
RECLUTAMIENTO DEL ABULÓN AZUL (*Haliotis fulgens*) EN BAJA CALIFORNIA, MÉXICO, Y SU RELACIÓN CON LA TEMPERATURA DEL MAR

Sergio A. Guzmán del Prío, Pablo del Monte-Luna y Jorge Carrillo-Laguna

RESUMEN

La captura actual de abulón en Baja California (BC), México, representa menos del 7% de lo que fue en 1950. Esta reducción supone que las poblaciones se encuentran muy por debajo del tamaño que tenían en la primera mitad del siglo pasado y que, por consiguiente, pudieran estar dominadas por procesos densoindependientes. Para probar esta hipótesis, se ajustaron dos modelos de parentela-progenie (Ricker y Beverton-Holt) a series de tiempo (1997-2008) de juveniles y adultos de abulón azul (*Haliotis fulgens*) en BC. Así mismo, se aplicaron tres modelos no parametrizados (lineal, exponencial y polinomial) a datos locales de temperatura superficial del mar (TSM) versus reclutamiento. En ninguno de los modelos de stock-reclutamiento se encontró una relación significativa. La relación entre TSM y reclutamiento fue

mejor representada por un modelo parabólico ($R^2 = 0,5$; $p < 0,01$), sugiriendo la existencia de un óptimo de temperatura, con bajos valores de reclutamiento a 19 y 23°C, y altos valores alrededor de 21°C. La debilidad de la relación stock-reclutamiento y la dependencia de la población de cambios ambientales pueden ser manifestaciones de procesos densoindependientes que tienden a aumentar la variabilidad poblacional en recursos pesqueros con densidades bajas, como el abulón de BC. Es posible que los niveles de reclutamiento del abulón azul disminuyan en años venideros, pues se espera que continúe el periodo de enfriamiento en la Corriente de California que comenzó en 1997. Apremia seguir monitoreando el reclutamiento para incrementar la plataforma de conocimientos sobre la que se basa el manejo del recurso.

Introducción

Desde la década de 1950, la captura del abulón es una de las actividades más importantes para la economía de las cooperativas pesqueras que operan en el Pacífico Central de Baja California. No obstante las reducidas capturas que actualmente se obtienen (300-400ton/año, comparadas con el promedio de 3500ton/año durante las décadas de 1960 y 1970; Instituto Nacional de La Pesca, 2006) la pesquería continúa siendo rentable debido al alto precio que este molusco tiene en el mercado internacional (USD 60 por lata de producto).

En el año 2009, las cooperativas pesqueras de la región Pacífico Norte de México notaron una fuerte reducción en las poblaciones de abulón en algunas de sus zonas concesio-

nadas, por lo que acudieron a las autoridades pesqueras federales y a los centros de investigación científica de la región, buscando una explicación al problema junto con recomendaciones de manejo que les permitiera mantener esta pesquería dentro de niveles de sustentabilidad.

Como una línea de investigación, los autores del presente trabajo abordaron el tema desde la perspectiva de la relación stock-reclutamiento, tanto en el contexto teórico de la densoindependencia /dependencia como en el contexto práctico del manejo pesquero. La idea era determinar si existe o no una relación stock-reclutamiento útil para el manejo y si los cambios observados en la abundancia de la población están siendo gobernados por fenómenos intrapoblacionales o son factores

externos del ambiente los responsables de dichos cambios.

Determinar qué factores están involucrados en la reducción de los bancos de abulón azul en BC, depende de comprender conceptos básicos de dinámica de poblaciones que a continuación se exponen. Cuando una población natural coloniza un hábitat favorable, inicialmente crece en biomasa y número de manera exponencial, ya que existen alimento y espacio suficientes. A este nivel, los factores del ambiente tienden a regular los cambios en el tamaño de la población tanto de reproductores como de reclutas, más que las relaciones intra o interespecíficas; es decir, domina la densoindependencia (Fase 1, Figura 1). Hacia el final de esta fase ocurre el máximo incremento poblacional por unidad de tiempo.

Sin embargo, dado que el aumento en biomasa de la población por crecimiento somático y reproducción da lugar con el tiempo a una disminución en la disponibilidad de recursos, la población reduce paulatinamente la tasa de crecimiento hasta que alcanza su máximo tamaño posible ó capacidad de carga -K (Fase 2, Figura 1). En este punto, la productividad o crecimiento neto anual de la población es cero y, en contraste con lo que sucede en la fase inicial de crecimiento, la densodependencia actúa como un factor adicional al efecto del ambiente (del Monte-Luna *et al.*, 2007).

La hipótesis de trabajo es que dado que la población de abulón azul en BC se encuentra en niveles bajos de abundancia, se espera observar ma-

PALABRAS CLAVE / Clima / El Niño / Manejo Pesquero / Stock-Reclutamiento / Temperatura Óptima /

Recibido: 14/11/2012. Aceptado: 19/09/2013.

Sergio A. Guzmán del Prío. Biólogo, Maestro y Doctor en Ciencias, Escuela Nacional de Ciencias Biológicas del Instituto Politécnico Nacional (ENCB-IPN), México. Profesor Investi-

gador, Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas del IPN (CICIMAR), México. Dirección: Avenida Instituto Politécnico Nacional s/n. Colonia Playa Palo de Santa Rita. CP. 23096,

AP 582. La Paz, BCS, México. e-mail: sguzman@ipn.mx
Pablo del Monte-Luna. Biólogo Marino, Universidad Autónoma de Baja California Sur, México. Maestro y Doctor en

Ciencias Marinas, Profesor Investigador, CICIMAR-IPN, México.
Jorge Carrillo-Laguna. Biólogo, Profesor Investigador, ENCB-IPN, México.

