibnor.mx

** Universidad Autónoma de Sinaloa. Facultad de Ciencias del Mar, Laboratorio Manejo de Zona Costera, Paseo Claussen s/n, Mazatlán, Sinaloa 82000, México.

costa del Pacífico en Baja California y *P. globosa* en el Golfo de California y Bahía Magdalena, BCS. El manejo pesquero de estas dos especies en México se ha basado en el establecimiento de una talla mínima de captura y de una cuota de extracción por banco susceptible de pesca. Por esa razón es fundamental, para mejorar el manejo de la pesquería, generar conocimiento biológico y contribuir en la elaboración de un plan de manejo específico y regional. Estimar los parámetros de crecimiento contribuye, sin lugar a dudas, a plantear estrategias bien fundadas para el aprovechamiento y la conservación, ya que la determinación imprecisa puede provocar una sobreexplotación de poblaciones debido a que estos parámetros están relacionados con los procesos biológicos clave, como la reproducción.

Los estudios de edad y crecimiento coinciden en que las especies del género *Panopea* se caracterizan por ser organismos longevos (la máxima edad registrada para *P. generosa* es de 168 años) y presentar una alta tasa de crecimiento en los primeros diez años para luego disminuirla drásticamente en cuanto a la talla, mientras que el peso de la cocha y el tejido vivo siguen aumentando pero a una tasa de crecimiento pequeña (Goodwin 1976, Shaul y Goodwin 1982, Goodwin y Shaul 1984, Sloan y Robinson 1984, Noakes y Campbell 1992, Hoffmann *et al.* 2000, Bureau *et al.* 2002, Campbell y Ming 2003, Campbell *et al.* 2004, Calderón-Aguilera *et al.* 2010, Cortez-Lucero *et al.* 2011, Cruz-Vásquez *et al.* 2012, González-Peláez 2013, Pérez-Valencia y Aragón-Noriega 2013).

La mayoría de los estudios de crecimiento revisados reportan estimaciones de los parámetros con el modelo de von Bertalanffy (MCVB) para las especies *P. generosa*, *P. abbreviata*, *P. zelandica* y *P. globosa*. La tabla 1 muestra los parámetros estimados en dichos estudios. En México se ha encontrado que para *P. globosa* se ha utilizado la inferencia multimodelo (MMI) con datos promedio (González-Peláez 2013), MMI con datos totales (Cruz-Vásquez *et al.* 2012); sólo el MCVB con datos promedio (Pérez-Valencia y Aragón-Noriega 2013) y MCVB con datos totales (Cortez-Lucero *et al.* 2011). Para *P. generosa* sólo MCVB con datos totales (Botello-Rubalcava *et al.* 2010, Calderón-Aguilera *et al.* 2010).

Se han presentado argumentos a favor de cada tipo de tratamiento de datos para ajustar modelos de crecimiento. González-Peláez (2013) menciona que debido a que los datos de longitud a la edad son muy dispersos en los individuos más viejos de la población, se genera un problema de cálculo de los parámetros, que se resuelve usando sólo el promedio de longitud a cada edad. Por otro lado, Kilada *et al.* (2012) mencionan que los datos promedio no proporcionan la variabilidad individual de la longitud a la edad, sino más bien una evaluación probabilística y agregada de la longitud para organismos a la misma edad. Ésto podría llevar a errores importantes en la estimación de parámetros de crecimiento, ya que es imposible distinguir entre organismos jóvenes de rápido crecimiento y organismos viejos de lento crecimiento.

Por tal razón se realizó este estudio para determinar el efecto del tipo de tratamiento de los datos sobre la estimación de los parámetros de crecimiento de la almeja de sifón, en particular en bancos que se encuentran frente a la Playa del Sol, Sonora, con base en el enfoque multimodelo y el uso de la teoría de información para selección del modelo que mejor describe el crecimiento individual de esta especie.

Materiales y métodos

En el presente estudio se trabajó con modelos de crecimiento y se decidió obtener los parámetros mediante dos tratamientos de los datos. Se utilizó la totalidad de los datos de longitud a la edad (en adelante, datos crudos) y se utilizó el promedio de longitud a la edad (en adelante, datos promedio). Los datos provienen de la Bahía del Sol, ubicada en la región central de la costa oriental del Golfo de California a los 27°53' N - 110°41' O y 27°52.5' N - 110°40' O. Se usaron 267 pares de datos de longitud-edad y los detalles de obtención de medidas de longitud y determinación de la edad se pueden ver en Cortez-Lucero *et al.* (2011).

