

# Variaciones morfológicas de la concha del mejillón choro, *Modiolus capax*, en dos poblaciones silvestres del suroeste del Golfo de California

Morphological variations of horse mussel shell, *Modiolus capax*, in two wild populations at southwestern Gulf of California

Andrés Martín Góngora-Gómez<sup>1</sup>, Marcial Arellano-Martínez<sup>2</sup>, Griselda Margarita Rodríguez-Figueroa<sup>2</sup>, Juan Antonio Hernández-Sepúlveda<sup>1</sup>, Ana Laura Domínguez-Orozco<sup>1</sup> y Manuel García-Ulloa<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Instituto Politécnico Nacional, Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Sinaloa, Guasave 81101, Sinaloa, México

<sup>2</sup>Instituto Politécnico Nacional, Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas, Av. Instituto Politécnico Nacional s/n, Col. Playa Palo de Santa Rita, La Paz 23096, Baja California Sur, México

\*Autor corresponsal: [turbotuag@hotmail.com](mailto:turbotuag@hotmail.com)

**Abstract.** - Shape and growth of bivalve mollusks shell varies between and within each species in response to numerous biotic and abiotic factors. Biometric indices and morphometric relationships of the shell from two *Modiolus capax* mussel populations inhabiting the southwest Gulf of California, were evaluated. 60 mussels were collected from Santa Rosalía (SR) and La Paz Bay (LP) during each annual season, from summer 2019 to summer 2020. Water temperature, dissolved oxygen, pH, depth, and transparency were determined in each sampling by location. SR mussels were larger and heavier, with a shell shape more compact and convex. Morphometric interactions of shell dimensions for the two populations were linear. Height/length and height/width relationships of the shell resulted in relative growth of positive allometric type, while length/width of the shell presented negative allometry. The highest correlation coefficient was obtained for the height/width interaction of the shell in both populations. The strongest interaction in SR and LP was found during winter 2019 and fall 2019, respectively. Morphometric relationships for total populations showed the same pattern as those obtained by the annual season. Results reveal differences in size, morphology, and morphometry of the shell when comparing both populations of *M. capax*, which reflects a situation of stress and/or adaptation of the species to the conditions of each place.

**Key words:** Relative growth, mussel, coefficient of variation, environmental effects, Gulf of California

**Resumen.** - La forma y crecimiento de la concha de los moluscos bivalvos varía entre y dentro de cada especie, en respuesta a numerosos factores bióticos y abióticos. Se evaluaron los índices biométricos y relaciones morfométricas de la concha de dos poblaciones del mejillón *Modiolus capax* en el suroeste del Golfo de California. Se colectaron 60 mejillones de Santa Rosalía (SR) y Bahía de La Paz (LP) en cada estación anual, desde verano 2019 a verano 2020. La temperatura del agua, oxígeno disuelto, pH, profundidad y transparencia se determinaron en cada muestreo por localidad. Los mejillones de SR fueron más grandes y pesados, con la forma de su concha más compacta y convexa. Las interacciones morfométricas de las dimensiones de la concha para las dos poblaciones fueron lineales. Las relaciones de la altura/longitud y altura/ancho de la concha resultaron en un crecimiento relativo de tipo alométrico positivo, mientras que la longitud/ancho de la concha presentó alometría negativa. El mayor coeficiente de correlación se obtuvo para la interacción altura/ancho de la concha en ambas poblaciones. La interacción más fuerte en SR y LP se encontró durante invierno 2019 y otoño 2019, respectivamente. Las relaciones morfométricas para el total de las poblaciones mostraron el mismo patrón que las obtenidas por estación anual. Los resultados revelan diferencias en talla, morfología y morfometría de la concha entre las dos poblaciones de *M. capax*, lo que refleja una situación de estrés y/o adaptación de la especie a las condiciones de cada lugar.

**Palabras clave:** Crecimiento relativo, mejillón, coeficiente de variación, efectos del medio ambiente, Golfo de California



## INTRODUCCIÓN

La formación y estructura de la concha de los moluscos bivalvos están determinadas por el efecto de factores internos, como la genética de cada especie (Clark *et al.* 2020), y externos, que son representados por la temperatura (Gizzi *et al.* 2016), pH (Zhao *et al.* 2017), procesos hidrodinámicos (Telesca *et al.* 2019), alimento (Norkko *et al.* 2005) y actividades antropogénicas (Stewart *et al.* 2021), entre otros; entonces, las variaciones morfológicas de dicho exoesqueleto entre organismos de la misma especie, responden en gran medida, a cambios en dichos factores. El uso de indicadores biométricos de la concha que relacionan sus dimensiones, representa una útil herramienta para evaluar las modificaciones de su forma (Caill-Milly *et al.* 2014). Por otro lado, el análisis morfométrico en bivalvos permite determinar la relación entre la longitud, altura y ancho de la concha (Gaspar *et al.* 2002), posibilitando la comparación del crecimiento relativo entre una o varias poblaciones de la misma especie (Karakulak *et al.* 2006). De esta forma, las variaciones en las dimensiones de la concha y el crecimiento de los organismos que habitan en diferentes localidades o regiones pueden ser categorizadas en función del efecto de factores ambientales y/o antropogénicos de cada zona (Scalici *et al.* 2017).

El mejillón choro, *Modiolus capax* (Conrad, 1837), es un bivalvo que se distribuye desde el sur de Santa Cruz, California, EE.UU., hasta Perú e Islas Galápagos (Coan & Valentich-Scott 2012). En el litoral mexicano, se le encuentra a lo largo de la costa occidental del golfo de California, donde es abundante en Baja California Sur, con importantes bancos en Bahía Concepción y el puerto minero de Santa Rosalía (Olguín 1976). Presenta moderadas poblaciones en San Lucas, Mulegé, Loreto (Muñoz-Barbosa & Huerta-Díaz 2013) y Bahía de La Paz (García-Corona *et al.* 2018). Debido a la existencia de varias especies de moluscos de mayor importancia comercial en el oeste del Golfo de California como *Atrina maura* (Sowerby, 1786) (Pinnidae), *Megapitaria squalida* (GB Sowerby I, 1835) (Veneridae) y *Dosinia ponderosa* (Gray, 1838) (Veneridae), entre otras, el consumo de mejillón en esta zona es limitado (García-Corona *et al.* 2018). Los estudios disponibles de *M. capax* en la región documentan la biología reproductiva de poblaciones silvestres (Ochoa-Báez 1985, Garza-Aguirre & Bückle-Ramírez 1989, García-Corona *et al.* 2018), la gametogénesis inducida en laboratorio mediante dietas enriquecidas con carbohidratos

(López-Carvallo *et al.* 2017) y la descripción de su ciclo reproductivo (García-Domínguez *et al.* 2018). A pesar de la sobresaliente importancia de este grupo de moluscos como bioindicadores (Goldberg 1975, Farrington *et al.* 2016), no existe información que evalúe el efecto del entorno ambiental en la morfología de este mejillón en el Golfo de California.

El objetivo del presente trabajo fue determinar los índices biométricos y las relaciones morfométricas de la concha de *M. capax* en el suroeste del Golfo de California, durante cinco estaciones anuales, para documentar diferencias con base a la comparación de dos poblaciones de diferente latitud y con distinto nivel de impacto ambiental/antropogénico. Se infiere que los indicadores biométricos y relaciones morfométricas de la concha de este bivalvo serán diferentes al ser dictadas por las condiciones de cada lugar. Los datos obtenidos pueden ser usados para explicar las posibles diferencias de dichos indicadores en poblaciones de la misma especie de otras latitudes dentro del Golfo de California.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Los sitios de muestreo, Santa Rosalía y Bahía de La Paz, se localizan en la línea costera de Baja California Sur, dentro del Golfo de California (Fig. 1). El puerto minero de Santa Rosalía (SR) (27°20'20"N; 112°16'01"O) está ubicado en la costa norte del estado, tiene una población que sobrepasa los 22.000 habitantes y las principales actividades son la minería, turismo y pesca. Su clima es árido, con una temperatura y precipitación promedio anual de 23,4 °C y 117,2 mm. El punto de muestreo en SR se ubicó por fuera de la dársena o escollera, a una profundidad promedio de 3 m, que se caracteriza por estar expuesto al oleaje (Rodríguez-Figueroa 2004). La Bahía de La Paz (LP) (24°18'6,68"N; 110°20'8,79"O) se localiza al sur de la península, cuenta con una población superior a 250.000 habitantes, donde el comercio, turismo y pesca representan las principales actividades económicas. La precipitación promedio anual es menor a 200 mm y el clima es desértico, con temperaturas máxima y mínima de 44 °C y 16,8 °C, respectivamente (Coen & Cruz-Bello 2019). El punto de muestreo fue a una profundidad promedio de 1,9 m, localizado en la costa sureste de la bahía, con oleaje moderado.

