

**Enfoque bioeconómico para el
diseño de estrategias de
recuperación ante un
contexto climático incierto: El
caso de la pesquería de
abulón azul en México.**

Dr. Víctor G. Vargas López

Instituto Politécnico Nacional, Centro Interdisciplinario de
Ciencias Marinas

Dr. Francisco J. Vergara Solana

Universidad Autónoma de Baja California Sur, Departamento
Académico de Ciencias Marinas y Costeras

Dr. Luis C. Almendarez Hernández

Instituto Politécnico Nacional, Centro Interdisciplinario de
Ciencias Marinas

Abstract

Overfishing is a global issue exacerbated by climate change. In Mexico, the green abalone fishery represents a deteriorated resource, prompting efforts to rebuild it. Certain fishery areas have been closed through a collaborative decision-making process involving fishing communities and authorities as part of the recovery plan. This study evaluated three exploitation levels under future climate scenarios to guide potential fishery reopening in those zones. A bio-economic model was developed, incorporating the effects of sea surface temperature on abalone population dynamics. Results indicate that fishing effort levels targeting the maximum sustainable yield (MSY), based on historical data, could lead to overexploitation under warming scenarios. Conversely, adopting a lower effort level that balances acceptable returns with conservation objectives may support recovery and serve as a resilient strategy in the face of climate change. Accordingly, recovery strategies should be precautionary, account for multiple sources of uncertainty, and remain adaptable to shifts in stock productivity driven by climate variability.

Keywords: Climate change, overfishing, stock rebuilding, small-scale fisheries.

Resumen

La sobrepesca es un problema global que se ve agravando por el cambio climático. En México, la pesquería de abulón azul es un ejemplo de una pesquería deteriorada. Por tal motivo se están invirtiendo esfuerzos para recuperarla. Parte del plan de recuperación incluyó el cierre de la pesquería en algunas zonas, decisión que fue tomada por las mismas comunidades pesqueras en conjunto con las autoridades. En esta investigación se evaluaron tres niveles de explotación (en caso de una reapertura de la pesquería)

bajo escenarios climáticos futuros. Para esto se creó un modelo bioeconómico que considera el efecto de la temperatura superficial del mar en la dinámica de la población de abulón. Los resultados sugieren que un nivel de esfuerzo pesquero que buscara el rendimiento máximo sostenible (RMS) estimado con los datos históricos de la pesquería podría llevar a la sobreexplotación en escenarios de calentamiento. En cambio, aplicar un esfuerzo menor pero que permita rentabilidades aceptables puede ser compatible con la recuperación y ser una estrategia resiliente al cambio climático. Por lo tanto, una estrategia de recuperación de pesquerías debería ser precautoria, y para que tenga más probabilidades de éxito, deberá reconocer que existen muchas fuentes de incertidumbre, siendo flexible al considerar que el clima genera cambios en la productividad de la población.

Palabras clave: Cambio climático, sobreexplotación, reconstrucción de pesquerías, pesquerías de pequeña escala.

Introducción

En México, al igual que en el resto del mundo, existen pesquerías que han sido aprovechadas comercialmente por encima del nivel de esfuerzo que produce el rendimiento máximo sostenible (RMS), reduciendo la productividad de nuestros mares, y en algunos casos provocando el cierre de la pesquerías (FAO, 2022). La sobrepesca es un problema global que pone en riesgo los medios de vida y la seguridad alimentaria de millones de personas. Para contextualizar la importancia de la pesca, se resalta que los productos pesqueros son los productos básicos más intensamente comercializados en el mundo; su valor es mayor que el café, el arroz, el azúcar y el maíz combinados.

El abulón de la región occidental de la Península de Baja California es ejemplo de una pesquería deteriorada. A pesar de esto, el abulón es un recurso de gran valor y demanda en el mercado internacional. Además del valor monetario, esta pesquería tiene gran importancia histórica y cultural en la península de Baja California, ya que es una pesquería con más de 100 años de antigüedad y que gracias a ella, se fundaron varios de los poblados en la región conocida como la Pacifico Norte.

A pesar de su importancia económica y social, durante las dos últimas décadas se ha producido una disminución de las capturas de abulón en México. Para ilustrar esto, las capturas han pasado de alrededor de 6,000 toneladas en la década de los 50's a 150 toneladas en el 2019. Esta caída drástica ha sido atribuida a la sobrepesca, a la pesca ilegal y a la variabilidad climática que ha provocado un aumento en la mortalidad y una disminución del éxito reproductivo.

Si bien la caída de la producción pesquera probablemente se deba a una combinación de estos factores, varias investigaciones apuntan que desde los 70's el clima en la región no ha sido favorable para el recurso, situación que pudiera empeorar si consideramos el potencial efecto del cambio climático. A pesar de que se reconoce el papel del clima en la pesquería, la toma de decisiones para su administración asume que las condiciones ambientales son estables.

Es de fundamental importancia para el manejo pesquero, y para cualquier escenario de recuperación de poblaciones, considerar explícitamente como los cambios ambientales condicionan las poblaciones de abulón. Más allá del caso de esta pesquería, comúnmente, el manejo pesquero se ha caracterizado

por presentar un enfoque biológico y monoespecífico, sin tomar en cuenta que, al ser un sistema socio-ecológico, está caracterizado por múltiples objetivos de manejo (muchas veces contrarios entre sí) condicionados a un abanico de factores ambientales, sociales y económicos.