Para obtener los parámetros de crecimiento se aplicaron cuatro modelos de crecimiento:

1. El de von Bertalanffy (MCVB), que se describe por la ecuación:

$L(t) = L_{\infty}(1 - e^{-k(t-t_0)})$ <p>El MCVB fue utilizado ya que sus parámetros son base para otros modelos a los que se suele recurrir en el análisis biológico pesquero de los recursos explotados. Sin embargo, existen otros tres modelos de crecimiento que fueron evaluados adicionalmente:</p> <p>2. El de Gompertz descrito por la ecuación</p> $L(t) = L_{\infty}e^{-(\frac{1}{k_3})e^{-k_3(t-t_2)}}$ <p>3. El de Schnute descrito por la ecuación (Schnute y Richards 1990)</p> $L(t) = L_{\infty}(1 + \delta e^{k_4 t^{\gamma}})^{1/\gamma}$ <p>4. El Logístico (adaptado de Prager <i>et al.</i> 1989):</p> $L(t) = L_{\infty}(1 - e^{-k_2(t-t_1)})^{-1}$	<p>Ec. 1</p> <p>Ec. 2</p> <p>Ec. 3</p> <p>Ec. 4</p>	<p>Para todos estos modelos los parámetros evaluados se describen como:</p> <p>$L(t)$ longitud a la edad t t edad a la longitud $L(t)$ L_{∞} longitud promedio de un organismo muy viejo (longitud asintótica) k determina la rapidez para alcanzar L_{∞} (parámetro de curvatura) t_0 edad hipotética a la cual la longitud del organismo es cero k_2 tasa relativa de crecimiento t_1 punto de inflexión de la curva sigmoidea t_2 es $\frac{Ln\lambda}{K_3}$ λ es la tasa de crecimiento relativa inicial teórica a la edad cero (unidades de año⁻¹) k_3 es la tasa de decaimiento exponencial de la tasa de crecimiento relativa (unidades de año⁻¹) δ, γ, γ parámetros adimensionales k_4 tiene unidades de año⁻¹</p>
---	---	---

Tabla 1
 Parámetros de crecimiento para especies de almeja de sifón en el mundo.
 En todos ellos se utilizó el modelo de von Bertalanffy

País	Especie	Lugar	L_{∞}	k	t_0	Referencia
Nueva Zelanda	<i>P. zelandica</i>	Golden Bay (40.65°S)	116.5	0.16	-3.8	Breen <i>et al.</i> (1991)
		ShellyBay (41.3°S)	103.6	0.29	-1.69	Gribben y Creese (2005)
		Kennedy Bay (36.67°S)	115.5	0.25	-1.67	Gribben y Creese (2005)
Argentina	<i>P. abbreviata</i>	Puerto Lobos (42°S)	101.32	0.211	-1.5	Morsán y Ciocco (2004)
		Puerto Lobos (42°S)	98.06	0.305	-0.487	Morsán <i>et al.</i> (2010)
		El Sótano (41°S)	109.41	0.23	-2.397	Morsán <i>et al.</i> (2010)
México	<i>P. globosa</i>	Bahía Magdalena (24.65°N)	168.4	0.183	-1.857	González-Peláez (2013)*
		Puerto Peñasco (31°N)	163.88	0.17	-	Pérez-Valencia y Aragón-Noriega (2013)
	<i>P. generosa</i>	Guaymas (27.87°N)	122.86	0.33	-0.2	Cortez-Lucero <i>et al.</i> (2011)
	Islas Coronado (32°N)	138	0.259	-2.04	Calderón-Aguilera <i>et al.</i> (2010)	
	San Quintín (30°N)	133	0.199	-3.19	Calderón-Aguilera <i>et al.</i> (2010)	
Estados Unidos	<i>P. globosa</i>	Punta Canoas (29°N)	117.26	0.33	-	Botello-Rubalcava <i>et al.</i> (2010)
		Hunter Point (47.5°N)	164	0.228	0.719	Hoffmann <i>et al.</i> (2000)
		Herron Island (47.5°N)	132	0.154	0.422	Hoffmann <i>et al.</i> (2000)
		Port Gamble (47.5°N)	140	0.161	0.599	Hoffmann <i>et al.</i> (2000)
Canadá	<i>P. globosa</i>	Fishermans Point (47.5°N)	173	0.235	0.552	Hoffmann <i>et al.</i> (2000)
		Yellow Bank (49°N)	147.7	0.189	-1.42	Campbell y Ming (2003)
		Gabriola Island (49°N)	129.6	0.146	-1.02	Campbell y Ming (2003)
		RitchieBay (49°N) 4 plots, 2000	145.8	0.328	0	Campbell <i>et al.</i> (2004)
		Marina Island (50°N) 3 plots, 2001	136.1	0.252	0	Campbell <i>et al.</i> (2004)

* Utilizó inferencia multimodelo que incluyó el MCVB, por lo que se presenta sólo el valor del MCVB.