RECRUITMENT OF GREEN ABALONE (*Haliotis fulgens*) IN BAJA CALIFORNIA, MEXICO, AND ITS RELATION WITH SEA TEMPERATURE

Sergio A. Guzmán del Prío, Pablo del Monte-Luna and Jorge Carrillo-Laguna

SUMMARY

Current abalone landings in Baja California (BC), Mexico, represent 7% of those observed in 1950. Such catch reduction supposes that the populations are far below the stock size estimated for the first half of the 20th century; therefore, at present, abalone populations could be governed by density independent processes. In order to test this hypothesis, two stock-recruitment models (Ricker, and Beverton and Holt models) were fitted to juvenile and adult historical data (1997-2008) of green abalone (*Haliotis fulgens*). Likewise, three non parametrized models (linear, exponential and polynomial) were fitted to local sea surface temperature data (SST) versus observed recruitment. With either Ricker or Beverton and Holt models we found no significant relationship between adult stock size and recruits. Regarding the relationship

between SST and recruitment, the best model was a parabolic one ($R^2 = 0.5$, $p < 0.01$), indicating the existence of an optimum temperature around 21°C with lower recruitment values in 19 and 23°C. The weak stock-recruitment relationship and the population dependence of environmental factors might be the result of density-independence processes, which tend to increase the population variability of exploited resources at low population levels, as it is the case of the green abalone in BC. On the other hand, given that the California Current System entered into a multidecadal cold phase since 1997, the recruitment of green abalone will probably decrease in the forthcoming years. A continuous monitoring of recruitment for this population may prove key for future management.

RECRUTAMENTO DO ABALONE VERDE (*Haliotis fulgens*) NA BAIXA CALIFÓRNIA, MÉXICO, E SUA RELAÇÃO COM A TEMPERATURA DO MAR

Sergio A. Guzmán del Prío, Pablo del Monte-Luna e Jorge Carrillo-Laguna

RESUMO

A captura atual de abalone na Baixa Califórnia (BC), México, representa menos de 7% do que foi em 1950. Esta redução supõe que as populações se encontram muito por debaixo do tamanho que tinham na primeira metade do século passado e que, por conseguinte, puderam estar dominadas por processos denso independentes. Para provar esta hipótese, se ajustaram dois modelos de parentela-progenie (Ricker e Beverton-Holt) a series de tempo (1997-2008) de juvenis e adultos de abalone verde (*Haliotis fulgens*) em BC. Assim mesmo, se aplicaram três modelos não parametrizados (lineal, exponencial e polinomial) a dados locais de temperatura superficial do mar (TSM) e recrutamento. Em ambos os modelos se encontrou uma proporcionalidade estatisticamente não significativa entre adultos e juvenis. A relação entre TSM e

recrutamento foi melhor representada por um modelo parabólico ($R^2 = 0.5$; $p < 0.01$), sugerindo a existência de um ótimo de temperatura, com baixos valores de recrutamento a 19 e 23°C, e altos valores ao redor de 21°C. A debilidade da relação stock-recrutamento e a dependência da população de mudanças ambientais podem ser manifestações de processos denso-independentes que tendem a aumentar a variabilidade populacional em recursos pesqueiros com densidades baixas, como o abalone de BC. É possível que os níveis de recrutamento diminuam em anos vindouros, pois se espera que continue o período de esfriamento na Corrente de Califórnia que começou em 1997. Urge seguir acompanhando o recrutamento para incrementar a plataforma de conhecimentos sobre a qual se baseia o manejo do recurso.

nifestaciones de fenómenos densoindependientes; particularmente que la fracción adulta de la población no sea el principal determinante del reclutamiento, y que la variabilidad en la producción anual de juveniles sea mayormente explicada por cambios ambientales.

Sobre la base de lo anterior, los objetivos del presente trabajo fueron: 1) ajustar los modelos de parentela-progenie de Ricker (1963) y de Beverton y Holt (1957) a datos observados de abundancia de adultos y de reclutas del abulón azul (*H. fulgens*) en BC; y 2) analizar la relación entre la temperatura superficial del mar (TSM) a nivel local y la producción anual de reclutas de esta misma especie.

Materiales y Método

El presente estudio se basa en dos series de tiempo de abundancia relativa de abulón azul en la porción central de la costa occidental de Baja California. La primera es de juveniles (también llamados reclutas o progenie) de hasta un año de edad y abarca el periodo 1996-2008. La segunda serie corresponde a datos de adultos (también conocidos como reproductores o parentela) de tres años de edad en adelante y cubre de 1995 a 2009. Los análisis consistieron en ajustar a estas series dos modelos de parentela-progenie que asumen densodependencia, y en relacionar la abundancia anual de juveniles con la tem-

peratura superficial del mar a nivel local.

Área de estudio

La zona de captura de abulón denominada como Subzona III por la Sociedad Cooperativa Bahía Tortugas, sociedad que opera a nivel local, contiene 14 bancos (Figura 2). En el presente estudio se eligieron los bancos 4 y 14 como monitores de la abundancia de juveniles. En el caso de la abundancia de adultos se seleccionaron, además de estos dos bancos, los bancos contiguos 1, 2, 3, 12 y 13. De aquí en adelante, el conjunto de los bancos 1 al 4 serán denominados como Los Morros, y los bancos del 12 al 14 como Clam Bay.