A pesar de esto, hay que reconocer la dificultad que implica evaluar las pesquerías bajo el lente de la socio-ecología. En esta línea, desde hace algunos años, la gestión pesquera se encuentra inmersa en una transición en la que el objetivo ya no es solo gestionar el recurso, sino gestionar a los usuarios de este. En este sentido, el nivel de rentabilidad se ha reconocido en un aspecto esencial para la toma de decisiones de los usuarios de los recursos.

El enfoque bioeconómico en la pesca nos da un marco metodológico para analizar y proponer estrategias de manejo que consideren simultáneamente los factores biológicos, económicos, ambientales y sociales. Como su nombre lo indica, el concepto de bioeconomía surge del vínculo entre dos disciplinas científicas, la biología y la economía. La biología se enfoca en el estudio de las poblaciones sujetas a la explotación pesquera y todos los procesos asociados. Por su parte, la economía se encarga del estudio de cómo administrar y distribuir eficientemente los recursos.

En este sentido, en este capítulo se ejemplifica como puede emplearse un modelo bioeconómico para evaluar escenarios de recuperación para la pesquería de abulón, considerando el potencial impacto del cambio climático. Para esto, se analiza el desempeño de dos escenarios de explotación, el primero considerando el esfuerzo que produce el RMS basándose en la información histórica de la

pesquería y el segundo denominado el esfuerzo mínimo aceptable, que es como su nombre lo indica, el nivel de explotación mínimo que las comunidades consideran aceptables desde la perspectiva económica.

Metodología

El área de estudio que se analizó incluye algunos de los bancos de pesca que se encuentran desde Bahía Asunción, hasta Punta Holcomb, en la Laguna San Ignacio. Esta zona se conoce como La

Bocana (Figura 1). Se obtuvieron datos de los muestreos biológico-pesqueros realizados en la zona por INAPESCA, complementado por datos técnicos y económicos proporcionados por la Sociedad Cooperativa de Producción Pesquera el Progreso (SCPPP). Los datos van de 1993 al 2017, que fue cuando en esa zona se decidió, entre las cooperativas y la autoridad, cerrar la pesquería para contribuir a la recuperación de las poblaciones de abulón hasta que estas alcancen niveles en los que se pueda soportar una pesquería sostenible.

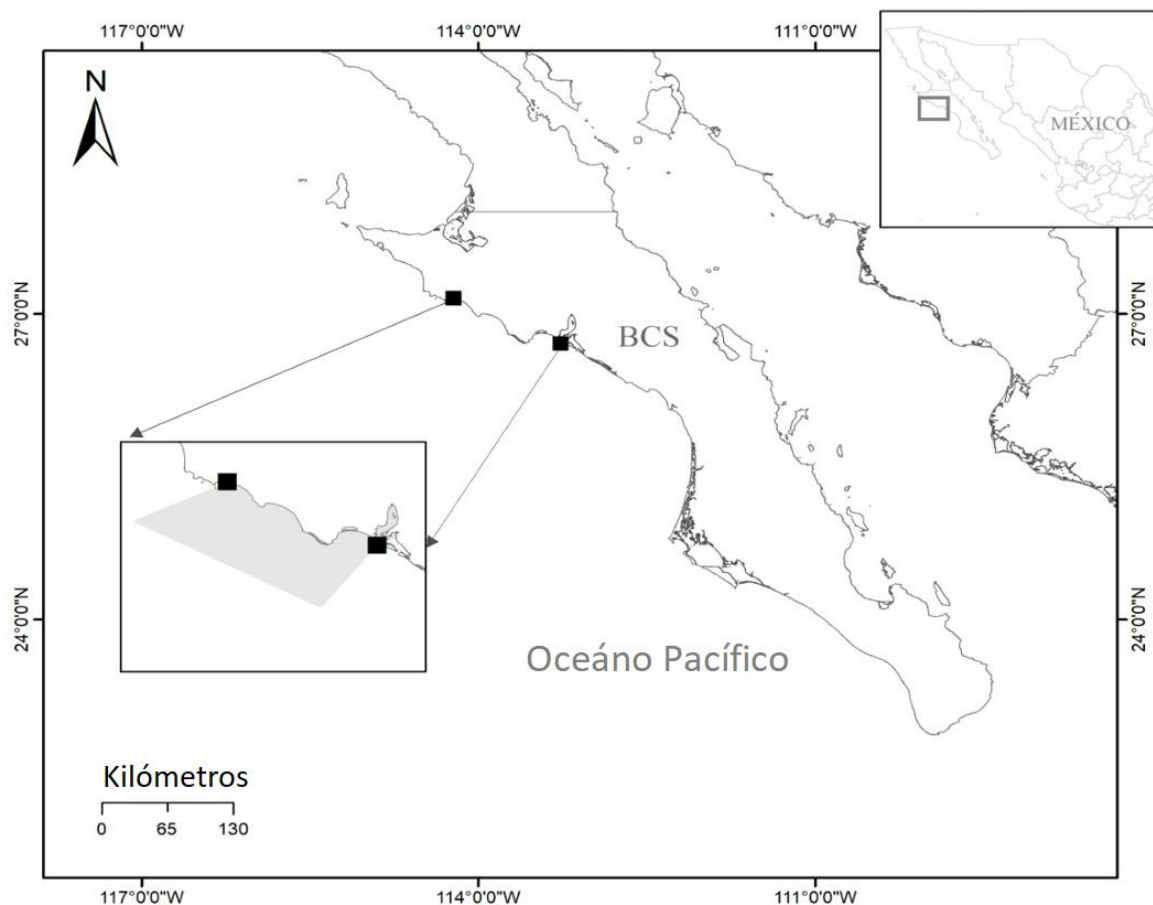


Figura 1: Ubicación geográfica y delimitación del área de estudio, La Bocana, en la costa occidental de la Península de Baja California, México.