Los datos se ajustaron a cada uno de los diferentes modelos de crecimiento antes mencionados con el criterio de máxima verosimilitud utilizando el algoritmo de Newton (Haddon 2001):

$$LL = -\frac{n}{2} [Ln 2\pi + 2 Ln\sigma + 1]$$

considerando $\sigma = \sqrt{\sum \frac{(Lt_{obs} - Lt_{esp})^2}{n}}$ Ec. 5

Selección del mejor modelo

Para elegir el mejor modelo de crecimiento se utilizó el procedimiento que se denomina inferencia multimodelo (IMM), que tiene varias ventajas teóricas prácticas y es un enfoque basado en la teoría de la información. Para este caso en particular se aplicó IMM a los datos de longitud y edad de la especie objeto de estudio, la almeja de sifón *P. globosa*. La selección del modelo basado en la teoría de la información es un paradigma relativamente nuevo en ciencias biológicas y es muy diferente de los métodos tradicionales que pretenden probar una hipótesis nula.

La selección del modelo se llevó a cabo por medio de una forma corregida del Criterio de Información de Akaike (AIC, por sus siglas en inglés) (Burnham y Anderson 2002, Katsanevakis 2006, Katsanevakis y Maravelias 2008). Se asume que las desviaciones están normalmente distribuidas con varianza constante. El modelo con el menor valor de AIC_c ($AIC_{c, \min}$) fue el seleccionado como el mejor.

$$AIC_c = AIC + (2k(k+1))/(n-k-1) \quad \text{Ec. 6}$$

$$AIC = 2LL + (2k) \quad \text{Ec. 7}$$

Donde:

- LL verosimilitud logarítmica negativa
- n número de observaciones
- k número de parámetros en el modelo

Se calcularon para todos los modelos, los valores de Δ_i como las diferencias entre AIC_c :

$$\Delta_i = AIC_{c,i} - AIC_{c,\min} \quad \text{Ec. 8}$$

Para cada modelo se calculó la plausibilidad (el peso de la evidencia a favor del modelo i) me-

dante la “ponderación del criterio de información de Akaike”, como se describe a continuación:

$$w_i = \frac{\exp(-0.5\Delta_i)}{\sum_{k=1}^4 \exp(-0.5\Delta_k)} \quad \text{Ec. 9}$$

Siguiendo el enfoque de la IMM se determinó la L_{∞} (longitud asintótica “promedio”) de todos los modelos candidatos, y se usaron los correspondientes w_i para ponderar:

$$L_{\infty} = \sum_{i=1}^4 w_i \hat{L}_{\infty,i} \quad \text{Ec. 10}$$

De igual manera, se calcularon el error estándar (EE) y el intervalo de confianza a 95% de cada parámetro por modelo candidato.

$$L_{\infty} = \pm t_{d.f., 0.975} EE(\hat{L}_{\infty,i}) \quad \text{Ec. 11}$$

Donde:

$$EE(L_{\infty}) = \sum_{i=1}^4 w_i (\text{var}(\hat{L}_{\infty,i} | g_1) + (\hat{L}_{\infty,i} - L_{\infty})^2)^{1/2} \quad \text{Ec. 12}$$

Este procedimiento se realiza para obtener k , t_0 y L_{∞} ; sin embargo, para los objetivos de este trabajo en particular sólo se siguió para obtener L_{∞} , ya que es la base fundamental para lograr el objetivo planteado en este estudio.

Resultados

Los organismos estudiados presentaron una edad de 2 a 27 años (Tabla 2). Las longitudes mínimas promedio fueron 66.21 ± 9.6 mm de longitud de concha (LC) para los organismos de dos años y la máxima 138.67 ± 22.3 mm de LC para las almejas de diez años. Los datos crudos (Fig. 1) muestran organismos de 45 a 197 mm de LC.

Los parámetros de crecimiento obtenidos en cada uno de los cuatro modelos y para cada uno de los dos tipos de tratamiento de datos se muestran en la tabla 3. En esa misma tabla se muestran, con propósitos de comparación, tres pruebas de bondad de ajuste. Aunque el propósito es sólo utilizar AIC como criterio de selección del mejor modelo para cada uno de los modelos

Tabla 2
Cantidad y frecuencia de datos de *Panopea globosa* obtenidos en la parte central del Golfo de California para calcular la longitud promedio en edades de 2 a 27 años