Al interior de cada una de estas áreas, los bancos se encuentran a no más de 1km entre ellos y se asume que representan dos condiciones ambientales distintas que caracterizan la Subzona III. El área de Los Morros está expuesta a vientos del noroeste; el sustrato es rocoso con una abrupta pendiente de playa. Clam Bay es un área protegida de los vientos dominantes del noroeste, con un piso litoral rocoso somero y de pendiente suave (2-8m).

Muestreo de juveniles y adultos

Para el caso de los juveniles, se realizaron dos prospecciones al año mediante buceo autónomo a tres niveles de profundi-

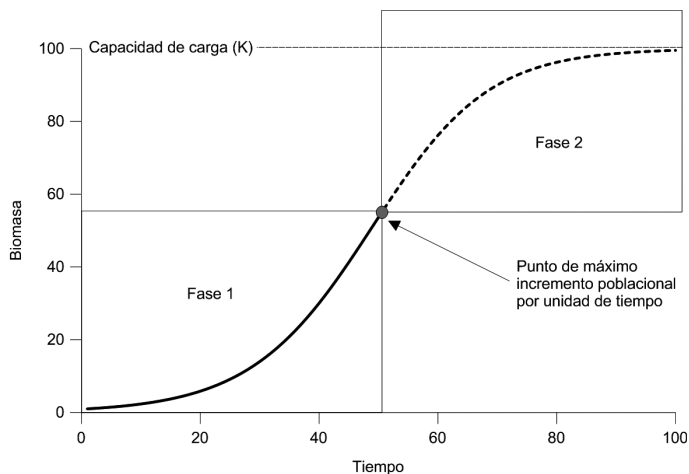


Figura 1. Curva logística de crecimiento poblacional. La fase 1 (línea continua) se caracteriza por un crecimiento exponencial de la biomasa y porque la población se rige mayormente por fenómenos densodependientes. En la fase 2 (línea gruesa intermitente) el crecimiento poblacional comienza a reducirse hasta llegar a cero cuando alcanza la capacidad de carga (K ; línea intermitente delgada), y se asume que la dinámica poblacional responde mayormente a factores densodependientes. El punto medio en la curva ($K/2$) se da la mayor tasa instantánea de crecimiento. Las unidades de biomasa y tiempo son relativas.

dad: 6, 9 y 12m en Los Morros y 2, 4 y 8m en Clam Bay. En cada sitio se muestrearon un mínimo de cuatro y un máximo de seis estaciones, dependiendo de las condiciones meteorológicas, procurando cubrir las tres cotas de profundidad. El muestreo consistió en la búsqueda de individuos de 5-90mm en rocas de 10 a 50cm de tamaño, las que representan el micro-hábitat idóneo de los juveniles de abulón (Carreón-Palau *et al.*, 2003). Las inmersiones se estandarizaron a 60min de buceo. Mediante esta técnica se obtuvo una serie anual (1996-2008) de abundancia relativa de juveniles en unidades de número promedio de abulones por hora de buceo.

La información de densidad de adultos de la Subzona III proviene de los archivos históricos de prospecciones que realiza anualmente el Instituto Nacional de la Pesca para evaluar las existencias de abulón en la costa occidental de Baja California. Sobre la base de estas prospecciones se establecen las cuotas de captura.

El muestreo de individuos fue de tipo sistemático en transectos perpendiculares a la costa, hasta la isobata de 20m, establecidos a intervalos de 500m cada uno. En cada transecto se

tomaron muestras de los abulones avistados por un buzo en un rectángulo de 10m² (5x2m) con 10 réplicas por transecto. Las inmersiones en cada réplica tuvieron una duración promedio de 5min. Los datos representan la abundancia de organismos >50mm de longitud de concha (en adelante denominados adultos o reproductores) expresada en número de individuos/10m². Más detalles sobre la técnica de muestreo se hallan en Instituto Nacional de la Pesca (2006).

Procesamiento y análisis de datos

Con el fin de estandarizar las unidades de abundancia de las series de tiempo de juveniles y de adultos, se convirtió el número de individuos adultos avistados por cada 100m² (10 réplicas de 10m² cada una) a número de individuos por hora de buceo, considerando que cada inmersión y búsqueda de adultos duraba en promedio 5min. Por lo tanto, 10 inmersiones equivalen de 50min a 1h de muestreo, que es la unidad de esfuerzo empleada en el muestreo de juveniles.

De cada banco se eligieron los abulones de 110mm en adelante (equivalente a 3 años, que es la edad de primera madurez

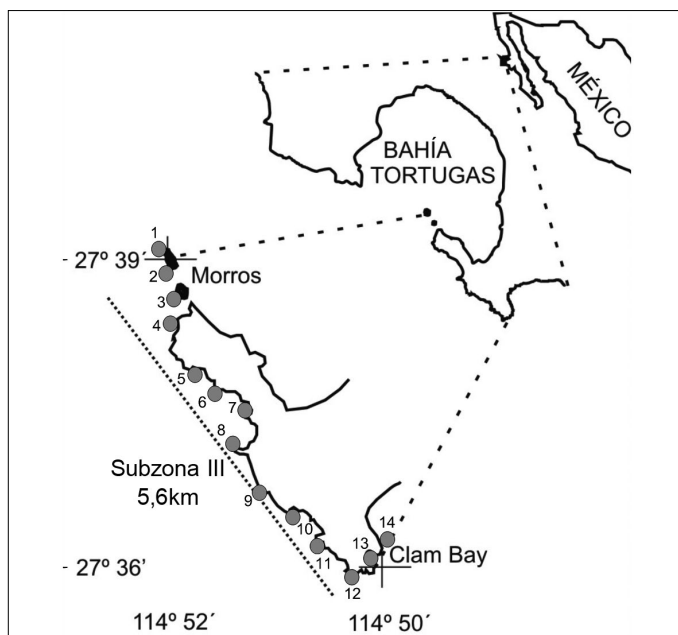


Figura 2. Área de estudio. Se muestra la posición aproximada de 14 bancos representativos de abulón azul (*Haliootis fulgens*) en la región.