El modelo bioeconómico parametrizado es una herramienta que nos ayuda a entender la dinámica de las poblaciones de abulón, así como el desempeño económico de la flota. Este es un modelo estructurado por edades y considera explícitamente como la temperatura superficial del mar (TSM) afecta el crecimiento, la mortalidad a la edad y el reclutamiento. El modelo consta de cuatro partes conocidas como

submodelos: el submodelo biológico, que refleja la dinámica poblacional; el submodelo ambiental, que simula los cambios anuales en la temperatura del mar; el submodelo tecnológico, que describe cómo la flota pesquera extrae los abulones; y finalmente, el submodelo económico, que ayuda a entender cómo los costos y los ingresos afectan la pesca (Figura 2; Tablas I y II).



Figura 2: Modelo bioeconómico teórico-conceptual.

El submodelo ambiental incluye información histórica sobre el clima y proyecciones de la TSM para el área de estudio. La información histórica abarca desde 2000 hasta 2017 y las proyecciones se utilizaron para simular escenarios climáticos. La información futura se basa en dos escenarios de concentración representativa de emisiones (RCP por sus siglas en inglés). Estos son escenarios utilizados para proyectar las concentraciones futuras de gases de efecto invernadero en la atmósfera y sus posibles impactos en el sistema climático. Los escenarios RCP se basan en diferentes supuestos sobre las emisiones

futuras de gases de efecto invernadero y los esfuerzos internacionales de mitigación. Se emplearon el escenario RCP 4.5 de emisiones intermedias y el escenario RCP 8.5 pesimista, y se proyectaron para el período de 2040 a 2050.

Se evaluaron tres estrategias de manejo que pudieran aplicarse en caso de que se reaperturara la pesquería de abulón en La Bocana. Las estrategias son: el ingreso mínimo del recurso (IMR), el esfuerzo histórico (EH) y el ingreso máximo por embarcación (IME). El IMR es la estrategia diseñada

por la SCPPP y se determina por el esfuerzo mínimo que genera un ingreso que cubre los costos operativos por embarcación y su costo de oportunidad laboral. Para el costo de oportunidad laboral se consideró el ingreso promedio obtenido al capturar otra especie de alto valor como la langosta roja. El EH se fijó en 25 embarcaciones, que, de acuerdo con estimaciones oficiales, es el esfuerzo que históricamente producía el RMS. El esfuerzo que produce IME se estimó a través de la optimización de la rentabilidad (maximizando la renta por embarcación), con la restricción de que el rendimiento máximo por panga para un año podría ser de 22 toneladas métricas (tm) (promedio histórico). Las simulaciones de estas estrategias de manejo comenzaron con la suposición de levantar la moratoria de la pesquería a partir de 2023 y continuar hasta 2040. La simulación representa 17 años ya que este período corresponde a la vida promedio del abulón azul.

El punto de referencia límite (PRL), en términos de biomasa, se refiere al nivel de biomasa que llevó al cierre de la pesca en 2017, el cual es de menos de 220 tm. El punto de referencia objetivo (PRO) se determinó utilizando la biomasa en rendimiento máximo sostenible que fue estimado por las autoridades pesqueras considerando el clima histórico de la zona que es de alrededor de 310 tm.

Tabla I: Descripción de las funciones utilizadas para parametrizar los cuatro submodelos del modelo bioeconómico estructurados por edades (Vergara-Solana *et al.*, 2023).

Descripción	Ecuación	Definición
Reclutamiento	$R_{\Theta t} = \frac{\sum_t SSB_t \cdot \frac{\alpha}{\Theta}}{\beta + \sum_t SSB_t}$	$\sum_t SSB_t$ = Biomasa de reproductores α = Reclutamiento máximo en el año Θ = Anomalía en la TSM β = Biomasa de reproductores en $\alpha/2$
Mortalidad natural a la edad	$M_{\Theta i} = \varphi_1 + \frac{\varphi_2}{i} + (\delta \cdot \theta)$	φ_1 = Primer parámetro de la mortalidad natural a la edad φ_2 = Segundo parámetro de la mortalidad natural a la edad δ = Parámetro de ajuste Θ = Anomalía en la TSM i = Edad
Sobrevivencia de la cohorte	$\frac{dN_i}{dt} = -(F_{i,t} + M_{\Theta i})N_{i,t}$	$N_{i,t}$ = Cantidad de individuos de la edad i en el tiempo t $F_{i,t}$ = Mortalidad por pesca a la edad i en el tiempo t $M_{\Theta i}$ = Tasa de mortalidad instantánea en el tiempo i con la anomalía en la TSM Θ
Crecimiento	$L_i = L_{\infty} \left[1 - e^{-[K'(t-t_0)]} \right];$ $K' = \alpha + \beta \cdot (\theta)$	L_{∞} = Talla máxima promedio t_0 = Edad teórica a la talla 0 K' = Parámetro de curvatura determinado por las anomalías en la TSM θ α, β = Parámetros de ajuste
Relación peso longitud	$W_{i,t} = a + (L_i)^b$	L_i = Longitud a la edad i a = Parámetro de la relación peso longitud b = Parámetro de la relación peso longitud
Biomasa total	$B_t = \sum_{i=1}^{i=k} N_{i,t} W_{i,t}$	$N_{i,t}$ = Cantidad de organismos de la edad i en el tiempo t $W_{i,t}$ = Pesos de los organismos de la edad i en el tiempo t
Mortalidad por pesca	$F_{i,t} = E_t q_i$	E_t = Esfuerzo pesquero total en el tiempo t q_i = Coeficiente de capturabilidad a la edad i
Capturabilidad	$q_i = -\ln \left[1 - \left(\frac{aSEL_i C}{Area} \right) \right]$	a = Área barrida por día en km^2 $Area$ = Área de distribución en km^2 c = Probabilidad de captura
Selectividad	$Sel_i = \frac{1}{1 + e^{s_1 - s_2 * L_i}}$	s_1, s_2 = de Sparre y Venema (1998)
S1; S2	$S1 = L_{50\%} \ln \left(\frac{3}{L_{75\%} - L_{50\%}} \right) ;$ $s2 = \frac{s1}{L_{50\%}}$	$L_{50\%}$ = Longitud donde el arte de pesca retiene el 50 % $L_{75\%}$ = Longitud donde el arte de pesca retiene el 75 %
Capturas	$Y_{i,t} = B_t \left(\frac{F_{i,t}}{F_{i,t} + M_{\Theta i}} \right) * \left(1 - e^{-(F_{i,t} + M_{\Theta i})} \right)$	B_t = Biomasa total disponible en el tiempo t $F_{i,t}$ = Mortalidad por pesca a la edad i en el tiempo t $M_{\Theta i}$ = Tasa instantánea de mortalidad a la edad i con la anomalía en la TSM Θ
Cuasi renta anual	$\pi_t = \sum_s (p y_t - C_t E_t)$	$p y_t$ = Ingresos totales calculados con las capturas y el precio de venta p C_t = Costo variable por embarcación E_t = Esfuerzo pesquero; cantidad de embarcaciones
Valor Presente Neto	$VPN = \int_{y=0}^Y \pi_t e^{-\delta y}$	Y = Horizonte de simulación δ_y = Tasa de descuento