Edad (años)	Longitud promedio (mm)	Desviación estándar	n	Frecuencia (%)
2	66.21	9.6	14	5.2%
3	74.13	18.7	16	6.0%
4	76.98	20.2	18	6.7%
5	94.92	18.5	12	4.5%
6	96.42	19.2	12	4.5%
7	108.75	13.8	16	6.0%
8	113.23	16.3	22	8.2%
9	118.08	16.1	12	4.5%
10	138.67	22.3	36	13.5%
11	117.67	17.4	9	3.4%
12	116.29	12.1	28	10.5%
13	119.31	7.4	13	4.9%
14	119.15	13.1	13	4.9%
15	119.15	11.7	4	1.5%
16	122.67	23.4	15	5.6%
17	110.80	21.7	5	1.9%
18	100.60	12.6	5	1.9%
19	128.33	20.8	3	1.1%
20	129.25	21.3	4	1.5%
21	76.00		1	0.4%
22	109.33	10.1	3	1.1%
23	97.00		1	0.4%
24	109.00	18.6	4	1.5%
27	112.00		1	0.4%

probados, se obtuvieron la correspondiente cantidad de parámetros (k), AIC, Δ_i , w_i , L_∞ , error estándar (EE) y límites de 95% de confianza de L_∞ . En la *tabla 4* se presentan estos valores para los datos promedios de longitud a la edad. El modelo Logístico resultó ser el mejor para los organismos de *P. globosa* de la parte central del Golfo de California en los dos tipos de tratamiento de datos (*Tabla 4*), pero la jerarquización de los otros tres modelos fue diferente según datos promedio o crudos. Los modelos Gompertz y MCVB recibieron considerable apoyo cuando se usaron datos promedio ya que el aporte de cada uno es superior a 24% y la contribución de ambos supera 49%, según la ponderación de Akaike. Es importante señalar que el modelo de Schnute puede ser apoyado considerablemente por los datos y representa 11.55% en función de la ponderación de Akaike, sólo con el uso de datos pro-

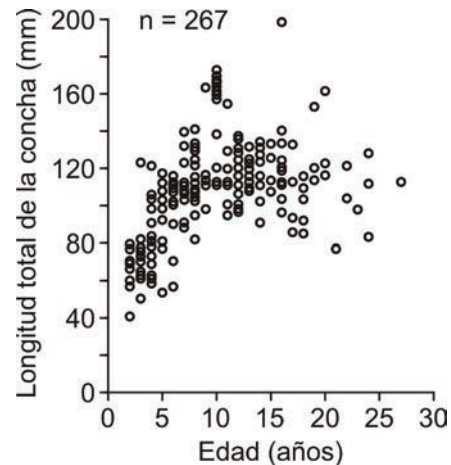


Fig. 1. Distribución de longitud a la edad de los organismos de *Panopea globosa* recolectados en la parte central del Golfo de California.

medio. Cuando se usaron los datos crudos sólo recibieron buen soporte los modelos Logístico (ganador) y Gompertz. Mientras que el MCVB tuvo menos soporte y, definitivamente, de acuerdo con el criterio en la metodología de AIC, el modelo de Schnute no puede ser considerado para describir el crecimiento de *P. globosa* de la parte central del Golfo de California (*Tabla 4*).

Estimación de longitud asintótica

La L_∞ estimada tanto con datos promedio como con datos crudos fue muy similar entre todos los modelos y solamente varió en centésimas de milímetro. La diferencia está en los tipos de tratamiento de los datos. Para datos promedio fue superior a los 114 mm en todos los casos. La L_∞ promedio fue de 114.98 mm con un intervalo a 95% de confianza de 112.91-117.04 mm. Cuando se usaron los datos crudos, la L_∞ estimada fue superior a la de datos promedio en cada uno de los cuatro modelos utilizados. La L_∞ promedio fue de 122.22 mm con un intervalo a 95% de confianza de 116.30-128.14 milímetros.

Curvas de crecimiento

En la *figura 2* se muestran las curvas de crecimiento generadas por los cuatro modelos analizados y según el tipo de datos, crudos (*Fig. 2a*) o promedio (*Fig. 2b*). En ambos casos se observa que hay un traslape importante de las curvas

Tabla 3
Parámetros de los modelos ajustados a los valores “crudos” y promedio de longitud a la edad de *Panopea globosa* de la parte central del Golfo de California

Modelo		L_{∞}	K_i	t_i	λ	v	δ	γ	SC	R^2	AIC
Datos “crudos”	MCVB	122.69	0.345	0.247					91 424	0.967	1 941.22
	Logístico	122.16	0.497	2.260					88 848	0.968	1 934.99
	Gompertz	122.37	0.420	1.401	0.755				89 867	0.968	1 937.72
	Schnute	123.72	2.542			0.00126	-0.0302	0.389	93 722	0.966	1 950.81
Datos promedio	MCVB	114.94	0.414	0.315					4 566	0.9842	200.07
	Logístico	114.99	0.553	1.944					4 394	0.9848	199.15
	Gompertz	114.97	0.481	1.492	-1.796				4 470	0.9845	199.97
	Schnute	114.98	0.012			-0.0025	0.00155	2.746	4 183	0.9855	201.56