sexual; Belmar-Pérez y Guzmán del Prío (1992) que sumados a los individuos de longitudes y edades mayores constituyeron, en conjunto, la totalidad del stock desovante. En el caso de los juveniles, solo se incluyeron los individuos de hasta 35mm, talla equivalente a un año de edad (Guzmán del Prío *et al.*, 2004). La razón de considerar únicamente individuos de esta edad fue que en el análisis de parentela-progenie, se asumió que los reclutas de un año de edad fueron producto del desove de los adultos del año previo.

Así mismo, se correlacionó la variabilidad ambiental, medida a través de la TSM local, con la densidad promedio de juveniles de abulón de Los Morros y Clam Bay. Lo anterior se hizo con el fin de observar el efecto de la temperatura promedio del año t en la integral de la supervivencia de los reclutas durante ese mismo año.

Los registros mensuales de TSM a nivel local se obtuvieron de la base de datos de temperatura superficial del mar reconstruida (ERSST por sus siglas en inglés; <http://lwf.ncdc.noaa.gov/ersst>) compilada por el Servicio de Información de la Agencia Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica (NOAA, por sus siglas en in-

glés). Los datos de TSM abarcan el periodo 1996-2007 y provienen de un cuadrante geográfico de $2 \times 2^\circ$ cuyo centro se localiza en los $28^\circ N$, $116^\circ W$. Se promediaron los datos de temperatura para el trimestre septiembre-noviembre (época reproductiva de la especie en la región) para cada año del periodo de estudio.

En lo que respecta al análisis, se utilizaron dos modelos de parentela-progenie. El modelo de Ricker (1963) es de la forma $R_t = aS_t \exp(-bS_t)$ y el de Beverton y Holt (1957) se define como $R_t = aS_t / (b + S_t)$, donde R_t es el reclutamiento estimado al tiempo t , S_t es la abundancia de la población adulta al tiempo t , a y b son los parámetros de ajuste del modelo.

El procedimiento de ajuste de cada uno de estos modelos a los datos observados se hizo maximizando la log-verosimilitud de la forma $-n/2[2\pi + 1 - \ln(n) + \ln(RSS)]$, donde n es el número de datos,

$$RSS = \sum_{t=1}^n \frac{(R_t - R_{est,t})^2}{n}$$

y $R_{est,t}$ es el reclutamiento calculado al tiempo t mediante el modelo.

La relación estadística entre la TSM promedio y la abundan-

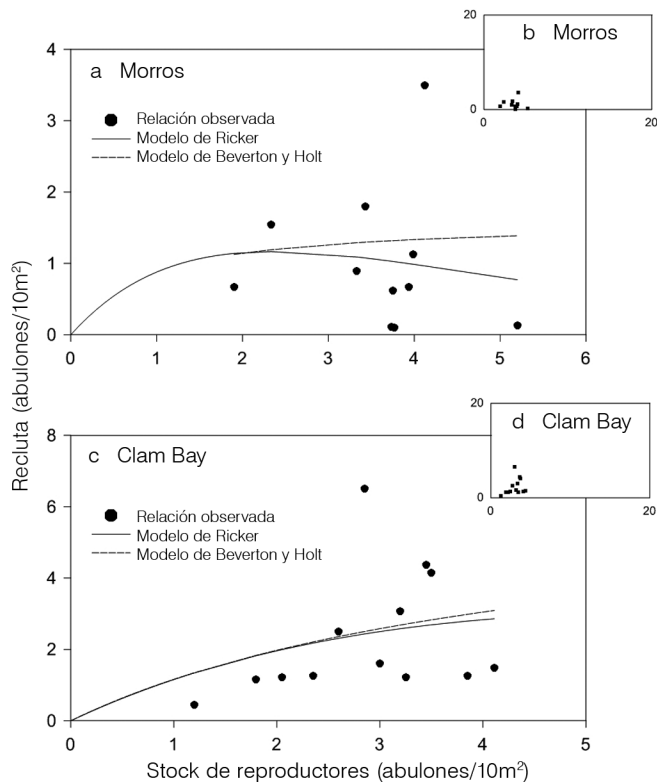


Figura 3. a y c: relación observada de stock-reclutamiento del abulón azul (*Haliotis fulgens*; círculos negros) en dos bancos abuloneros de Baja California, México, y el ajuste de las curvas teóricas de los modelos de Ricker (línea interrumpida) y de Beverton y Holt (línea continua). b y d: igual que A y C, pero con la escala magnificada en ambos ejes para que represente los tamaños de stock que posiblemente existieron hace casi 40 años (Guzmán del Prío *et al.*, 1976).

cia promedio de reclutas se estableció ajustando tres modelos no parametrizados (lineal, exponencial, y polinomial) de manera sucesiva hasta encontrar el que produjera el coeficiente de determinación más alto a un nivel de significancia de 0,05.