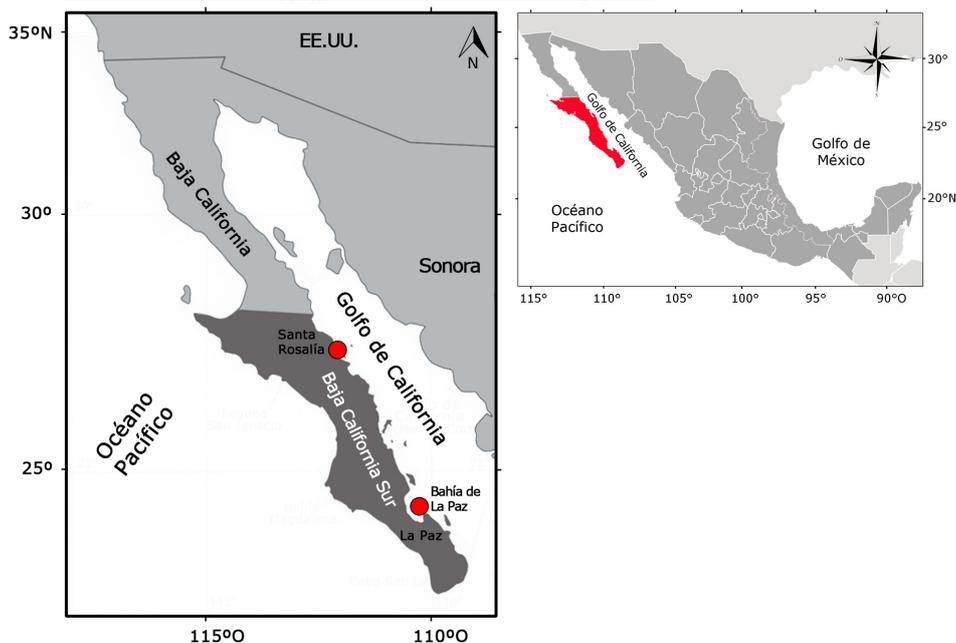


Figura 1. Sitios de muestreo de *Modiolus capax* (Santa Rosalía, Bahía de La Paz) en Baja California Sur, México / Sampling sites (Santa Rosalía, La Paz Bay) in Baja California Sur, Mexico

En las estaciones del año, desde verano 2019 a verano 2020, se colectaron 60 mejillones del fondo rocoso de cada localidad ( $n= 300$  por sitio) mediante buceo asistido en SR y buceo autónomo en LP. En cada muestreo, fue registrada la temperatura del agua, oxígeno disuelto [con un oxímetro modelo YSY 55/12FT (Yellow Springs Instruments, Ohio, USA)], salinidad [con un refractómetro óptico ATAGO, S/ Mill, (Atago Co. Ltd., Tokyo, Japón)], pH [con un medidor portátil Hanna HI 8314 (Hanna instrument, USA)], además de la profundidad y transparencia (disco Secchi). Los mejillones se colocaron en una hielera con agua de mar ( $\approx 4$  °C) para su transporte al Laboratorio de Malacología del CIIDIR- Unidad Sinaloa, en donde fueron separados y limpiados individualmente para eliminar organismos epibiontes de sus conchas.

Para obtener los indicadores biométricos y las relaciones morfométricas de la concha (altura-AI, longitud-Lo y ancho-An) cada mejillón de las dos poblaciones (SR y LP) fue medido con un vernier digital (0,001 mm, Mitutoyo®, CD-8" CS). Adicionalmente, se obtuvo el peso corporal (PC) mediante una balanza granataria (0,001 g, OHAUS®, Scout

Pro SP 2001). Se reportó estadística descriptiva (promedio, desviación estándar, coeficiente de variación CV, valores mínimo y máximo) para los datos totales de las dimensiones de la concha y peso corporal por población. Los datos fueron analizados para normalidad y homocedasticidad con las pruebas de Shapiro-Wilk y Bartlett, respectivamente. Se realizó un análisis de varianza y una prueba de Tukey para detectar y destacar diferencias estadísticas entre las dimensiones de los mejillones ( $\alpha = 0,05$ ). Se aplicó la prueba t-Student ( $P < 0,05$ ) para detectar diferencias en las dimensiones de la concha entre mejillones de cada localidad, tanto por estación anual como para las poblaciones totales. La longitud (LC, distancia máxima entre los márgenes anterior y posterior), altura (ALC, la distancia máxima desde el umbo hasta el margen ventral) y ancho (ANC, distancia máxima entre las partes más gruesas de las valvas) de la concha de cada espécimen fueron usadas para obtener los indicadores biométricos: elongación (ALC/LC), redondez o compactación (ANC/LC) y convexidad (ANC/ALC) (Holopainen & Kuiper 1982, Dekhta 2002<sup>1</sup>, Selin 2007). Las diferencias entre las dos poblaciones se analizaron con la prueba de Wilcoxon-Mann-Whitney ( $P = 0,05$ ).

<sup>1</sup>Dekhta VA. 2002. Analysis of the conservative variability of the Mediterranean mussel *Mytilus galloprovincialis*-A reliable method for indicating the environmental quality of the coastal zone of the Black Sea. International Seminar. Modern problems of physiology and ecology of marine animals (fish, birds, mammals): Abstracts of Reports. International Seminar (Rostov-on-Don, 11-13 September, 2002), pp. 58-61.

Para determinar las relaciones morfométricas de *M. capax* se consideraron LC, ALC y ANC. Se aplicó una prueba de Durbin-Watson y el gráfico cuantil-cuantil (R Core Team 2018) para eliminar los valores atípicos del conjunto de datos de cada estación y analizar los residuos para determinar la distribución normal, respectivamente. Las relaciones morfométricas entre las diferentes dimensiones de la concha (Lo/Al, Lo/An y Al/An, n= 300) para cada localidad se obtuvieron con la ecuación lineal:

$$Y = bX + a$$

donde, Y y X = dimensiones de la concha (Lo, Al y An, mm); a = intersección y b = pendiente.

En las relaciones morfométricas con igual unidad de medida, como las dimensiones de la concha (mm), el exponente  $b = 1$  indica un crecimiento isométrico. Para detectar diferencias en los valores isométricos de  $b$  ( $b = 1$ ) o el rango alométrico (alometría negativa,  $b < 1$ , o alometría positiva,  $b > 1$ ), se utilizó la prueba t de Student (nivel de confianza de 95%) con la ecuación:

$$t = (b-1)/S_b$$

donde, t es el valor de la prueba, b es la pendiente y  $S_b$  es el error estándar de la pendiente (Vasconcelos *et al.* 2018). Con el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) se analizó la bondad de ajuste de los datos (Sokal & Rohlf 1995). La estadística fue realizada con el programa STATGRAPHICS Centurion XV.II. (Statgraphics.Net, Madrid).

## RESULTADOS

Los parámetros fisicoquímicos de la columna de agua en ambos lugares (SR y LP) presentaron un patrón de fluctuación de acuerdo con las estaciones del año (Tabla 1). La temperatura promedio de SR fue de 22,4 °C, mientras que en LP fue de 26,5 °C, con una diferencia de 7,1 °C en invierno y 2,7 °C en verano entre ambas localidades. La máxima profundidad fue registrada en LP (4 m), mientras que el valor de mayor transparencia del agua (2,8 m) se obtuvo en SR.

Los índices biométricos de la concha de *M. capax* en las dos localidades fueron diferentes ( $W = 13,45$ ;  $P = 0,001$ ). La mayor compactación y convexidad de la concha se encontró en los especímenes de La Paz, mientras que la elongación fue mayor para los mejillones de Santa Rosalía (Tabla 2).

**Tabla 2. Índices biométricos (media ± desviación estándar) para la concha de *Modiolus capax* de Santa Rosalía y Bahía de La Paz, Baja California Sur, México (N= 300 por localidad) / Biometric indices (mean ± standard deviation) for *Modiolus capax* shell from Santa Rosalía and La Paz Bay, Baja California Sur, Mexico (N= 300 at each site)**

Índice biométrico	Santa Rosalía	La Paz	W P = 0,001
Elongación (Al/Lo)	1,98 ± 0,02 <sup>b</sup>	1,91 ± 0,13 <sup>b</sup>	-6618
Compactación (An/Lo)	0,79 ± 0,01 <sup>a</sup>	0,83 ± 0,07 <sup>b</sup>	29200
Convexidad (An/Al)	0,40 ± 0,01 <sup>a</sup>	0,43 ± 0,01 <sup>b</sup>	16145

Lo= longitud de la concha, Al= altura de la concha, An= ancho de la concha. Por índice biométrico, las letras en superíndice indican diferencias significativas ( $P < 0,05$ ). W= Prueba de Wilcoxon

**Tabla 1. Parámetros fisicoquímicos del agua en Santa Rosalía (SR) y Bahía de La Paz (LP), Baja California Sur, México, durante 2019-2020 / Water physicochemical parameters in Santa Rosalía (SR) and La Paz Bay (LP), Baja California Sur, Mexico, during 2019-2020**