Tabla 4
Valores de AIC, Δ_i , w_i y L_{∞} obtenidos de los modelos ajustados con los datos “crudos” y promedios de longitud a la edad, para *Panopea globosa* de la parte central del Golfo de California

		Longitud asintótica (mm)							
Modelo		K	AIC	Δ_i	w_i (%)	Valor estimado	E.E.	95% IC menor	95% IC mayor
Datos “crudos”	Logístico	3	1 934.99	0.00	76.89	122.16	3.00	116.26	128.07
	Gompertz	3	1 937.72	2.73	19.67	122.37	3.02	116.42	128.32
	MCVB	3	1 941.22	6.23	3.41	122.69	3.07	116.63	128.75
	Schnute	5	1 950.81	15.81	0.00	123.72	3.44	116.95	130.49
Promedio						122.22	3.00	116.30	128.14
Datos promedio	Logístico	3	199.15	0.00	38.54	114.99	5.98	112.91	117.07
	Gompertz	3	199.97	0.82	25.59	114.98	5.84	112.89	117.08
	MCVB	3	200.07	0.92	24.32	114.94	6.10	112.87	117.02
	Schnute	5	201.56	2.41	11.55	114.97	6.03	112.89	117.05
Promedio						114.98	5.98	112.91	117.04

de crecimiento, pero en los primeros ocho años de crecimiento sobresale la curva descrita por el modelo de Schnute en ambos casos. Como el propósito es mostrar de la manera más clara posible las diferencias al utilizar los datos crudos y los datos promedio, se presentan en la *figura 3* sólo las curvas del modelo Logístico (por haber sido seleccionado como el mejor en ambos casos), con los dos tipos de datos.

Discusión

Las poblaciones de *P. globosa* son el objeto de una pesquería que crece con rapidez, y la comprensión de los parámetros de crecimiento de la población se hace necesaria para desarrollar estrategias de aprovechamiento sostenibles. Por tanto, la importancia del presente estudio radica

en el uso de la inferencia multimodelo y la aplicación de la teoría de la información de Akaike, para evaluar el crecimiento de *P. globosa* de la parte central del Golfo de California con dos tipos de tratamiento de datos de longitud a la edad.

Los cuatro modelos utilizados en el presente estudio arrojaron resultados similares. Con datos promedio, la longitud asintótica (L_{∞}) fue menor que con los datos crudos. Cuando se calculó la L_{∞} promedio, el valor fue 114.98 mm (IC 95% 112.91-117.04 mm). La L_{∞} promedio de los datos crudos fue de 122.2 mm (IC 95% 116.3-128.1 mm). La posible explicación de esto es que los datos promedio enmascaran la variabilidad implícita en organismos jóvenes de rápido crecimiento y organismos viejos de lento crecimiento (Kilada *et al.* 2012). En particular, cuando se aplican modelos de crecimiento, es común que

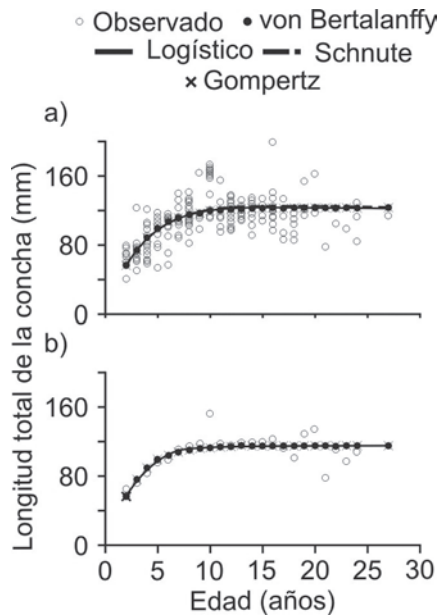


Fig. 2. Curvas de crecimiento generadas para los cuatro modelos aplicados a datos de longitud a la edad a) "crudos" y b) promedio de *Panopea globosa* de la parte central del Golfo de California.