Resultados

En la Figura 3 se muestra el ajuste de los modelos de Ricker (1963) y Beverton y Holt (1957) a los datos observados de adultos y reclutas de abulón azul. Si bien los modelos se lograron ajustar, existe una amplia dispersión de los datos con respecto a ambas curvas teóricas, lo que indica una relación débil entre el tamaño del stock adulto y la producción de reclutas. En el caso del modelo de Ricker, el coeficiente de correlación entre los datos observados y estimados de reclutamiento para Los Morros fue de 0,16 y para Clam Bay de 0,39. En el caso del mo-

delo de Beverton-Holt, la correlación fue de -0,03 para Los Morros y de 0,37 para Clam Bay. En la Tabla I se muestran los modelos específicos de stock-reclutamiento para los datos provenientes de estas dos áreas y algunas cantidades de manejo derivadas de dichos modelos.

En la Figura 4 se observa que los datos de reclutamiento

respecto de la TSM, forman tres grupos: el grupo 1 (G1), conformado por los años 2003, 2004, 2006 y 2008, fue el que presentó los niveles más altos de reclutamiento, alrededor de los 21°C. El segundo grupo (G2), más numeroso y con niveles bajos y moderados de reclutamiento, se constituyó de los años 1996, 1998-2002, 2005 y 2007. Este grupo ocurre entre 19 y 20°C. El tercer grupo (G3), representado sólo por el año 1997, presentó las condiciones más bajas de reclutamiento y coincidió con una temperatura de 23°C.

El modelo que mejor se ajustó a la relación entre la TSM y la producción promedio de reclutas en ambas zonas, fue de tipo polinomial de segundo grado ($R^2 = 0,5$; Figura 4). Cabe mencionar que el coeficiente de determinación del mismo tipo de modelo aplicado sólo a los datos de temperatura-reclutamiento de Clam Bay fue de 0,66 (no se muestra en figura).

Discusión

Stock-Reclutamiento

Existe controversia en cuanto a si hay o no una relación entre la producción de reclutas y el tamaño del stock desovante en el grupo de los invertebrados marinos, y en particular de los haliótidos. Por un lado Prince *et al.* (1988) mediante un experimento de reducción sucesiva en bancos de *H. rubra* con distinta densidad, encontraron que la abundancia de adultos determina de forma proporcional la abundancia de reclutas. McSha-

ne (1995) menciona que la variación anual en la producción de reclutas de abulón se debe a modificaciones en el tamaño de la población local desovante. Así mismo, Shepherd y Partington (1995) mostraron que la relación entre el tamaño de la población de reclutas y adultos de *H. laevisgata* sigue una curva densodependiente tipo Ricker; con un ramo descendente hacia valores altos de la fracción reproductora.

En contraste, el mismo Shepherd (1990) años atrás había encontrado que el tamaño del stock desovante no explica la variabilidad observada en el reclutamiento de *H. laevisgata*. Shepherd *et al.* (1992), experimentando con distintas densidades de bancos de esa misma especie mostraron que la fuerza del reclutamiento es independiente de la densidad de adultos.

Los presentes resultados apuntan a que la relación entre el tamaño de la población adulta y el número de reclutas de *H. fulgens* en BC es débil y estadísticamente no significativa en ambos modelos (Ricker y Beverton y Holt) y sendas zonas (Los Morros y Clam Bay). La dispersión de los datos (Figura 3) muestra que los diferentes niveles de supervivencia interanual de individuos de hasta un año de edad no están directamente relacionados con el tamaño de la población desovante que le dio origen. Tegner *et al.*, (1992) tampoco encontraron relación entre el tamaño de la fracción adulta y el reclutamiento en poblaciones locales de esta misma especie en la región de California.

TABLA I
MODELOS STOCK-RECLUTAMIENTO (S-R) ESPECÍFICOS PARA LOS DATOS DE ADULTOS Y JUVENILES DE ABULÓN AZUL (*Haliotis fulgens*) PROVENIENTES DE MORROS Y CLAM BAY, BAJA CALIFORNIA *

	Morros	Clam Bay
Modelo de Ricker (MR)	$R = 1,2S \cdot \exp(-0,4 \cdot S)$	$R = 1,4S \cdot \exp(-0,2 \cdot S)$
Modelo de Beverton-Holt (MBH)	$R = 1,6S / (0,8 + S)$	$R = 6,6S / (5,0 + S)$
S máximo	MR = 2,6	MR = 6,1
R máximo	MR = 1,1	MR = 3,1
	MBH = 1,6	MBH = 6,7
Tamaño del stock adulto correspondiente al máximo rendimiento sostenible	MR = 0,3	MR = 0,4
	MBH = 0,3	MBH = 0,7

* Se muestran algunas cantidades de manejo derivadas de los modelos (ver formulario en Hilborn y Walters, 1992). Los tamaños de R y S están dados en individuos/10m². El valor de S en R máximo para el modelo de Beverton-Holt en cualquier caso tiende a infinito.