	Verano 2019	Otoño 2019	Invierno 2019	Primavera 2020	Verano 2020
SR					
T	27	20,9	16	21	27,2
Salinidad	35	36	35	35	35
pH	8,17	8,21	7,85	7,93	8,02
OD	5,75	7,49	8,75	7,21	3,55
Prof.	4	4	1,5	1,6	1,6
Trans.	4	4	1,5	1,6	1,6
LP					
T	29,7	24,5	23,1	25,3	30,1
Salinidad	35	36	35	34	35
pH	8,04	8,26	7,84	7,57	8,02
OD	4,78	6,1	5,63	1,55	2,71
Prof.	1,15	3	2,8	1,2	1
Trans.	1,15	3	2,8	1,2	1

T= temperatura del agua, °C; salinidad= g L<sup>-1</sup>; pH= unidades de pH; OD= oxígeno disuelto, mg L<sup>-1</sup>; Prof.= profundidad, m; Trans.= transparencia, m

Los parámetros biométricos de *M. capax* mostraron en cada sitio diferencias significativas ( $F= 21,69$ ;  $P = 0,05$ ) por estación anual (Tablas 3 y 4). Los mejillones más grandes (ALC) en SR se encontraron durante el verano de 2020 ( $105,60 \pm 12,42$  mm), y los más pesados en primavera de 2020 ( $144,09 \pm 49,42$  g). El CV para las dimensiones de concha no sobrepasó 15,11%, mientras que el CV para PT presentó un intervalo de 31,41% (otoño 2019) a 42,67% (invierno 2020) (Tabla 3). En LP, los valores más altos de ALC y PT ( $102,40 \pm 10,96$  mm y  $127,94 \pm 40,18$  g, respectivamente) se obtuvieron en verano 2019 (Tabla 4). Para las dimensiones

de la concha, el CV no rebasó 18,82%, mientras que para PT mostró un intervalo de 31,14% en primavera 2019 a 42,53% en invierno 2019. La prueba de t-Student mostró diferencias significativas ( $P = 0,05$ ) en todas las dimensiones de la concha al comparar los mejillones de cada localidad, tanto por estación anual como para las poblaciones totales (Tabla 5). Los mejillones de SR presentaron los valores promedio más altos (LC=  $52,29 \pm 4,59$  mm; ALC=  $100,08 \pm 12,71$  mm; ANC=  $43,82 \pm 5,44$  mm; PT=  $126,60 \pm 45,93$  g).

**Tabla 3. Estadística descriptiva por estación anual para los biométricos de *Modiolus capax* habitando Santa Rosalía (SR), Baja California Sur, México (2019-2020)** / Seasonally descriptive statistics for *Modiolus capax* biometrics inhabiting Santa Rosalía (SR), Baja California Sur, Mexico (2019-2020)

Parámetro	Estación anual (SR)				
	Verano 2019	Otoño 2019	Invierno 2019	Primavera 2020	Verano 2020
<b>LC (mm)</b>					
Promedio	49,86 <sup>a</sup>	53,54 <sup>b</sup>	51,03 <sup>a</sup>	53,68 <sup>b</sup>	53,38 <sup>b</sup>
DE	4,93	4,58	4,85	3,77	4,86
Max	60,90	63,25	61,85	61,23	72,58
Min	39,62	39,97	41,89	46,37	45,95
CV (%)	9,88	8,55	9,51	7,03	9,11
CL95%	Promedio $\pm$ 1,24	Promedio $\pm$ 1,15	Promedio $\pm$ 1,22	Promedio $\pm$ 0,95	Promedio $\pm$ 1,23
<b>ALC (mm)</b>					
Promedio	94,13 <sup>a</sup>	102,40 <sup>b</sup>	94,14 <sup>a</sup>	104,13 <sup>b</sup>	105,60 <sup>b</sup>
DE	12,66	10,96	14,22	13,33	12,42
Max	118,55	129,61	124,98	137,60	135,69
Min	61,54	68,58	72,12	73,51	77,41
CV (%)	13,45	10,70	15,11	12,80	11,76
CL95%	Promedio $\pm$ 3,20	Promedio $\pm$ 2,77	Promedio $\pm$ 3,60	Promedio $\pm$ 3,37	Promedio $\pm$ 3,14
<b>ANC (mm)</b>					
Promedio	40,61 <sup>a</sup>	45,73 <sup>b</sup>	41,53 <sup>a</sup>	45,67 <sup>b</sup>	45,60 <sup>b</sup>
DE	5,02	5,23	5,99	5,47	5,49
Max	52,43	56,57	55,64	59,11	62,13
Min	27,98	31,96	30,48	32,86	34,35
CV (%)	12,37	11,44	14,43	11,99	12,05
CL95%	Promedio $\pm$ 1,27	Promedio $\pm$ 1,32	Promedio $\pm$ 1,51	Promedio $\pm$ 1,38	Promedio $\pm$ 1,39
<b>PT (g)</b>					
Promedio	105,56 <sup>a</sup>	127,94 <sup>bc</sup>	113,75 <sup>ab</sup>	144,09 <sup>c</sup>	141,68 <sup>c</sup>
DE	37,70	40,18	48,54	49,42	53,85
Max	191,6	227,0	256,6	302,5	328,0
Min	32,00	45,60	51,00	58,80	23,00
CV (%)	35,71	31,41	42,67	34,30	38,01
CL95%	Promedio $\pm$ 9,54	Promedio $\pm$ 10,16	Promedio $\pm$ 12,28	Promedio $\pm$ 12,50	Promedio $\pm$ 13,62

Mensualmente, para cada parámetro, las líneas con letra diferente denotan diferencias significativas (ANDEVA,  $P \leq 0,05$ )

LC: longitud de la concha;  $F= 8,57$ ,  $P= 0,0001$ ; ALC: altura de la concha,  $F= 11,31$ ,  $P= 0,0001$ ; ANC: ancho de la concha,  $F= 12,99$ ,  $P= 0,0001$ ; PT: peso corporal,  $F= 7,98$ ,  $P= 0,0001$ )

DE= desviación estándar; Max= límite máximo; Min= límite mínimo; CV= coeficiente de variación; CL95%= límites de confianza para valores medios al 95%

**Tabla 4. Estadística descriptiva por estación anual para los biométricos de *Modiolus capax* habitando Bahía de La Paz (LP), Baja California Sur, México (2019-2020).** / Seasonally descriptive statistics for *Modiolus capax* biometrics inhabiting La Paz Bay (LP), Baja California Sur, Mexico (2019-2020). DE= standard deviation; Max= maximum limit; Min= minimum limit; CV= coefficient of variation; CL95%= confidence limits for mean values at 95%

Parámetro	Estación anual (LP)				
	Verano 2019	Otoño 2019	Invierno 2019	Primavera 2020	Verano 2020
<b>LC (mm)</b>					
Promedio	53,54 <sup>bc</sup>	40,05 <sup>ab</sup>	39,81 <sup>a</sup>	42,59 <sup>c</sup>	42,03 <sup>c</sup>
DE	4,58	3,74	6,34	3,05	3,67
Max	63,25	51,43	46,83	49,85	48,79
Min	39,97	33,86	13,21	33,76	33,06
CV (%)	8,55	9,34	15,94	7,18	8,73
CL95%	Promedio ± 1,15	Promedio ± 0,94	Promedio ± 1,60	Promedio ± 0,77	Promedio ± 0,92
<b>ALC (mm)</b>					
Promedio	102,40 <sup>c</sup>	76,30 <sup>a</sup>	79,27 <sup>a</sup>	81,96 <sup>c</sup>	80,77 <sup>c</sup>
DE	10,96	10,27	13,65	9,36	10,65
Max	129,61	104,55	101,58	106,18	103,57
Min	68,58	61,06	43,20	64,05	61,42
CV (%)	10,70	13,46	17,21	11,42	13,18
CL95%	Promedio ± 2,77	Promedio ± 2,60	Promedio ± 3,45	Promedio ± 2,36	Promedio ± 2,69
<b>ANC (mm)</b>					
Promedio	45,73 <sup>c</sup>	31,32 <sup>a</sup>	31,27 <sup>a</sup>	33,32 <sup>bc</sup>	32,17 <sup>c</sup>
DE	5,23	3,87	4,31	6,27	3,78
Max	56,57	43,37	41,12	74,71	42,08
Min	31,96	26,08	19,25	27,33	23,97
CV (%)	11,44	12,37	13,80	18,82	11,77
CL95%	Promedio ± 1,32	Promedio ± 0,98	Promedio ± 1,09	Promedio ± 1,58	Promedio ± 0,95
<b>PT (g)</b>					
Promedio	127,94 <sup>c</sup>	45,61 <sup>a</sup>	56,78 <sup>b</sup>	60,72 <sup>bc</sup>	62,21 <sup>bc</sup>
DE	40,18	16,18	24,15	18,91	23,75
Max	227,0	93,7	114,9	112,9	148,7
Min	45,6	24,7	12,2	28,6	29,5
CV (%)	31,41	35,48	42,53	31,14	38,18
CL95%	Promedio ± 10,16	Promedio ± 4,09	Promedio ± 6,11	Promedio ± 4,78	Promedio ± 9,66