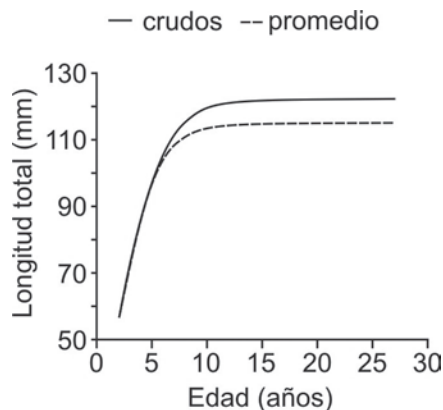


Fig. 3. Curvas de crecimiento generadas por el modelo logístico aplicados a datos de longitud a la edad "crudos" (línea continua) y promedio (línea punteada) de *Panopea globosa* de la parte central del Golfo de California.

se tomen sólo datos promedio de longitud a la edad (Sparre y Venema 1997), por la complejidad de obtener datos crudos de muchas pesquerías. Derivado del presente estudio, al menos para *P. globosa* de la parte central del Golfo de California, no es recomendable usar sólo los datos promedio de crecimiento y se sugiere manejar datos crudos para posteriores análisis de crecimiento de esta especie en cualquier otra región del Golfo de California.

Uno de los propósitos en el presente estudio fue determinar la longitud asintótica con la mayor y mejor información posible. En estudios anteriores, los parámetros de crecimiento de otras especies de almeja de sifón se calcularon utilizando un algoritmo basado en el método de mínimos cuadrados (Hoffmann *et al.* 2000, Bureau *et al.* 2002, Bureau *et al.* 2003, Campbell y Ming 2003, Calderón-Aguilera *et al.* 2010). En este estudio se utilizó como criterio la máxima verosimilitud, encontrando que el uso de ésta representa una mejor solución para estimar adecuadamente los parámetros de los modelos de crecimiento individual, tal como lo propuso Katsanevakis (2006) para otros modelos, pero en general la máxima verosimilitud es una prueba más robusta.

Para comparar entre varios modelos de crecimiento individual se utilizaron como criterios de ajuste, el valor de R^2 ajustada, la suma cuadrada de residuos y el criterio de información de Akaike (AIC). En este estudio se pueden ver en la tabla 3 estos tres valores de bondad de ajuste de los modelos aquí utilizados. La selección del modelo basado en la teoría de la información ha sido recomendado como una mejor y más robusta alternativa que los enfoques tradicionales (Katsanevakis 2006, Cerdaneres-Ladrón de Guevara *et al.* 2011). La ventaja de utilizar el AIC es que los modelos probados pueden ordenarse jerárquicamente según su ajuste a los datos, y que pueden obtenerse los parámetros promedio para un modelo, en este caso, de crecimiento individual. Sin embargo, el parámetro promedio deseado (por ejemplo, longitud asintótica) se estima obteniendo la ponderación de Akaike (Burnham y Anderson 2002), es decir, la contribución de cada parámetro es ponderada antes de obtener la media del parámetro deseado (Tabla 4).

El uso de R^2 ajustada y la suma de cuadrados en la selección de modelos no toman en cuenta la estructura del modelo que mejor se ajusta, sino que la decisión para seleccionar el modelo se basa en la complejidad de éste mismo. De hecho, R^2 ajustada y la suma de cuadrados tienden a seleccionar el modelo más complejo (Zhu *et al.* 2009). En contraste, el AIC selecciona el modelo más sencillo porque penaliza la adición de más parámetros al modelo. En el presente estudio, los criterios para la selección del modelo, es

decir, R^2 ajustada, la suma de cuadrados y el AIC, obtuvieron el mismo modelo (Logístico) como el mejor cuando se usaron datos crudos (Tabla 3). Cabe señalar que sólo el modelo de crecimiento de Schnute (Schnute y Richards 1990) incluye cinco parámetros, mientras que los otros tres modelos utilizan tres. A pesar de ello, cuando se usaron datos crudos, ni la R^2 ajustada ni la suma cuadrada de residuos seleccionaron el modelo de Schnute como se esperaba con base en la explicación de Zhu *et al.* (2009), de que estos dos enfoques estadísticos seleccionarían el modelo más complejo debido a que la complejidad aumenta el valor de R^2 ajustada y disminuye la suma cuadrada de residuos. Si se toman en cuenta los resultados de datos promedio de longitud a la edad, la explicación de Zhu *et al.* (2009) es acertada, es decir, al utilizar los datos promedio, el valor más alto de R^2 ajustada y la menor suma de cuadrados fueron obtenidos con el modelo de Schnute (Tabla 3), que fue el más complejo de los cuatro utilizados, es decir, se cumplió el principio de que a mayor complejidad del modelo utilizado, se tiende a aumentar el valor de R^2 ajustada y a disminuir la suma de residuos al cuadrado. En segundo lugar, estos dos enfoques seleccionaron al modelo logístico como el mejor para representar el crecimiento de *P. globosa*.