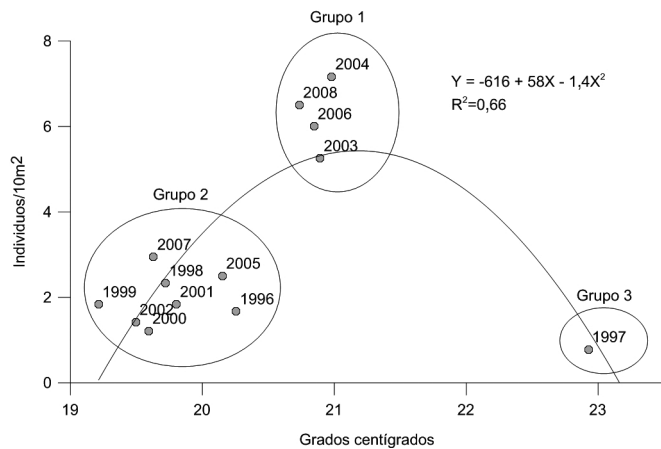


Figura 4. Relación entre la temperatura superficial del mar en el área de Los Morros y Clam Bay, Baja California vs la producción anual promedio de reclutas de abulón azul (*Haliotis fulgens*) en esas mismas localidades (periodo 1997-2008). Se resalta la formación de tres niveles de reclutamiento claramente discernibles (grupos 1, 2 y 3). Se muestra el ajuste de un modelo polinomial de segundo grado, su respectiva ecuación y coeficiente de determinación.

La gran dispersión de los datos en esta relación es comúnmente observada en recursos pesqueros con niveles bajos de abundancia (Myers *et al.*, 1994), cuya dinámica está dominada por procesos densoindependientes (Cushing, 1971, 1988). Este podría ser el caso del abulón de BC, puesto que el tamaño de la fracción adulta y de reclutas en el periodo de 1997 a 2008 representa aproximadamente la quinta parte de la densidad poblacional estimada de *H. fulgens* hace 40 años (Guzmán del Prío *et al.*, 1976; b y d en Figura 3). Consideramos que otras herramientas estadísticas más complejas (análisis bayesiano o remuestreo con *bootstrap*) no producirían un mejor ajuste que el que encontramos mediante técnicas relativamente sencillas como el estimador de máxima verosimilitud.

Relación entre el reclutamiento y la TSM

Los máximos niveles de abundancia en el reclutamiento (G1), correspondieron a valores intermedios de TSM (entre 19 y 23°C) y, por otra parte, algunos de los años con menor abundancia de reclutas (G2 y G3) coincidieron con eventos La Niña y El Niño, respectivamente. En la Tabla II se muestra la rela-

ción entre los grupos identificados en la relación reclutamiento-temperatura y las condiciones oceanográficas dominantes en la Corriente de California para cada año del periodo 1997-2008.

Este hallazgo hace suponer que el nivel de reclutamiento de *H. fulgens* en Bahía Tortugas está influenciado por la variación interanual de la TSM local, particularmente en forma de un óptimo de temperatura para la producción de juveniles. Frank y Carscadden (1989) mencionan que, efectivamente, los cambios en la producción de juveniles puede ser causada

por la variación interanual en las condiciones del medio, independientemente del número de desovadores.

A nivel especie, McShane y Smith (1991) mostraron que los patrones interanuales en el reclutamiento de *H. rubra*, variaron en función de las condiciones oceanográficas. De igual forma, la variación observada en el reclutamiento de otras especies de abulón, como *H. laevigata*, ha sido atribuida a cambios ambientales y en particular a fluctuaciones en la TSM (Shepherd, 1990; Shepherd y Brown, 1993).

Hasta el momento no se conoce una explicación causal del fenómeno; sin embargo, en condiciones de laboratorio se ha observado algo similar a los hallazgos del presente estudio. La supervivencia de *H. fulgens* en estadios tempranos de desarrollo (de larva trocófora hasta larva con concha circular) presenta un rango óptimo en el dominio de temperatura. La menor supervivencia promedio ocurre en temperaturas <19°C y >24°C, con valores máximos entre 21 y 23°C (Leighton, 1974).

La congruencia entre los resultados de campo y laboratorio destaca la necesidad de llevar a cabo más estudios a nivel regional en el ámbito de la ecofisiología de haliótidos, con el fin de proponer mecanismos que expliquen la ventana ambiental

óptima identificada en el presente trabajo.

Implicaciones para el manejo

Los modelos de stock-reclutamiento son una derivación de la curva logística de crecimiento poblacional (Hall, 1988) y, consecuentemente, también asumen la existencia de un tamaño poblacional máximo constante, o capacidad de carga K (Hall, 1988). Otra de sus propiedades es que la abundancia de la fracción adulta (S) puede tener un valor predictivo de la población de reclutas y de la población total (Ricker 1963). De hecho, estos modelos son comúnmente utilizados para el manejo de pesquerías como la de salmón en la Columbia Británica (Hilborn y Walters, 1992) y la de cangrejo rey en Alaska (Bechtol y Kruse, 2009).

La realidad empero no es tan simple, pues en el caso del abulón en BC, la K de la población pudo haberse reducido independientemente de la intensidad de pesca (Guzmán del Prío, 1994), como consecuencia de un cambio drástico en el ambiente ocurrido a mediados de la década de 1970 (Lluch Belda *et al.*, 1989). Por otra parte, incluso en aquellos casos en los que el comportamiento de los datos se apega razonablemente bien a los supuestos del modelo parentela-progenie, su capacidad predictiva ha demostrado ser limitada (Hall, 1988; Valiela, 2009), ya que la relación representa un fenómeno fundamentalmente estocástico (Hilborn y Walters, 1992).