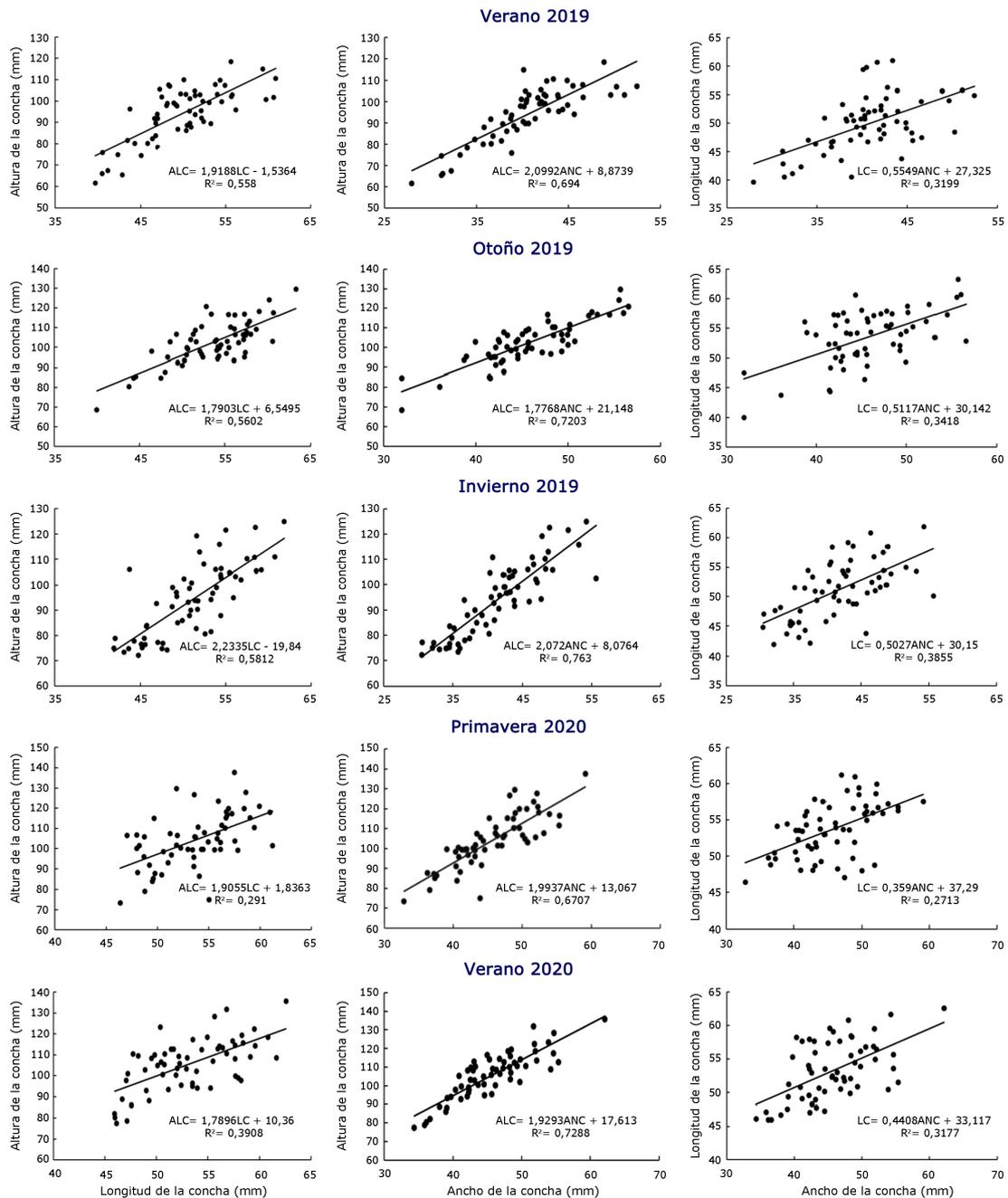
Para cada parámetro y por estación anual, las líneas con letra diferente denotan diferencias significativas (ANDEVA,  $P \leq 0,005$ )

LC: longitud de la concha;  $F= 4,99$ ,  $P= 0,0007$ ; ALC: altura de la concha;  $F= 11,68$ ,  $P= 0,0001$ ; ANC: ancho de la concha,  $F= 5,29$ ,  $P= 0,0004$ ; PT: peso corporal,  $F= 9,40$ ,  $P= 0,0001$ )

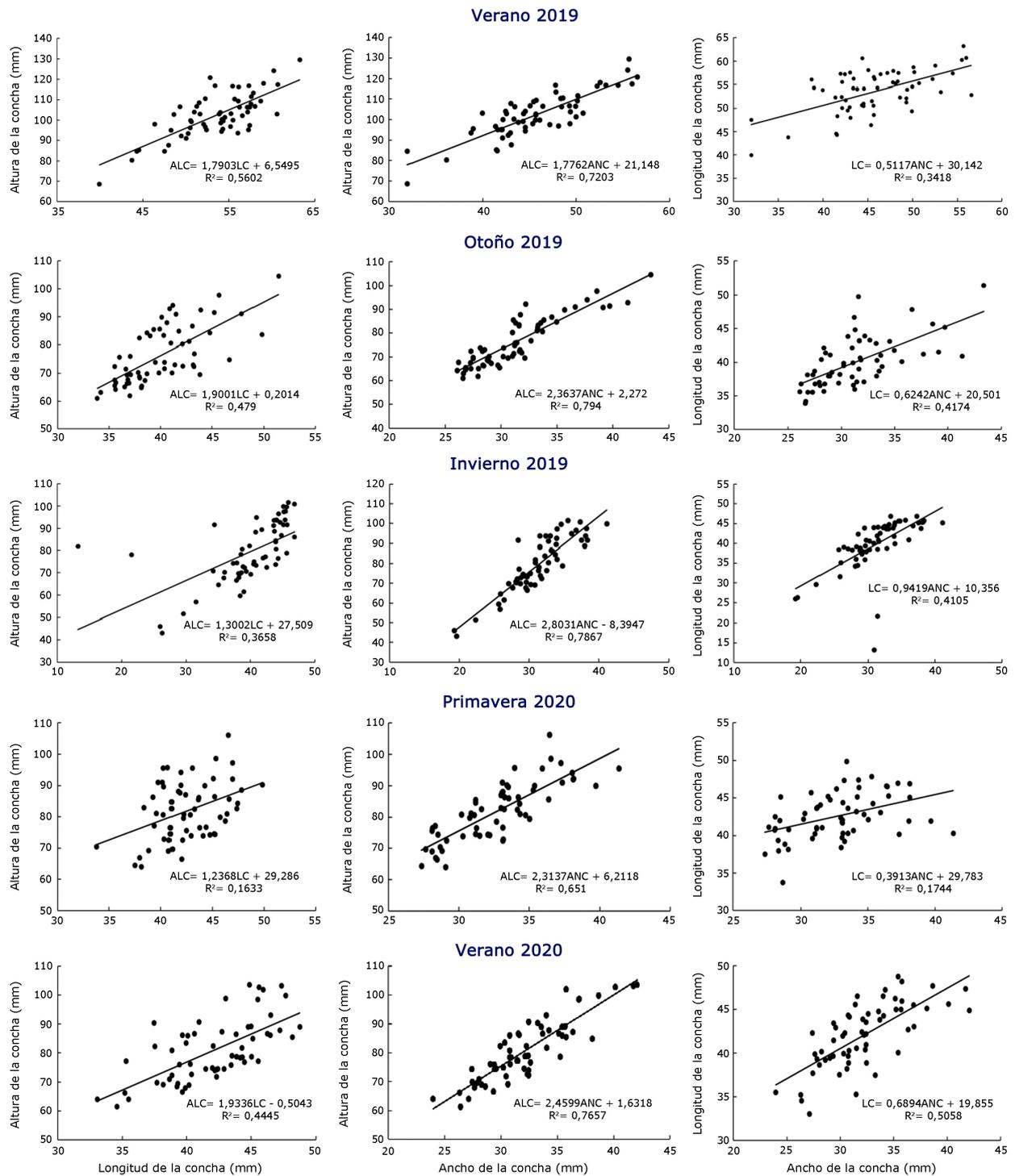
DE= desviación estándar; Max= límite máximo; Min= límite mínimo; CV= coeficiente de variación; CL95%= límites de confianza para valores medios al 95%

Por estación anual y en cada sitio, las relaciones morfométricas entre las dimensiones de la concha LC, ALC y ANC muestran tendencia lineal. En SR, el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) presentó un intervalo de 0,27 (LC/ANC en primavera 2020) a 0,76 (ALC/ANC en invierno 2019) (Fig. 2); mientras que para LP el valor más bajo ( $R^2= 0,16$ ) se obtuvo en primavera 2020 para la relación ALC/LC y el más alto ( $R^2= 0,79$ ) se registró en otoño 2019 para ALC/ANC (Fig. 3). Tanto en SR como en LP, las relaciones morfométricas ALC/LC y ALC/ANC mostraron un crecimiento alométrico positivo ( $b > 1$ ); mientras que LC/ANC presentó alometría negativa ( $b < 1$ ).