Tabla II: Parámetros de las funciones del modelo bioeconómico estructurado por edades para el abulón azul en La Bocana, B.C.S., México (Vergara-Solana *et al.*, 2023).

Parámetros	Símbolo	Valor	Unidad de medida
Reclutamiento inicial	R	525,000	1/año
Edad máxima	λ	17	años
Edad primera madurez	sm	5	años
Edad primera captura		5	años
Edad teórica a la talla 0	t_0	-0.55	-
Talla máxima promedio	L_{∞}	16.4	cm
Parámetro de ajuste de K con respecto a las anomalías de la TSM	α	0.1621	-
Parámetro de ajuste de K con respecto a las anomalías de la TSM	β	0.0815	-
Parámetro de la relación peso longitud	a	0	-
Parámetro de la relación peso longitud	b	3.1	-
Parámetro mortalidad a la edad	φ_1	0.210030061	-
Parámetro mortalidad a la edad	φ_2	0.560111111	-
Ajuste mortalidad con respecto a las anomalías de la TSM	δ	0.060114373	-
Parámetro del reclutamiento (Beverton-Holt)	α	1,605,000	-
Parámetro del reclutamiento (Beverton-Holt)	β	550	-
L50% retención arte de pesca	$L_{50\%_1}$	14	cm
L75% retención arte de pesca	$L_{75\%_1}$	15.5	cm
S1 Función de selectividad	S_{1i}	4.45	-
S2 Función de selectividad	S_{2i}	0.32	-
Área barrida	a_1	0.76	km ² /barco/año
Área de distribución del recurso	área	32	km ²
Probabilidad de captura	c	0.9	-
Precio de venta	P	\$41,000.00	us\$/ton
Costo de una unidad de esfuerzo	C_1	\$190.00	us\$/barco/día
Cantidad de viajes diarios en la temporada	FT	30	Días/año
Tasa de descuento	d	5.34%	1/año

Resultados

Los datos históricos de la temperatura superficial del mar en la zona de La Bocana muestran que desde el año 2000 hasta el 2017 la tendencia ha sido al alza, con varios periodos de fluctuaciones, destacando una variación positiva realmente importante entre 2006 y 2008 (Figura 3). El promedio de temperatura histórico para la zona son 20.26°C, pero de acuerdo con las proyecciones de cambio climático, si

estas se cumplen, en el escenario pesimista, para el año 2040 o 2050 la temperatura promedio será 1.3°C más alta que la tendencia histórica (21.58°C frente a 20.26°C) (Figura 3 y la Tabla III). Es esencial tomar en cuenta que a medida que el escenario proyectado se vuelve más cálido, los posibles valores de temperatura podrían presentar una variabilidad más pronunciada que con respecto a la tendencia histórica (pasando de una desviación estándar de 1.13 a 1.67) (Figura 3 y Tabla III).