Para el caso de la pesquería de abulón de BC, los modelos de stock-reclutamiento (Ricker y Beverton-Holt) mostraron varias limitaciones. Ambos estiman que una población adulta de entre 0,3 y 0,7 individuos/10m² produciría el máximo rendimiento sostenible de la pesquería (Tabla II). Sin embargo, estas cifras son poco realistas, al menos por dos razones: 1) están por debajo de densidades registradas del stock adulto en la zona (2-5 abulones/10m²; Figura 3), lo que actualmente permite cap-

TABLA II
GRUPOS DE AÑOS CARACTERIZADOS POR PRESENTAR VALORES ALTOS (G1) Y BAJOS (G2, G3) DE RECLUTAMIENTO PROMEDIO DE ABULÓN AZUL (*Haliotis fulgens*) EN LOS MORROS Y CLAM BAY, BC, Y LA CONDICIÓN AMBIENTAL DOMINANTE DE LA CORRIENTE DE CALIFORNIA EN CADA UNO DE ELLOS

Grupo 1	Condición dominante	Grupo 2	Condición dominante	Grupo 3	Condición dominante
2003	Neutral-El Niño débil	1996	Neutral	1997	El Niño
2004	Neutral	1998	El Niño		
2006	Neutral-La Niña débil	1999	Transición		
2008	La Niña	2000	La Niña		
		2001	La Niña		
		2002	La Niña		
		2005	La Niña		
		2007	Neutral		

La condición ambiental dominante, desde 1997 a 2008, se obtuvo de la sección "State of the California Current" que se publica anualmente en la revista Calcofi Reports (<http://calcofi.org/publications/ccreports.html>). Neutral significa que los valores de temperatura superficial del mar se encontraban cerca del promedio histórico; Transición significa un estado climático intermedio entre un evento El Niño y uno La Niña.

turar hasta 300ton (Carta Nacional Pesquera, 2010); y 2) una densidad de 0,3-0,7 individuos/10m² supone una separación entre individuos mayor a 2m, que es la distancia mínima requerida para asegurar la fertilización (Babcock y Keesing, 1999) y, en consecuencia, habría un fallo continuo e irreversible del reclutamiento. Esta situación aun no se ha observado en la historia de la pesquería.

Es posible que la ventana ambiental que identificamos pudiera ser más útil como factor de pronóstico de variaciones en el reclutamiento. Se sabe que a partir de 1997-1998, la Corriente de California entró en un periodo de enfriamiento (Bjorkstedt *et al.*, 2011) que se espera continúe en las próximas décadas (Lluch-Belda *et al.*, 2003). Considerando este escenario, si aumentase la frecuencia de temperaturas <20°C, entonces el reclutamiento se mantendría en niveles reducidos como los observados en el G2 (Figura 4). El efecto que esto tendrá en la población explotable es incierto.

Sin embargo, dado que la relación reclutas-temperatura es no-lineal, una reducción en el reclutamiento ocurriría también si la TSM se incrementara entre años, durante eventos El Niño por ejemplo. Esto impediría discernir si la disminución en la abundancia de juveniles de un año a otro es producto del enfriamiento de largo plazo o del calentamiento interanual.

Finalmente, cabe destacar que las series de reclutamiento de abulón azul en BC son producto de importantes esfuerzos de investigación llevados a cabo por el Instituto Politécnico Nacional durante los últimos 13 años, pero lamentablemente interrumpidos en 2009. Este tipo de investigaciones son escasas porque exigen una fuerte y constante inversión de tiempo, capital humano y financiero, sumados a problemas logísticos relacionados al muestreo de áreas lejanas y de difícil acceso en BC.

Con todo, el valor científico y práctico de series de tiempo como las que aquí se utilizaron no sólo justifica sobradamente dicha inversión, sino que también subraya la necesidad de un

plan de monitoreo continuo y sistemático de juveniles de abulón en la región. Información biológica como ésta permitirá profundizar en la dinámica de la población, en los efectos del cambio climático sobre el recurso, y sentará las bases de un manejo más informado de la pesquería.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Sociedad Cooperativa Pesquera Bahía Tortugas por el apoyo humano y logístico proporcionado durante 13 años, al Instituto Nacional de la Pesca por facilitar sus instalaciones en Bahía Tortugas y proporcionar la serie de tiempo de abundancia de adultos, y a Jorge Belmar por su valiosa participación en las campañas de trabajo de campo. Los autores reconocen a los sistemas EDI, COFAA y SIP (proyectos 20121172 y 20121009) del IPN por el apoyo económico.

REFERENCIAS

Babcock RC, Keesing J (1999) Fertilization biology of the abalone *Haliotis laevis*: laboratory and field studies. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 56: 1668-1678.

Bechtol WR, Kruse GH (2009) Analysis of stock-recruit relationship for red king crab off Kodiak Island, Alaska. *Mar. Coast. Fish.: Dynam. Manag. Ecosyst. Sci.* 1: 29-44.

Belmar-Pérez J, Guzmán Del Prío SA (1992) Madurez sexual y ciclo gonádico de *Haliotis fulgens* y *Astrea undosa* en Bahía Tortugas, B.C.S. (19861988). En *Memorias del Taller México-Australia sobre Reclutamiento de Recursos Bentónicos de Baja California*. SEPESCAIPN. México D.F. pp. 121-129.

Beverton RJH, Holt SJ (1957) *On the Dynamics of Exploited Fish Populations*. Fisheries Investigations, Ser. II, Vol. 19. Ministry of Agriculture, Fisheries and Food. Londres, RU. 533pp.

Bjorkstedt E, Goericke R, McClatchie S, Weber E, Watson W, Lo N, Peterson B, Emmett B, Peterson J, Durazo R, Gaxiola-Castro G, Chavez F, Pennington JT, Collins CA, Field J, Ralston S, Sakuma K, Bograd S, Schwing F, Xue Y, Sydeman W, Thompson SA, Santora JA, Largier J, Halle C, Morgan S, Kim SY, Merken K, Hildebrand J, Munger L. (2010) State of the California Current 2009–2010: Regional variation persists through transition from

La Niña to El Niño (and back?). *CalCOFI Rep.* 51: 39-69.