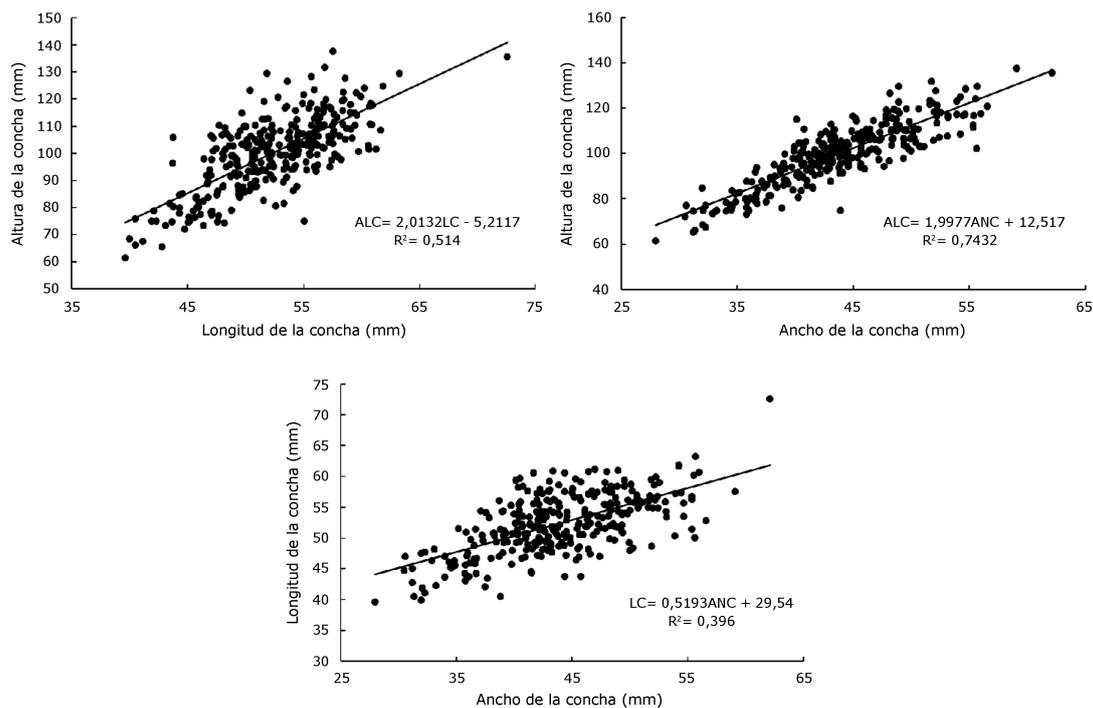
La misma tendencia se observó para las poblaciones totales de ambos lugares (Figs. 4 y 5). En SR y LP, la ecuación que describe mejor su crecimiento relativo fue la interacción ALC/ANC (ALC= 1,9977ANC + 12,517 y ALC= 1,7071ANC + 24,799, respectivamente para cada sitio de colecta).



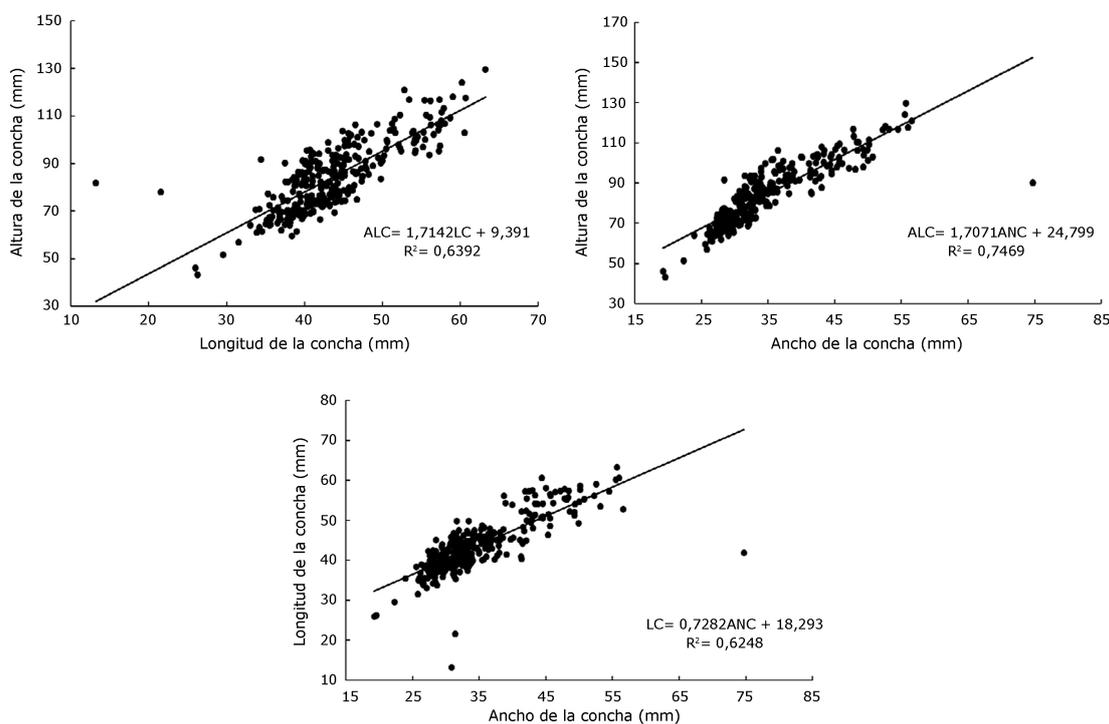
**Figura 2. Relaciones morfométricas por estación anual (N= 60) entre las dimensiones de la concha (largo LC, alto ALC y ancho ANC) para *Modiolus capax* habitando Santa Rosalía, Baja California Sur, México (2019-2020). R<sup>2</sup>= coeficiente de determinación / Seasonally morphometric relationships (N= 60) between shell dimensions (length LC, height ALC, and width ANC) for *Modiolus capax* inhabiting Santa Rosalía, Baja California Sur, Mexico (2019-2020). R<sup>2</sup>= coefficient of determination**



**Figura 3. Relaciones morfométricas por estación anual (N= 60) entre las dimensiones de la concha (largo LC, alto ALC y ancho ANC) para *Modiolus capax* habitando Bahía de La Paz, Baja California Sur, México (2019-2020). R<sup>2</sup>= coeficiente de determinación / Seasonally morphometric relationships (N= 60) between shell dimensions (length LC, height ALC, and width ANC) for *Modiolus capax* inhabiting La Paz Bay, Baja California Sur, Mexico (2019-2020). R<sup>2</sup>= coefficient of determination**



**Figura 4. Relaciones morfométricas (N= 300) entre las dimensiones de la concha (largo LC, alto ALC y ancho ANC) para *Modiolus capax* habitando Santa Rosalía, Baja California Sur, México (2019-2020). R²= coeficiente de determinación / Morphometric relationships (N= 300) between shell dimensions (length LC, height ALC, and width ANC) for *Modiolus capax* inhabiting Santa Rosalía, Baja California Sur, Mexico (2019-2020). R²= coefficient of determination**



**Figura 5. Relaciones morfométricas (N= 300) entre las dimensiones de la concha (largo LC, alto ALC y ancho ANC) para *Modiolus capax* habitando Bahía de La Paz, Baja California Sur, México (2019-2020). R²= coeficiente de determinación / Morphometric relationships (N= 300) between shell dimensions (length LC, height ALC, and width ANC) for *Modiolus capax* inhabiting La Paz Bay, Baja California Sur, Mexico (2019-2020). R²= coefficient of determination**

## DISCUSIÓN

Existe evidencia suficiente que confirma el efecto de factores externos sobre la variación de la forma de la concha y morfometría de bivalvos, ya sean impactos naturales (Singh 2017, Telesca *et al.* 2018) o antropogénicos (Dar *et al.* 2018, Stewart *et al.* 2021). Ambas regiones en este estudio presentaron un patrón estacional anual de condiciones físicas y químicas en concordancia a su latitud, por ejemplo, el descenso de la temperatura en otoño e invierno. El intervalo anual de la temperatura superficial de la columna de agua registrada en SR coincide con la tendencia documentada de 2011 a 2013 por Yee-Duarte *et al.* (2020) y al rango reportado por Arce-Peinado *et al.* (2018) en 2015, para el mismo puerto. En el caso de la temperatura superficial de la columna de agua en LP, el intervalo entre el gradiente máximo y mínimo registrado en este estudio es similar a los trabajos de García-Domínguez *et al.* (2018) de 8 °C en 2008-2009 y García-Corona *et al.* (2018) de 8,8 °C en 2013-2014 para la misma bahía. Sin embargo, es importante destacar que la temperatura promedio entre ambos sitios presentó una diferencia de casi 5 °C, siendo SR más frío.