Aunque el MCVB es el más estudiado y comúnmente aplicado entre todos los modelos de longitud a la edad, su uso como el único modelo de crecimiento no está bien justificado. Con respecto a otros estudios en los que se usaron los AIC, Baer *et al.* (2011) concluyeron que el MCVB no es el modelo óptimo para calcular el crecimiento del lenguado *Psetta maxima*. Resultados similares fueron encontrados por Flores *et al.* (2010) en el erizo de mar *Loxechinus albus*. Está claro que este nuevo enfoque estadístico basado en la teoría de la información se ha vuelto cada vez más popular en la inferencia matemática, pero es muy reciente en estudios biológico-pesqueros, donde ha sido usado por lo menos durante una década. A pesar de ello, Mundry (2011) sugiere emplearlo con precaución en estudios de ecología y propone una mezcla de la utilización de pruebas de hipótesis nula y criterios de teoría de información en circunstancias específicas. Por tanto, se espera que en los estudios pesqueros, el uso de los AIC sea común en la selección de mo-

delos, pero todavía se pueden utilizar pruebas de hipótesis nula con suficiente justificación.

Conclusiones

- Al analizar la información biológica relativa a los parámetros de crecimiento de la almeja de sifón *Panopea globosa* en la parte central del Golfo de California, se demostró que la IMM y el AIC con datos promedio y crudos representan las maneras más sólidas para evaluar parámetros de crecimiento.
- No es recomendable usar sólo los datos promedio de crecimiento y se sugiere recurrir también a datos crudos para posteriores análisis de crecimiento de al menos esta especie en cualquier otra región del noroeste de México.

Agradecimientos

Este estudio forma parte del proyecto Programa de investigación para el seguimiento de la pesquería de almeja generosa (*Panopea* spp.) en la costa del sur de Sonora, México: prospección y evaluación de nuevas áreas de aprovechamiento". Se recibió financiamiento del proyecto CIBNOR 951-1.

Literatura citada

- BAER A, C Schulz, I Traulsen y J Krieter. 2011. Analyzing the growth of turbot (*Psetta maxima*) in a commercial recirculation system with the use of three different growth models. *Aquaculture International* 19: 497-511.
- BOTELLO-RUBALCAVA M, R Villaseñor-Talavera y F Rodríguez-Moren. 2010. *Ordenamiento de pesquerías por recursos estratégicos de México*. Tomo 1. Comisión Nacional de Acuicultura y Pesca. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. México. 289p.
- BREEN PA, C Gabriel y T Tyson. 1991. Preliminary estimates of age, mortality, growth, and reproduction in the hiatellid clam *Panopea zelandica* in New Zealand. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research* 25: 231-237.