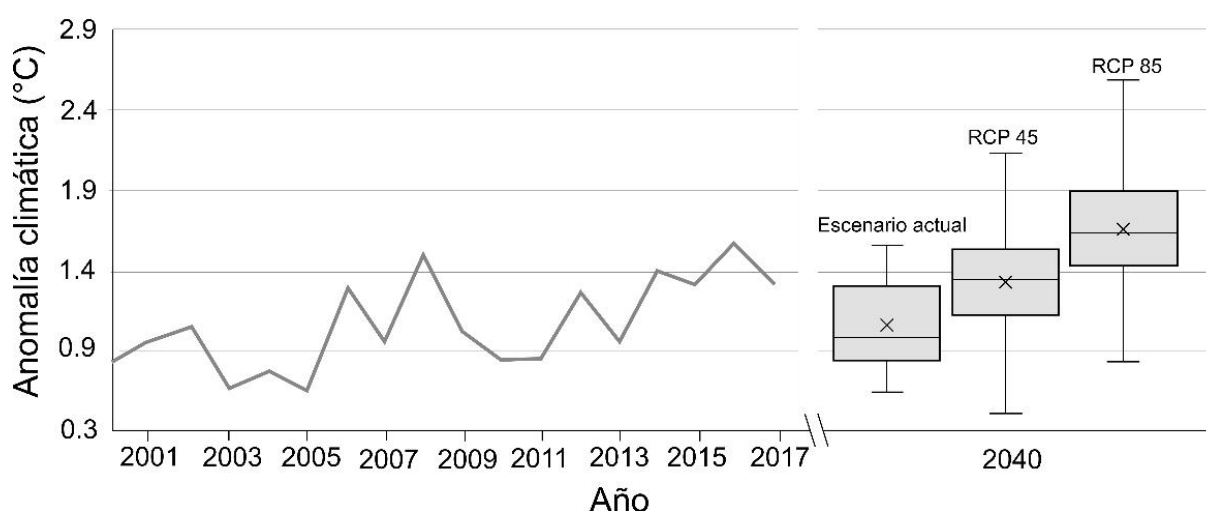


Figura 3: Anomalías de la temperatura superficial del mar históricas (2000-2017) para la zona de La Bocana y proyección para el período de 2040-2050 siguiendo tres escenarios climáticos diferentes.

Tabla III: Promedio de anomalías y valores absolutos de la temperatura superficial del mar (TSM) (en °C) para los tres escenarios climáticos en el área de estudio (escenario actual; RCP 4.5 y RCP 8.5)

Escenarios climáticos	Anomalía promedio (°C)	TSM (°C)	Desviación estándar (σ)
<i>Escenario actual</i>	1.08	20.26	1.13
RCP4.5	1.33	21.29	1.33
RCP8.5	1.67	21.58	1.67

En la figura 4 se puede apreciar como el modelo puede predecir el comportamiento histórico de la pesquería. En la figura 4 se muestran las capturas históricas observadas del año 1993 al 2017 y las capturas simuladas con el modelo para el mismo periodo, considerando la temperatura de la mar histórica y la cantidad de pangas que salían a pescar (el esfuerzo pesquero). Posteriormente, se compararon estadísticamente para validar el modelo, resultando que las dos series son estadísticamente iguales. Los datos simulados se ajustaron bastante bien a los datos observados (con un coeficiente de correlación de 0.92 y un coeficiente de determinación de 0.85). La gran caída en los desembarques, de alrededor de 90 tm a alrededor de 20 tm en seis años, se observa en ambos conjuntos de datos. Después del 2005, los desembarques tendieron a mantenerse en alrededor de 20 toneladas métricas hasta el cierre de la pesquería en la zona en el año 2017.

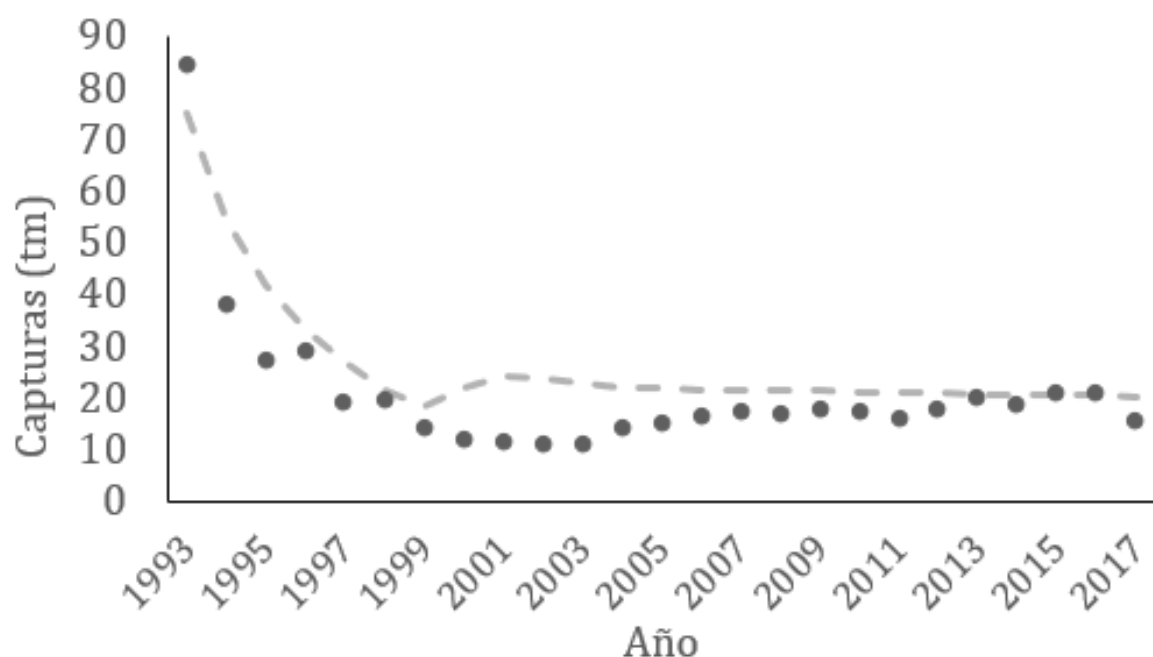


Figura 4: Desembarques históricos observados (línea discontinua) y desembarques históricos estimados con el modelo (línea de puntos) considerando el esfuerzo histórico (25 pangas) y el escenario climático actual basado con la información histórica promedio.