En ambos lugares, la variación de los indicadores biométricos y relaciones morfométricas obtenidas para *Modiolus capax* reflejan el efecto de las variaciones de algunos parámetros en cada región, las cuales tendrían algún efecto en su desarrollo (Bergström & Lindergarth 2016). Por ejemplo, las tallas mayores indican la probable influencia de un ambiente más frío y oxigenado, con mayor cantidad de nutrientes que llegan a la zona de plataforma estrecha en SR, que está expuesto a condiciones más oceánicas. Mientras que, en el sistema semicerrado de LP, el estrés en los mejillones por depleción de los niveles de oxígeno, sobre todo en los veranos analizados, expone su sensibilidad a condiciones desfavorables que afectan su talla. Lo anterior, coincide con las observaciones de Telesca *et al.* (2018) para 16 poblaciones de los mejillones azules *Mytillus edulis* y *M. trossolus* a lo largo de las costas del Atlántico norte, Ártico y Mar Báltico, cuya plasticidad y heterogeneidad en la forma de sus conchas dependió de factores como la salinidad, temperatura y alimento.

Los mejillones de SR presentaron una forma más alargada de su concha, menos compacta y acopada que los especímenes de LP. Debido a su ubicación fuera de la dársena o escollera, la población de SR se encuentra expuesta al oleaje directo, lo que explica la presencia de organismos hidrodinámicamente más alargados para enfrentar el constante movimiento del agua. Similares conclusiones fueron encontradas por Wilk & Bieler (2009), quienes reportaron diferencias morfológicas en la concha del ostión del árbol plano, *Isognomon alatus* (Gmelin, 1791), expuesto a diferentes condiciones de oleaje, a las observaciones de Morán *et al.* (2018) para la almeja

*Ameghinomya antiqua* (PP King, 1832) en el norte de Patagonia (Argentina) y de Babarro *et al.* (2020) al cultivar el mejillón *Mytilus galloprovincialis* (Lamarck, 1819) en España.

Además de los cambios y efectos continuos ambientales, la actividad antropogénica que se realiza en la costa suroeste del Golfo de California ejerce efectos en las características generales de las poblaciones de moluscos. A lo largo de la costa de Baja California Sur (BCS), las fuentes de metales y de otros contaminantes de carácter emergente que impactan a los ecosistemas acuáticos marinos dentro del Golfo de California son diversas (Páez-Osuna *et al.* 2017). En la Bahía de La Paz, reconocida como un sitio de bajo impacto por contaminación de metales (Rodríguez-Castañeda *et al.* 2006, Cadena-Cárdenas *et al.* 2009), se desarrollan actividades de extracción en yacimientos fosfáticos (no metálicos), pesca y actividades turísticas; esta última con nodos de expansión (nacional-internacional) en la región. Cabe destacar que cientos de miles de personas dependen de las actividades turísticas. Por otro lado, en la región minera de Santa Rosalía, al norte de BCS, elementos potencialmente tóxicos derivan de diversas actividades: 1) minería metálica de Cu, Co, Zn, Mn (Romero-Gil 1991) y procesos asociados (refinación de materiales y manejo de sustancias peligrosas), 2) urbanización y sus residuos, 3) transporte terrestre-marítimo, y 4) pesquería-turismo, por lo que es considerado como un “hot-spot” debido principalmente a los altos niveles de metales depositados en el sedimento costero (Shumilin *et al.* 2013). De manera específica, la presencia de estos elementos en SR se ha reflejado en efectos toxicológicos en la fisiología reproductiva de algunos bivalvos (Yee-Duarte *et al.* 2017, 2020), cambios fisiológicos en el cefalópodo *Octopus hubbsorum* (Berry, 1953) (Roldán-Wong *et al.* 2018) y en algunos bivalvos como *Mytilus edulis* (Linnaeus, 1798) (Cadena-Cárdenas *et al.* 2009) y *M. capax* (Muñoz-Barbosa & Huerta-Díaz 2013). Solamente para la almeja *Megapitaria squalida* se han reportado alteraciones morfológicas (Yee-Duarte *et al.* 2017, 2018). Por lo anterior, el nivel del impacto antropogénico sobre las comunidades acuáticas en cada localidad es variable y pudiera haber ejercido algún efecto en la forma de la concha y las relaciones morfométricas obtenidas de *M. capax*, lo cual incentiva la realización de futuros estudios que relacionen ambos aspectos.

La población de mejillones de SR mostró especímenes más grandes. En este estudio, el promedio total de ALC del mejillón fue mayor de 81,44 mm, lo que sugiere que ambas poblaciones estuvieron dominadas por adultos. Las ecuaciones de regresión por estación anual para las dimensiones de la concha en ambos sitios muestran un patrón consistente en el tipo de alometría positiva para ALC/LO y ALC/ANC, y negativa para la interacción LO/ANC, lo que significa que el crecimiento relativo no fue linealmente proporcional.

Esto es consistente con el análisis de los datos generales que se explican por las condiciones del ecosistema que habitan (Gaspar *et al.* 2001). Lo anterior coincide con la investigación de Akester & Martell (2000), quienes registraron diferencias en la morfología de la concha y el grosor del ligamento de dos poblaciones de *Mytilus trossulus* (Gould, 1850), una localizada en una zona protegida y la otra expuesta al oleaje. También, junto con el tipo de sedimento, Caill-Milly *et al.* (2014) concluyeron que el oleaje explicaría parcialmente las variaciones en la forma de la concha de cuatro poblaciones de la almeja manila *Venerupis philippinarum* (Adams & Reeve, 1850) en la costa Atlántica francesa; los autores destacaron el índice de elongación (ALC/LC) como uno de los indicadores más confiables para determinar diferencias en la forma de su concha. Esto último, coincide con los resultados obtenidos, ya que la mayor elongación de la concha en la población de SR sugiere una adaptación hidrodinámica al efecto de corrientes y oleaje. Al mismo tiempo, se produciría un mayor gasto de energía en la construcción de la concha (Wittmann & Pörtner 2013), lo que provoca que el crecimiento entre las dimensiones de la misma no sea proporcional.

La forma más oblonga o acopada de la concha, dictada por la convexidad, para la población de mejillones en LP, sugiere un mayor volumen intravalvar (Uba 2021), con mayor capacidad de tejido blando, es decir, que se encuentra en crecimiento somático gran parte del año. A pesar de que este sitio de muestreo no está expuesto a fuerte oleaje, lo que favorecería una alometría positiva (Gaspar *et al.* 2001), otros factores como la poca profundidad a la que se localiza el banco aumentan su vulnerabilidad para ser extraídos con fines de consumo, como concluyeron Yee-Duarte *et al.* (2017) para la almeja chocolate *M. squalida*: Los autores reportaron tallas menores en LP comparadas con otros lugares, atribuible a fácil acceso para su pesca comercial. Lo anterior, explicaría en parte, la menor talla de *M. capax* en LP comparada con los especímenes de SR.

Por estación anual y población total, el mayor coeficiente de determinación se presentó para ALC/ANC en ambos lugares. Este resultado no concuerda con los hallazgos de Uba (2021), quien documentó LC/ANC como la mejor interacción que describe el crecimiento de los mejillones *Modiolus philippinarum* (Hanley, 1843) y *M. moduloides* (Röding, 1798) en Filipinas. También, para poblaciones silvestres del berberecho *Larkinia grandis* (Broderip & GB Sowerby I, 1829) (Sotelo-Gonzalez *et al.* 2020) y de la almeja sifón *Panopea globosa* (Dall, 1898) (Góngora-Gómez *et al.* 2018b) que viven enterradas en esteros, y para el ostión de placer *Crassostrea corteziensis* (Hertlein, 1951) cultivado en suspensión (Góngora-Gómez *et al.* 2018a), la relación morfométrica LC/ANC determina mejor su crecimiento. Esto puede explicarse por diversos factores intrínsecos (*e.g.*, genética, etapa de crecimiento de cada especie) y extrínsecos (*e.g.*, condiciones ambientales, actividades industriales en cada localidad, forma de la concha, hábitat).

Estos resultados analizan los indicadores biométricos e interacciones morfométricas de las dimensiones de la concha en el mejillón *M. capax* en función de su hábitat, en dos poblaciones de la costa este de Baja California Sur. Se destacan las siguientes conclusiones: 1) Los parámetros ambientales difieren entre los sitios de muestreo, ejerciendo un posible efecto en la forma de la concha y talla poblacional de este bivalvo, 2) los especímenes de SR mostraron una concha más elongada combinada con menor compactación y convexidad, 3) mientras que, los de LP fueron más acopados, 4) en promedio y por estación anual, los organismos de SR fueron más grandes y pesados, 5) la talla promedio de los especímenes en ambos lugares indica que las poblaciones están dominadas por adultos, la interacción de las dimensiones de la concha fue lineal, 6) la relación ALC/ANC describe mejor el crecimiento relativo de este mejillón, y 7) las relaciones morfométricas por estación anual muestran diferentes patrones de alometría para los mejillones de cada lugar, siendo positiva para ALC/LC y ALC/ANC.