- BUREAU D, W Hajas, CM Hand y G Dovey. 2003. Age, size structure and growth parameters of geoducks (*Panopea abrupta* Conrad 1849) from seven locations in British Columbia sampled between 2001 and 2002. *Canadian Technical Reports of Fisheries and Aquatic Sciences* 2494: 1-29.
- BUREAU D, W Hajas, NW Surry, CM Hand, G Dovey y A Campbell. 2002. Age, size structure, and growth parameters of geoducks (*Panopea abrupta* Conrad 1849) from 34 locations in British Columbia sampled between 1993 and 2000. *Canadian Technical Reports of Fisheries and Aquatic Sciences* 2413: 1-84.
- BURNHAM KP y DR Anderson. 2002. *Model selection and multimodel inference: a practical information-theoretic approach*. Springer. New York. 488p.
- CALDERÓN-AGUILERA LE, EA Aragón-Noriega, CM Handy VM Moreno-Rivera. 2010. Morphometric relationships, age, growth and mortality of the geoduck clam *Panopea generosa*, along the Pacific coast of Baja California, Mexico. *Journal of Shellfish Research* 29(2): 319-326.
- CAMPBELL A y MD Ming. 2003. Maturity and growth of the Pacific geoduck clam, *Panopea abrupta*, in Southern British Columbia, Canada. *Journal of Shellfish Research* 22: 85-90.
- CAMPBELL A, CW Yeung, G Dovey y Z Zhang. 2004. Population biology of the Pacific geoduck clam *Panopea abrupta* in experimental plots, Southern British Columbia, Canada. *Journal of Shellfish Research* 23(3): 661-663.
- CERDENARES-LADRÓN DE GUEVARA G, E Morales-Bojórquez y R Rodríguez-Sánchez. 2011. Age and growth of the sailfish *Istiophorus platypterus* (Istiophoridae) in the Gulf of Tehuantepec, Mexico. *Marine Biology Research* 7(5): 488-499.
- CORTEZ-LUCERO G, JA Arreola-Lizárraga, J Chávez-Villalba y EA Aragón-Noriega. 2011. Edad, crecimiento y mortalidad de la almeja de sifón, *Panopea globosa* (Bivalvia: Hiatellidae) en la región central del Golfo de California, México. *Revista Biología Marina y Oceanografía* 46(3): 453-462.
- CRUZ-VÁSQUEZ R, G Rodríguez-Domínguez, E Alcántara-Razo y EA Aragón-Noriega. 2012. Estimation of individual growth parameters of the Cortes Geoduck *Panopea globosa* from the Central Gulf of California using a multimodel approach. *Journal of Shellfish Research* 31(3): 725-732.
- FLORES L, B Ernst y AM Parma. 2010. Growth pattern of the sea urchin, *Loxechinus albus* (Molina 1782) in southern Chile: evaluation of growth models. *Marine Biology* 157(5): 967-977.
- GONZÁLEZ-PELÁEZ SS. 2013. Almeja generosa de Bahía Magdalena: dinámica poblacional y consideraciones para el manejo. Tesis de Doctorado. Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C. La Paz, Baja California Sur. 103p.
- GOODWIN CL. 1976. Observations of spawning and growth of subtidal geoduck (*Panopea generosa* Gould). *Proceedings of the National Shellfish Association* 65: 49-58.
- GOODWIN CL y W Shaul. 1984. Age, recruitment and growth of the geoduck clam (*Panopea generosa* Gould) in Puget Sound Washington. *Washington Department of Fisheries Program Report* 137: 1-30.
- GRIBBEN PE y RG Creese. 2005. Age, growth, and mortality of the New Zealand geoduck clam, *Panopea zelandica* (Bivalvia: Hiatellidae) in two north island populations *Bulletin of Marine Science* 77: 119-135.
- HADDON M. 2001. *Modelling and quantitative methods in fisheries*. Chapman and Hall. Boca Raton. 406p.
- HOFFMANN A, A Bradbury y CL Goodwin. 2000. Modelling geoduck, *Panopea abrupta* (Conrad 1849) population dynamics I. Growth. *Journal of Shellfish Research* 19: 57-62.
- KATSANEVAKIS S. 2006. Modelling fish growth: Model selection, multi-model inference and model selection uncertainty. *Fisheries Research* 81(2-3): 229-235.
- KATSANEVAKIS S y CD Maravelias. 2008. Modelling fish growth: Multi-model inference as a better alternative to *a priori* using von Bertalanffy equation. *Fish and Fisheries* 9(2): 178-187.
- KILADA R, B Sainte-Marie, R Rochette, N Davis, C Vanier y S Campana. 2012. Direct determination of age in shrimp, crabs and lobsters. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 69: 1728-1733.
- MORSAN E y NF Ciocco. 2004. Age and growth model for the southern geoduck, *Panopea abbreviata*, off Puerto Lobos (Patagonia, Argentina). *Fisheries Research* 69: 343-348.
- MORSAN E, P Zaidman, M Ocampo-Reinaldo y N Ciocco. 2010. Population structure, distribution and harvesting of southern geoduck, *Panopea abbreviata*, in San Matias Gulf (Patagonia, Argentina). *Scientia Marina* 74(4): 763-772.
- MUNDRY R. 2011. Issues in information theory-based statistical inference a commentary from a frequentist's perspective. *Behavior and Ecological Sociobiology* 62: 57-68.

- NOAKES DJ y A Campbell. 1992. Use of geoduck clams to indicate changes in the marine environment of Ladysmith Harbor, British Columbia. *Environmetrics* 3: 81-97.
- PÉREZ-VALENCIA SA y EA Aragón-Noriega. 2013. Age and growth of the Cortes geoduck *Panopea globosa* (Dall 1898) in the Upper Gulf of California. *Indian Journal of Marine Science* 42(2): 201-205.
- PRAGER MH, SB Salla y CW Recksiek. 1989. FISHPARM. A microcomputer program for parameter estimation of nonlinear models in fishery science, 2nd edition. Old Dominion University Oceanography Technical report 87. 10p.
- SCHNUTE JT y LJ Richards. 1990. A unified approach to the analysis of fish growth, maturity, and survivorship data. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 47: 24-40.
- SHAUL W y CL Goodwin. 1982. Geoduck (*Panopea generosa*: Bivalvia) age as determined by internal growth lines in the shell. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 39: 632-636.
- SLOAN NA y SMC Robinson. 1984. Age and gonad development in the geoduck clam *Panopea abrupta* (Conrad) from southern British Columbia. *Journal of Shellfish Research* 4: 131-137.
- SPARRE P y SC Venema. 1997. *Introducción a la evaluación de recursos pesqueros tropicales*. Parte 1. Manual. FAO, Roma, Italia. 420p.
- ZHU L, LLi y Z Liang. 2009. Comparison of six statistical approaches in the selection of appropriate fish growth models. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology* 27(3): 457-467.

Recibido: 13 de mayo de 2013.

Aceptado: 17 de diciembre de 2013.