Carreón-Palau L, Guzmán del Prío SA, Belmar-Pérez, J, Carrillo-Laguna J, Herrera-Fragoso R (2003) Microhábitat y biota asociada de juveniles de abulón *Haliotis fulgens* y *H. corrugata* en Bahía Tortugas, Baja California Sur, México. *Cienc. Mar.* 29: 325-341.

Cushing DH (1971) The dependence of recruitment on parent stock in different groups of fishes. *ICES J. Mar. Sci.* 33: 340-362.

Cushing DH (1988) The study of stock and recruitment. En Gulland JA (Ed.) *Fish Population Dynamics: The Implications for Management*. Wiley. Nueva York, EEUU. pp. 105-128.

Del Monte-Luna P, Lluch-Belda D, Arreguin-Sánchez F (2007) Examen de la conservación y el aprovechamiento de los recursos vivos. *Inter ciencia* 32: 61-65.

Frank KT, Carscadden JE (1989) Factors affecting recruitment variability of capelin (*Mallotus villosus*) in the Northwest Atlantic. *ICES J. Mar. Sci.* 45: 146-164.

Guzmán del Prío (1994) *Biología, Ecología y Dinámica Poblacional de Abulón (Haliotis spp.) en Baja California*. Tesis. Escuela Nacional de Ciencias Biológicas, Instituto Politécnico Nacional. México. 189 pp.

Guzmán del Prío SA, Marín V, Castro-Aguirre C (1976) Estructura y abundancia de la población de abulón (*Haliotis spp.*) de Baja California en los años 1968-1970. En *Memorias del Simposio sobre Recursos Pesqueros Masivos de México. Volumen Especial de Abulón y Langosta*. Instituto Nacional de la Pesca-SIC. México. pp. 219-277.

Guzmán del Prío SA, Carrillo-Laguna J, Belmar-Pérez, Carreón-Palau L, Castro A (2004) Transplanting of wild and cultivated juveniles of green abalone (*Haliotis fulgens* Philippi 1845): growth and survival. *J. Shellf. Res.* 2: 855-860.

Hall CAS (1988) An assessment of several of the historically most influential theoretical models used in ecology and of the data provided in their support. *Ecol. Model.* 43: 5-31.

Hilborn R, Walters C (1992) *Quantitative Stock Assessment and Management. Choice, Dynamics and Uncertainty*. Kluwer. Norwell, MA, EEUU. 513 pp.

Instituto Nacional de la Pesca (2006) *Sustentabilidad y Pesca Responsable en México. Evaluación y Manejo*. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). México. 544 pp.

Leighton DL (1974) The influence of temperature on larval and juvenile growth in three species of

Southern California abalones. *Fish. Bull.* 72: 1137-1145.

Lluch-Belda D, Crawford RJM, Kawasaki T, MacCall AD, Parrish RH, Schwartzlose RA, Smith PE (1989) World-wide fluctuations of sardine and anchovy stocks: the regime problem. *S. Afr. J. Mar. Sci.* 8: 195-205.

Lluch-Belda D, Lluch-Cota D, Lluch-Cota SE (2003) Scales of inter-annual variability in the California Current System: associated physical mechanisms and likely ecological impacts. *CalCOFI Rep.* 44: 76-85.

McShane PE (1995) Recruitment variation in abalone: its importance to fisheries management. *Mar. Freshw. Res.* 46: 555-570.

McShane PE, Smith MG (1991) Recruitment variation in sympatric populations of the abalone *Haliotis rubra* (Mollusca: Gastropoda). *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 73: 203-210.

Myers, RA, Rosenberg AA, Mace PM, Barrowman N, Restrepo VR (1994) In search of thresholds for recruitment overfishing. *ICES J. Mar. Sci.* 51: 191-205.

Prince JD, Sellers TL, Ford WB (1988) Confirmation of relationship between the localized abundance of breeding stock and recruitment for *Haliotis rubra* Leach (Mollusca: Gastropoda). *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 122: 91-104.

Ricker WE (1963) *Handbook of Computations for Biological Statistics of Fish Populations*. Duhamel. Ottawa, Canadá. 300 pp.

Shepherd SA (1990) Studies on Southern Australian abalone (genus *Haliotis*) XII: Long term recruitment and mortality dynamics on fished populations. *Austr. J. Mar. Freshw. Res.* 41: 475-492.

Shepherd SA, Brown LD (1993) What is an abalone stock: Implications for the role of refugia in conservation. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 50: 2001-2009.

Shepherd SA, Partington D (1995) Studies on Southern Australian abalone (genus *Haliotis*) XVI. Recruitment, habitat and stock relations. *Austr. J. Mar. Freshw. Res.* 46: 669-680.

Shepherd SA, Lowe D, Partington D (1992) Studies on Southern Australian abalone (genus *Haliotis*) XIII: Larval dispersal and recruitment. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 164: 247-260.

Tegner MJ, DeMartini JD, Karpov K (1992) The California red abalone fishery: a case study in complexity. En Shepherd SA, Tegner MJ, Guzman del Prío SA (Eds.) *Abalone of the World: Biology, Fisheries and Culture*. Fishing News Books. Oxford, RU. pp 370-383.

Valiela I (2009) *Doing Science*. Oxford University Press. Nueva York, EEUU. 333 pp.