Este estudio proporciona nuevos y basales conocimientos para futuras investigaciones que asocien el entorno ambiental (parámetros físicos, químicos, biológicos y antropogénicos) con las variaciones en la forma de la concha y el crecimiento relativo del mejillón *M. capax* de estas dos poblaciones con otras que se encuentran en el suroeste del Golfo de California.

Para las dos poblaciones estudiadas, las variaciones en los resultados podrían ser atribuidas a la plasticidad fenotípica de la especie combinada con una posible respuesta a estresores ambientales y/o antropogénicos.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Instituto Politécnico Nacional (IPN), a través del proyecto Multidisciplinario 2023, módulos 3 y 4 (SIP-20190071 y SIP-20200526), por el apoyo económico y logístico para la realización de esta investigación.

## LITERATURA CITADA

- Akester RJ & AL Martell. 2000. Shell shape, dysodont tooth morphology, and hinge-ligament thickness in the bay mussel *Mytilus trossulus* correlate with wave exposure. *Canadian Journal of Zoology* 78(2): 240-253. <<https://doi.org/10.1139/cjz-78-2-240>>
- Arce-Peinado CA, M Arellano-Martínez & BP Ceballos-Vázquez. 2018. Ciclo reproductivo de la almeja roñosa *Chione undatella* en las costas de la región minera de Santa Rosalía, Baja California Sur, México. *Hidrobiológica* 28(3): 325-334.
- Babarro JMF, R Filgueira, XA Padín & MA Longa-Portabales. 2020. A novel index of the performance of *Mytilus galloprovincialis* to improve commercial exploitation in aquaculture. *Frontiers of Marine Sciences* 7: 719. <<https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00719>>

- Bergström P & M Lindergarth. 2016.** Environmental influence on mussel (*Mytilus edulis*) growth – A quantile regression approach. *Estuarine, Coastal & Shelf Science* 171: 123-132. <<https://doi.org/10.1016/j.ecss.2016.01.040>>
- Cadena-Cárdenas L, L Méndez-Rodríguez, T Zenteno-Savín, J García-Hernández & B Acosta-Vargas. 2009.** Heavy metal levels in marine mollusks from areas with, or without, mining activities along the Gulf of California, Mexico. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* 57: 96-102. <<https://doi.org/10.1007/s00244-008-9236-0>>
- Caill-Milly N, N Bru, M Barranger, L Gallon & F Damico. 2014.** Morphological trends of four Manila clam populations (*Venerupis philippinarum*) on the French Atlantic coast: identified spatial patterns and their relationship to environmental variability. *Journal of Shellfish Research* 33(2): 355-372. <<https://doi.org/10.2983/035.033.0205>>
- Clark MS, LS Peck, J Arivalagan, T Backeljau, S Berland, JCR Cardoso, C Caurce, G Chapelle, M De Noia, S Dupont, K Gharbi, JI Hoffman, KS Last, A Marie, F Melzner, K Michalek, J Morris, DM Power, K Ramesh, T Sanders, K Sillanpää, VA Sleight, PJ Stewart-Sinclair, K Sundell, L Telesca, DLJ Vendrami, A Ventura, TA Wilding, T Yarra & EM Harper. 2020.** Deciphering mollusc shell production: the roles of genetic mechanisms through to ecology, aquaculture and biomimetics. *Biological Reviews* 95: 1812-1837. <<https://doi.org/10.1111/brv.12640>>
- Coan EV & P Valentich-Scott. 2012.** Bivalve seashells of tropical west America: marine bivalve mollusks from Baja California to northern Peru (I), 1223 pp. Santa Barbara Museum of Natural History, Santa Barbara.
- Coen MA & GM Cruz-Bello. 2019.** Living with risk: Climate change and vulnerability. Community perceptions in peri-urban areas of La Paz City, Mexico. *Sociedad y Ambiente* 19: 109-136. <<https://doi.org/10.31840/sya.v0i19.1936>>
- Dar MA, AA Belal & AG Madkour. 2018.** The differential abilities of some mollusks to accumulate heavy metals within their shells in the Timsah and the Great Bitter lakes, Suez Canal, Egypt. *Egyptian Journal of Aquatic Research* 44: 291-298. <<https://doi.org/10.1016/j.ejar.2018.11.008>>
- Farrington JW, BW Tripp, K Tanabe, A Subramanian, JL Sericano, TL Wade & AH Knap. 2016.** Edward D. Goldberg's proposal of "the Mussel Watch": Reflections after 40 years. *Marine Pollution Bulletin* 110(1): 501-510. <<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.05.074>>
- García-Corona JL, C Rodríguez-Jaramillo, PE Saucedo, JA López-Carvalho, GF Arcos-Ortega & JM Mazón-Suástegui. 2018.** Internal energy management associated with seasonal gonad development and oocyte quality in the horse mussel *Modiolus capax* (Bivalvia: Mytilidae). *Journal of Shellfish Research* 37(3): 475-483. <<https://doi.org/10.2983/035.037.0302>>
- García-Domínguez FA, L Carvalho-Saucedo & N Vélez-Arellano. 2018.** Reproductive cycle of two *Modiolus capax* (Bivalvia: Mytilidae) beds at different depths at Ensenada de la Paz, Gulf of California, Mexico. *Hidrobiológica* 28(3): 313-323.
- Garza-Aguirre MC & LF Bückle-Ramírez. 1989.** Ciclo reproductivo del mejillón *Modiolus capax* (Conrad, 1873) (Bivalvia, Mytilidae, Amisomyaria) en la Bahía de los Ángeles, Baja California, México. *Anales del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología* 16: 157-170.
- Gaspar MB, MN Santos & P Vasconcelos. 2001.** Weight-length relationships of 25 bivalve species (Mollusca: Bivalvia) from the Algarve coast (southern Portugal). *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom* 81: 805-807. <<https://doi.org/10.1017/S0025315401004623>>
- Gaspar MB, MN Santos, P Vasconcelos & CC Monteiro. 2002.** Shell morphometric relationships of the most common bivalve species (Mollusca: Bivalvia) of the Algarve coast (southern Portugal). *Hidrobiológica* 477: 73-80.
- Gizzi F, MG Caccia, GA Simoncini, A Mancuso, M Reggi, S Fermiani, L Brizi, P Fantazzini, M Stagoni, G Falini, C Piccinetti & S Goffredo. 2016.** Shell properties of commercial clam *Chamelea gallina* are influenced by temperature and solar radiation along a wide latitudinal gradient. *Scientific Reports* 6: 36420. <<https://doi.org/10.1038/srep36420>>
- Goldberg E. 1975.** The mussel watch: A first step in global marine monitoring. *Marine Pollution Bulletin* 6: 111-114. <[https://doi.org/10.1016/0025-326X\(75\)90271-4](https://doi.org/10.1016/0025-326X(75)90271-4)>
- Góngora-Gómez AM, AL Leal-Sepúlveda, M García-Ulloa, EA Aragón-Noriega & W Valenzuela-Quiñonez. 2018a.** Morphometric relationships and growth models for the oyster *Crassostrea corteziensis* cultivated at the southeastern coast of the Gulf of California, Mexico. *Latin American Journal of Aquatic Research* 46(4): 735-743. <<https://doi.org/10.3856/vol46-issue4-fulltext-11>>
- Góngora-Gómez AM, MI Sotelo-Gonzalez, A Santamaría-Miranda & M García-Ulloa. 2018b.** Morphometric relationships of the siphon clam *Panopea globosa* (Bivalvia: Hiattellidae) in the southeasternmost of the Gulf of California, Mexico. *Revista de Biología Marina y Oceanografía* 53(3): 363-366. <<https://doi.org/10.22370/rbmo.2018.53.3.1366>>
- Holopainen IJ & JG Kuiper. 1982.** Notes on the morphometry and anatomy of some *Pisidium* and *Sphaerium* species (Bivalvia, Sphaeriidae). *Annales Zoologici Fennici* 19(2): 93-107.
- Karakulak FS, H Erk & B Bilgin. 2006.** Length-weight relationships for 47 coastal fish species from the northern Aegean Sea, Turkey. *Journal of Applied Ichthyology* 22: 274-278.
- López-Carvalho JA, PE Saucedo, C Rodríguez-Jaramillo, AI Campa-Córdova, JL García-Corona & JM Mazón-Suástegui. 2017.** Carbohydrate-rich diets meet energy demands of gametogenesis in hatchery-conditioned *Modiolus capax* mussels at increasing temperatures. *Journal of Shellfish Research* 36: 649-657. <<https://doi.org/10.2983/035.036.0314>>
- Morán AG, JJ Martínez, GM Boretto, S Gordillo & FJ Boidi. 2018.** Shell morphometric variation of *Ameghinomya antiqua* (Mollusca, Bivalvia) during the Late Quaternary reflects environmental changes in North Patagonia, Argentina. *Quaternary International* 490(10): 43-49.