Una manera de ver como el cambio climático pudiese afectar la capacidad de la población para soportar una pesquería sostenible es viendo como un aumento de la temperatura afecta los procesos que regulan la dinámica de la población; puntualmente el crecimiento, la mortalidad y el reclutamiento (eficiencia reproductiva). Por un lado, conforme aumenta la temperatura los organismos tienden a llegar más rápido a su talla máxima, es decir, un incremento

en la temperatura mejora el desempeño la temperatura superficial del mar. El del crecimiento, lo que es favorable reclutamiento mejora exponencialmente para una pesquería. Pero en contraste conforme se reduce la temperatura la mortalidad aumenta y la eficiencia (figura 5). reproductiva decrece conforme aumenta

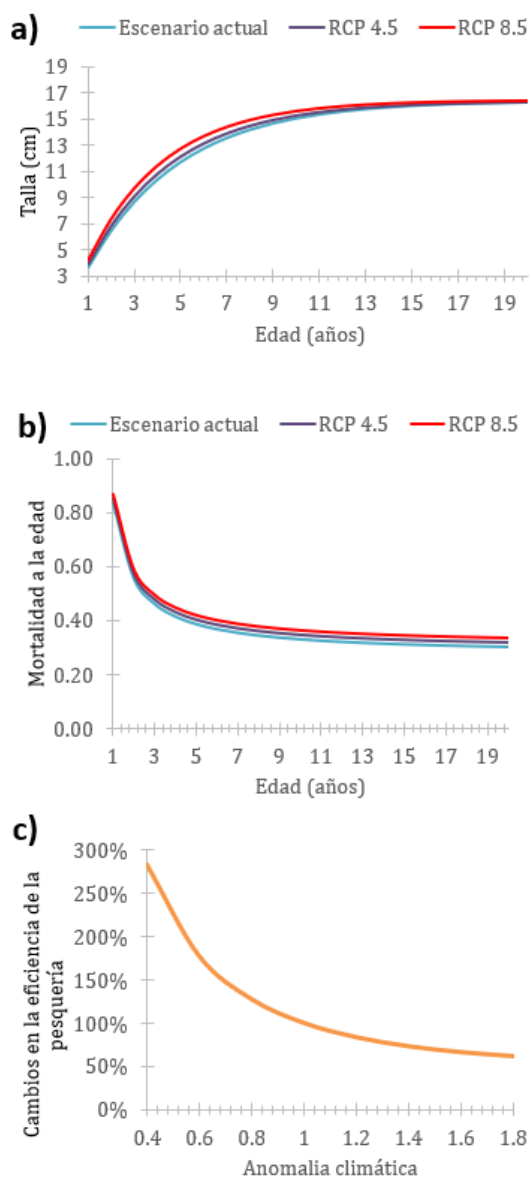


Figura 5: Efecto de la temperatura superficial del mar en el crecimiento, mortalidad y en el reclutamiento. Se muestran la talla a la edad proyectada en tres escenarios climáticos (a) y la tasa de mortalidad instantánea a la edad en los mismos escenarios climáticos (b). El efecto del cambio climático sobre el reclutamiento se muestra evaluando como cambia la eficiencia de la pesquería por los cambios en el reclutamiento causados por el clima (anomalías climáticas) (c).

Realizamos simulaciones de la pesquería utilizando diferentes estrategias de manejo que consisten en diferentes niveles de esfuerzo, es decir, cantidad de embarcaciones. El esfuerzo histórico que es el que produce el RMS en condiciones climáticas históricas, fue de 25 pangas, el IME con 16 embarcaciones y el IMR con 4 embarcaciones. Estos esfuerzos se evaluaron ante los diferentes escenarios climáticos en términos de capturas, rentabilidad (Valor presente neto: VPN) de la pesquería, de la embarcación y de la biomasa (Tabla IV).

Con los resultados de las simulaciones podemos apreciar que cuando se

aumenta el esfuerzo, los desembarques y la rentabilidad de la pesquería también aumentan. Sin embargo, la rentabilidad por barco y la biomasa aumentan a medida que disminuye el esfuerzo (Tabla IV).

Bajo escenarios de cambio climático, entre más alta sea la temperatura, el rendimiento de la pesquería disminuye en todos los indicadores: captura, biomasa y rentabilidad, tanto por barco como a nivel de toda la pesquería. En el escenario RCP 8.5, el rendimiento y la rentabilidad disminuyen alrededor del 50 % en comparación con el estado actual (Tabla IV).

Tabla IV: Valor de los indicadores de desempeño de la pesquería obtenidos con las tres estrategias de manejo evaluadas ante tres diferentes escenarios climáticos.

EH			
	<i>Escenario actual</i>	RCP 4.5	RCP 8.5
No. de embarcaciones	25	25	25
Capturas (2023–2040)	403	327	204
Rentabilidad	\$2,407,024	\$1,902,755	\$1,096,769
Rentabilidad-embarcación	\$96,281	\$76,110	\$43,871
Biomasa (2040)	357	332	250
IMR			
	<i>Escenario actual</i>	RCP 4.5	RCP 8.5
No. de embarcaciones	16	16	16
Capturas (2023–2040)	315	250	158
Rentabilidad	\$1,896,090	\$1,500,909	\$875,222
Rentabilidad-embarcación	\$118,506	\$93,807	\$54,701
Biomasa (2040)	402	369	275
IME			
	<i>Escenario actual</i>	RCP 4.5	RCP 8.5
No. de embarcaciones	4	4	4
Capturas (2023–2040)	115	92	57
Rentabilidad	\$691,391	\$547,297	\$322,191
Rentabilidad-embarcación	\$172,848	\$136,824	\$80,548
Biomasa (2040)	495	445	328

Si se mantuviera la temperatura en el estado actual, el nivel de esfuerzo histórico genera valores consistentes con el rendimiento máximo sostenible (PRO). Sin embargo, con el aumento de la temperatura, la biomasa tiende a acercarse rápidamente al PRL, que corresponde al nivel de biomasa que causó el cierre de la pesquería en

2017. De igual manera con las otras estrategias de manejo la biomasa se reduce conforme aumenta la TSM, pero, aun así, la estrategia de gestión más conservadora (IMR) podría mantener eficazmente la pesquería a un nivel compatible con el RMS incluso en el escenario climático pesimista (Figura 6).

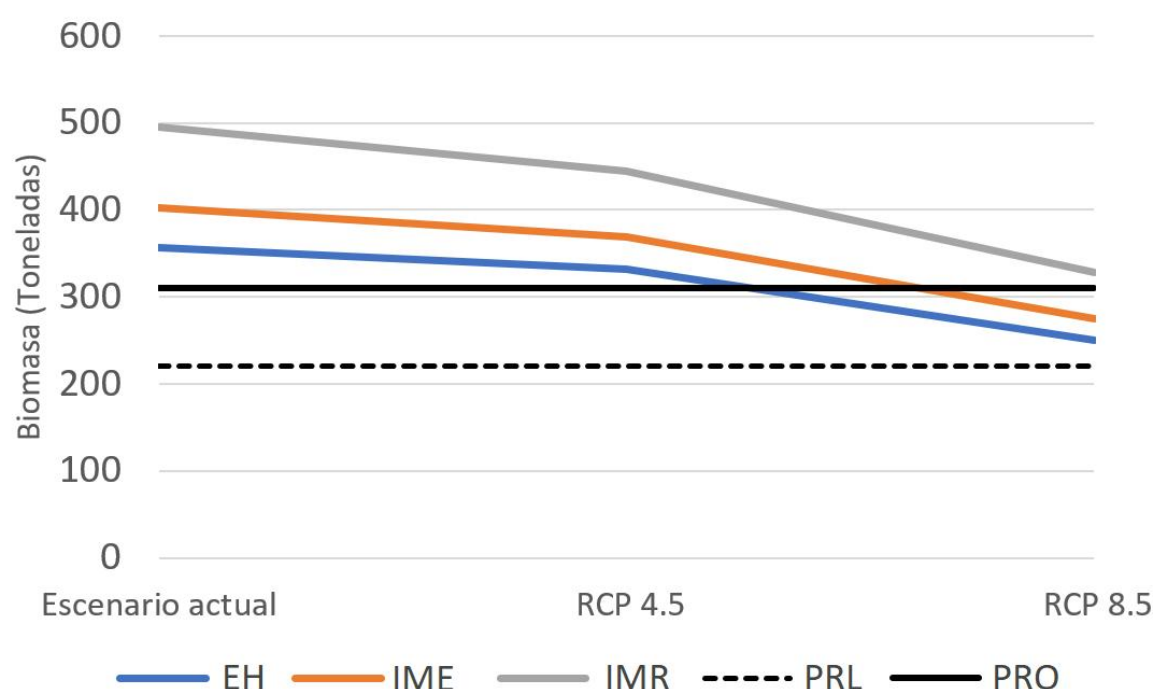


Figura 6: Biomasa proyectada al final de la simulación (2040) para cada una de las tres estrategias de manejo en los tres escenarios climáticos. La biomasa se muestra con respecto a los puntos de referencia objetivo (línea negra) y el punto de referencia límite (línea punteada).

Discusión

En muchas pesquerías, los modelos bioeconómicos se han utilizado para resolver problemas de manejo de recursos, así como para desarrollar alternativas y recomendaciones de políticas pesqueras (e.g., determinar cuotas de captura anuales, capturas por localidad y/o ubicación), todo eso

para recomendar, satisfacer o dar cumplimiento a objetivos específicos de manejo que consideren explícitamente los incentivos de los pescadores (e.g., el ingreso, trabajo) (Anderson y Seijo, 2010).

Con base en esta información, el análisis bioeconómico pesquero

tiene como primer objetivo generar recomendaciones de cómo una pesquería podría operar dados estos factores endógenos, pero interdependientes, con cambios en la flota y el tamaño de la población (que puede variar en función del clima). Como segundo objetivo, busca sugerir y analizar los procedimientos de manejo para regular a los participantes de tal manera que se obtengan los objetivos deseados (e.g., sociales, económicos o productivos) (Salas *et al.*, 2007; Anderson y Seijo, 2010).

Para ello, es fundamental conocer y/o determinar los parámetros poblacionales, sino también las variables que influyen en su variabilidad para poder construir un modelo poblacional que permita diseñar alternativas de gestión con un menor grado de incertidumbre. En este sentido, estas alternativas mejorarán en gran medida a las medidas de control y los futuros esfuerzos de gestión, permitiendo conocer las fuentes de variación que no están determinadas por la pesca como lo es el clima; además, este enfoque permite a los gestores prever las condiciones de las poblaciones sujetas a explotación o recuperación.

La pesquería del abulón mexicano es reconocida como una pesquería volátil en términos de desembarques, probablemente explicado por la sensibilidad de la población al cambio de la temperatura superficial del mar. Estudios previos ya han sugerido que el

crecimiento del abulón se beneficia del aumento de temperatura, pero que la supervivencia y el éxito reproductivo se ven afectados negativamente. Esto demuestra que los cambios de temperatura pueden generar efectos contrarios en los diferentes aspectos que regulan las poblaciones. En este caso en particular, si consideramos estos efectos del clima en su conjunto, el saldo es negativo para la pesquería; es decir un aumento en la temperatura del mar afecta negativamente el desempeño económico de la pesquería (Vargas-López *et al.*, 2021; 2023; Vergara-Solana *et al.*, 2023).