- Muñoz-Barbosa A & MA Huerta-Díaz. 2013.** Trace metals enrichment in nearshore sediments and accumulation in mussels (*Modiolus capax*) along the Eastern coast of Baja California, Mexico: Environmental status in 1995. *Marine Pollution Bulletin* 77: 71-81. <<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.10.030>>
- Norkko J, CA Pilditch, CF Thrush & RFC Wells. 2005.** Effects of food availability and hypoxia on bivalves: the value of using multiple parameters to measure bivalve condition in environmental studies. *Marine Ecology Progress Series* 298: 205-218. <<https://doi.org/10.3354/meps298205>>
- Ochoa-Báez RI. 1985.** Antecedentes sobre el ciclo de reproducción de *Modiolus capax* (Conrad, 1837) (Bivalvia: Mytilidae), en la Bahía de La Paz, Baja California Sur, México. *Investigaciones Marinas* 2: 86-103.
- Olguín QO. 1976.** Catálogo de especies marinas de importancia comercial en Baja California Sur, 177 pp. S.I.C./Subsecretaría de Pesca, Instituto Nacional de Pesca, Ciudad de México.
- Páez-Osuna F, S Alvarez-Borrego, AC Ruiz-Fernández, J García-Hernández, ME Jara-Marini, ME Bergéz-Tiznado, A Piñón-Gimate, R Alonso, MF Soto-Jiménez, MG Frías-Espéricueta, J Ruelas-Inzunza, CR Green-Ruiz, CC Osuna-Martínez & JA Sanchez-Cabeza. 2017.** Environmental status of the Gulf of California: A pollution review. *Earth-Sciences Reviews* 166(1): 181-205. <<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.01.014>>
- R Core Team. 2018.** R: A language and environment for statistical computing: R Foundation for Statistical Computing, Vienna. <<https://www.R-project.org>>
- Rodríguez-Castañeda A, I Sánchez-Rodríguez, E Shumilin & D Sapozhnikov. 2006.** Element concentrations in some species of seaweeds from La Paz Bay and La Paz Lagoon, south-western Baja California, Mexico. *Journal of Applied Phycology* 18: 399-408. <<https://doi.org/10.1007/s10811-006-9040-z>>
- Rodríguez-Figueroa GM. 2004.** Geoquímica de los oligoelementos, elementos mayores y elementos de las tierras raras, en los sedimentos marinos del distrito minero de Santa Rosalía, B.C.S., México. Tesis de Maestría, Centro Interinstitucional de Ciencias Marinas, Instituto Politécnico Nacional, Baja California Sur, 137 pp.
- Roldán-Wong NT, AK Kidd, AJ Marmolejo-Rodríguez, E Shumilin, BP Ceballos-Vázquez & M Arellano-Martínez. 2018.** Bioaccumulation and biomagnification of potentially toxic elements in the octopus *Octopus hubbsorum* from the Gulf of California. *Marine Pollution Bulletin* 129: 458-468. <<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.10.014>>
- Romero-Gil JM. 1991.** El Boleo de Santa Rosalía B. C. S. Un pueblo que se negó a morir, 434 pp. Coedición de la Universidad de Sonora, Consejo Editorial del Gobierno del Estado de Baja California Sur, Centro de Estudios Mexicanos y Centroamericanos, Embajada de Francia en México, Hermosillo.
- Scalici M, L Traversetti, F Spani, V Malafoglia, M Colamartino, T Persichini, S Capello, G Mancini, G Guerriero & M Colasanti. 2017.** Shell fluctuating asymmetry in the sea-dwelling benthic bivalve *Mytilus galloprovincialis* (Lamarck, 1819) as morphological markers to detect environmental chemical contamination. *Ecotoxicology* 26: 396-404. <<https://doi.org/10.1007/s10646-017-1772-9>>
- Selin NI. 2007.** Shell form, growth and life span of *Astarte artica* and *A. borealis* (Mollusca: Bivalvia) from the subtidal zone of northeastern Sakhalin. *Russian Journal of Marine Biology* 33(4): 232-237.
- Shumilin E, A Jiménez-Illescas & S López-López. 2013.** Anthropogenic contamination of metals in sediments of the Santa Rosalía Harbor, Baja California Peninsula. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* 90: 333-337. <<https://doi.org/10.1007/s00128-012-0923-01>>
- Singh YT. 2017.** Relations between environmental factors and biological parameters of Asian wedge clam, *Donax scortum*, morphometric analysis, length-weight relationship and condition index: a first report in Asia. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom* 97(8): 1617-1633. <<https://doi.org/10.1017/S002531541600103X>>
- Sokal RR & FJ Rohlf. 1981.** Biometry, 859 pp. WH Freeman, New York.
- Sotelo-Gonzalez MI, CH Sepúlveda, R Sánchez-Cárdenas, LA Salcido-Guevara, M García-Ulloa, AM Góngora-Gómez & JA Hernández-Sepúlveda. 2020.** Shell dimension-weight relationships in the blood cockle *Larkinia grandis* (Bivalvia: Arcidae) on the southeastern coast of the Gulf of California. *Ciencias Marinas* 46(3): 185-192. <<https://doi.org/10.7773/cm.v46i3.3145>>
- Stewart BD, SR Jenkins, Ch Boig, C Sinfield, K Kennington, AR Brand, W Lart & R Kröger. 2021.** Metal pollution as a potential threat to shell strength and survival in marine bivalves. *Science of the Total Environment* 755: 143019. <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143019>>
- Telesca L, K Michalek, T Sanders, LS Peck, J Thyrring & EM Harper. 2018.** Blue mussel shell shape plasticity and natural environments: a quantitative approach. *Scientific Reports* 8: 2865. <<https://doi.org/10.1038/s41598-018-20122-9>>
- Telesca L, LS Peck, T Sanders, J Thyrring, MK Serj & EM Harper. 2019.** Biomineralization plasticity and environmental heterogeneity predict geographic resilience patterns of foundation species to future change. *Global Change Biology* 25: 4179-4193. <<https://doi.org/10.1111/gcb.14758>>
- Vasconcelos P, P Moura, F Pereira, AM Pereira & MB Gaspar. 2018.** Morphometric relationships and relative growth of 20 uncommon bivalve species from the Alagavare coast (southern Portugal). *Journal of Marine Biological Association of the United Kingdom* 98(3): 463-474. <<https://doi.org/10.1017/S002531541600165X>>

- Uba KIN. 2021.** Determining shell shape differences in the horse mussels *Modiolus philippinarum* (Hanley 1843) and *Modiolus moduloides* (Röding 1798) by morphometric analysis. *Philippine Journal of Science* 150(4): 743-752.
- Wilk J & R Bieler. 2009.** Ecophenotypic variation in the flat tree oyster, *Isognomon alatus* (Bivalvia: Isognomonidae), across a tidal microhabitat gradient. *Marine Biology Research* 5(2): 155-163. <<https://doi.org/10.1080/17451000802279644>>
- Wittmann AC & HO Pörtner. 2013.** Sensitivities of extant animal taxa to ocean acidification. *Nature Climate Change* 3(11): 995-1001.
- Yee-Duarte JA, BP Ceballos-Vázquez, E Shumilin, K Kidd & M Arellano-Martínez. 2017.** Evidence of health impairment of *Megapitaria squalida* (Bivalvia: Veneridae) near the “hot spot” of a mining port, Gulf of California. *Hidrobiológica* 27(3): 391-398.
- Yee-Duarte JA, BP Ceballos-Vázquez, M Arellano-Martínez, MA Camacho-Mondragón & E Uriá-Galicia. 2018.** Histopathological alterations in the gonad of *Megapitaria squalida* (Mollusca: Bivalvia) inhabiting a heavy metal polluted environment. *Journal of Aquatic Animal Health* 30: 144-154. <<https://doi.org/10.1002/aah.10015>>
- Yee-Duarte JA, IS Racotta, MA Camacho-Mondragón, NT Roldán-Wong, DP Carreño-León, E Shumilin, KA Kidd & M Arellano-Martínez. 2020.** Contrasting reproductive health of female clams *Megapitaria squalida* from two nearby metal-polluted sites in the Gulf of California: Potential effects of copper, lead, and cobalt. *Marine Pollution Bulletin* 160: 111583. <<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111583>>
- Zhao L, BR Schöne & R Mertz-Kraus. 2017.** Delineating the role of calcium in shell formation and elemental composition of *Corbicula fluminea* (Bivalvia). *Hydrobiologia* 790: 259-272. <<https://doi.org/10.1007/s10750-016-3037-7>>

---

Recibido el 24 de septiembre 2021

Aceptado el 2 de septiembre 2022