Las simulaciones realizadas en este estudio nos enseñan que, si se implementa un esfuerzo de pesca en una pesquería compatible con el RMS estimado con valores históricos, puede llevar a la sobreexplotación en escenarios de calentamiento. Esta situación ha sido evidenciada por otros autores, quienes resaltan que las probabilidades de que se recupere una pesquería se reducen drásticamente si los planes de recuperación se realizan con el supuesto de estabilidad climática (Britten *et al.*, 2017).

El riesgo señalado aquí enfatiza la necesidad de que los puntos de referencia tengan en cuenta el impacto de los cambios inducidos por el clima en la productividad (Vergara-Solana *et al.*, 2023). Por lo tanto, basándonos en los hallazgos de las simulaciones,

se recomienda que las decisiones de gestión del abulón se aborden con un alto nivel de precaución. La estrategia de gestión basada con el esfuerzo mínimo aceptable por las cooperativas (IMR) puede servir como un enfoque precautorio, permitiendo a los pescadores operar con un esfuerzo mínimo generando utilidades. Esta estrategia puede aliviar algunas de las cargas financieras de la comunidad de un cierre prolongado de la actividad, permitiendo que continúen los esfuerzos de recuperación (Vergara-Solana *et al.*, 2023).

Al diseñar una estrategia para recuperar una pesquería, debe reconocerse que incluso cuando las poblaciones se recuperan, es posible que no alcancen el nivel de biomasa previo al colapso (Lotze *et al.*, 2011). Es probable que este sea el caso del abulón mexicano, debido a las condiciones climáticas desfavorables en la región (Ponce-Díaz *et al.*, 2003). Sin embargo, a pesar de que probablemente no se alcancen los niveles históricos, la pesquería aún es rentable incluso con una cuota menor.

Conclusiones

Es importante reconocer que para reconstruir una pesquería se requiere de un esfuerzo que puede llevar muchos años (probablemente décadas) y que los factores ambientales pueden afectar dichos planes de recuperación. Por eso es aconsejable no diseñar planes de recuperación que consideren únicamente

escenarios climáticos favorables. En este sentido los planes de recuperación tienen que ser precautorios y monitoreados de cerca y de forma continua. Finalmente, para evitar falsas expectativas (ya que puede ser contraproducente) se recomienda que tanto la incertidumbre en torno a estos planes de recuperación, así como los avances y resultados, se deben de comunicar de manera constante y transparente a los principales interesados: las comunidades pesqueras.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Sociedad Cooperativa de Producción Pesquera Progreso y al INAPESCA por compartir los registros y datos aquí analizados. El financiamiento fue proporcionado por el Proyecto CONACyT No. 320501 y el SNI (Sistema Nacional de Investigadores). LCAH agradece al Instituto Politécnico Nacional por el apoyo del programa EDI y el proyecto SIP-20230859.

Referencias

- [1] Anderson, L.G. y Seijo, J.C. *Bioeconomics of Fisheries Management*. John Wiley & Sons, 2010
- [2] Britten, G.L., Dowd, M., Kanary, L. y Worm, B. Extended fisheries recovery timelines in a changing environment. *Nat Commun* 8, 15325, 2017 <https://doi.org/10.1038/ncomms15325>
- [3] FAO. *The State of World Fisheries and Aquaculture 2022. Towards Blue*

- Transformation*. Rome, FAO, 2022
<https://doi.org/10.4060/cc0461en>
- [4] Lotze, H.K., Coll, M., Magera, A.M., Ward-Paige, C. y Airolidi, L. Recovery of marine animal populations and ecosystems. *Trends in Ecology & Evolution* 26, 595–605, 2011
<https://doi.org/10.1016/j.tree.2011.07.008>
- [5] Ponce-Díaz, G., Lluch-Cota, S.E., Bautista-Romero, J.J. y Lluch-Belda, D. Caracterización multiescala de la temperatura del mar en una zona de bancos de abulón (*Haliotis* spp.) en Bahía Asunción, Baja California Sur, México. *Ciencias marinas* 29, 291–303, 2003
- [6] Salas, S., Chuenpagdee, R., Seijo, J. C., y Charles, A. Challenges in the assessment and management of small-scale fisheries in Latin America and the Caribbean. *Fisheries Research*, 87(1), 5–16, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2007.06.015>
- [7] Vargas-López, V.G., Vergara-Solana, F. y Arreguín-Sánchez, F. Effect of environmental variability on the individual growth of yellow abalone (*Haliotis corrugata*) and blue abalone (*Haliotis fulgens*) in the Mexican Pacific. *Regional Studies in Marine Science* 46, 101877, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2021.101877>
- [8] Vargas-López, V.G., Vergara-Solana, F.J. y Almendarez-Hernández, L.C. Environmental related age-specific natural mortality of a high-value species: The case of Mexican green abalone fishery. *Regional Studies in Marine Science* 62, 102938, 2023 <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2023.102938>
- [9] Vergara-Solana, F. J., Vargas-López, V. G., Bolaños-Durán, E., Paz-García, D. A., y Almendarez-Hernández, L. C. Bioeconomic analysis of stock rebuilding strategies for the green abalone fishery in Mexico under climate uncertainty. *Ocean & Coastal Management*, 243, 106759, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2023.106759>