

A Bayesian framework with implementation error to improve the management of the red octopus (*Octopus maya*) fishery off the Yucatán Peninsula

Enfoque bayesiano con error de implementación para mejorar el manejo de la pesquería de pulpo rojo (*Octopus maya*) en la Península de Yucatán

J Jurado-Molina

Secretariat of the Pacific Community, 95 Promenade Roger Laroque, Anse Vata, New Caledonia.
E-mail: jjurado@u.washington.edu

ABSTRACT. The red octopus (*Octopus maya*) is an endemic species of the Yucatán Peninsula and its fishery is one of the most important along the Atlantic coast of Mexico. Commercial exploitation started in 1949. Since 2002 an index of abundance has been estimated, and this index was used to perform a stock assessment and decision analysis using the Schaefer model. A Bayesian approach was applied to estimate the model parameters and to project the species population under two management scenarios with a constant harvest rate and a positive implementation error. Results suggest that in 1995 the biomass corresponded to 23% of the population carrying capacity (K) and that the current stock is only 14% of K . The population may be depleted and a rebuilding plan might be necessary. In the decision analysis, when the implementation error was included, the Markov Chain Monte Carlo simulations suggested that the current level of exploitation (50% harvest rate) could produce a decreasing trend with the most probable biomass of 9679 t and an expected catch of 7920 t in 2018, and an expected probability of 0.82 of the population being less than 40% of K . On the contrary, a 30% harvest rate would raise the expected catch in 2018 (12,058 t), also reducing the probability of the population being smaller than 40% of K . The inclusion of the implementation error provides a more realistic scenario and represents a more conservative option; therefore, using this type of auxiliary data within a Bayesian framework is recommended for the decision making process. If adopted by Mexican fisheries managers, the approach used in this study could help improve the management of this resource and keep exploitation at sustainable levels.

Key words: constant harvest rate, posterior distribution, Markov Chain Monte Carlo simulations, implementation error, depletion.

RESUMEN. El pulpo rojo (*Octopus maya*) es una especie endémica de la Península de Yucatán. La suya es una de las pesquerías más importantes de la costa Atlántica de México; su explotación comercial inicio en 1949, y desde 2002 se ha estimado su índice de abundancia. Este índice se usó para llevar a cabo una valoración del stock y un análisis de decisión usando el modelo de Schaefer. Se usó un enfoque Bayesiano para la estimación de los parámetros del modelo y para proyectar la población de esta especie bajo dos escenarios de manejo con una tasa de explotación constante y un error de implementación positivo. Los resultados sugieren que en 1995 la biomasa correspondía al 23% de la capacidad de carga de la población K y que el stock actual es sólo 14% de K . Los resultados sugieren que la población podría estar sobreexplotada y que podría ser necesario un plan de reconstrucción del recurso. Cuando se usó error de implementación en el análisis de decisión, las simulaciones de cadenas de Markov-Monte Carlo sugieren que el nivel actual de explotación (tasa de explotación del 50%) podría producir una tendencia decreciente en la biomasa, con un valor de biomasa más probable de 9679 t, una esperanza de captura de 7920 t en 2018 y una probabilidad de 0.82 de que la población sea menor que 40% de K . Por el contrario, una tasa de explotación del 30% incrementaría la esperanza de la captura en 2018 (12,058 t), también reduciendo la probabilidad de que la población sea menor al 40% de K . La inclusión del error de implementación proporciona un escenario más realista y representa una opción más conservadora; por consiguiente se recomienda usar este tipo de datos auxiliares en un marco Bayesiano para la toma de decisión. Si las autoridades pesqueras mexicanas adoptan el método usado en este trabajo se puede mejorar el manejo de este recurso, manteniendo su explotación en niveles sustentables.

Palabras clave: tasa de explotación constante, distribución posterior, Cadenas de Markov Monte Carlo, error de implementación, sobreexplotación.

INTRODUCTION

The red octopus (*Octopus maya*) is an endemic benthic species of the Yucatán Peninsula, Mexico (Voss and Solís-Ramírez 1966, Solís-Ramírez and Chávez 1986). It is distributed from the coast of Ciudad del Carmen in the state of Campeche to Isla Mujeres in the state of Quintana Roo (Solís-Ramírez 1994, Van Heukelem 1977). The spawning season extends from November to December (Fuentes *et al.* 1965, Voss and Solís-Ramírez 1966). The red octopus fishery is one of the most important along the Atlantic coast of

INTRODUCCIÓN

El pulpo rojo (*Octopus maya*) es una especie bentónica endémica de la península de Yucatán (Voss y Solís-Ramírez 1966, Solís-Ramírez y Chávez 1986). Se distribuye desde la costa de Ciudad del Carmen en el estado de Campeche hasta Isla Mujeres en el estado de Quintana Roo (Solís-Ramírez 1994, Van Heukelem 1977). La temporada de desove va de noviembre a diciembre (Fuentes *et al.* 1965, Voss y Solís-Ramírez 1966). Es una de las pesquerías más importantes en la costa Atlántica de México generando 15,000 empleos

Mexico, generating 15,000 direct jobs and an annual income of 360 millions of Mexican pesos (INAPESCA 2008). Commercial exploitation started in 1949 (Solís-Ramírez *et al.* 1997). Three fleets participate in this fishery: two artisanal fleets that work in shallow waters and one fleet of mid-sized ships that operates in deeper waters, catching red octopus and the common octopus (*Octopus vulgaris*). The fishing gear, locally called “jimba”, consists of a rod with several lines having live crabs as bait (Arreguín-Sánchez *et al.* 2000). The artisanal fleets catch about 80% of the red octopus total annual yield. In the middle-sized fleet, the percentage of red octopus catch varies between 70% and 80% of the total octopus catch.

Management of Mexico’s fishing resources is based on three main management tools: management plans, the National Fisheries Chart (containing brief information about the fishing resources in Mexico, such as capture, management regulations, the status of the stock, etc.), and the Official Mexican Norms. The latter are obligatory technical regulations expedited by the Mexican government, establishing rules, specifications, attributes, and characteristics applied to products, processes, facilities, systems, activities, services, or production methods (*Diario Oficial de la Federación* 30/04/2009). In particular, two norms address the management of the red octopus fishery: NOM-008-PESC-1993 establishes a 110-mm minimum mantle size and bans the use of harpoons and hooks, and NOM-009-PESC-1993 establishes the need for closed seasons in Mexican waters; the closed season for the red octopus extends from 16 December to 31 July (INAPESCA 2008).

From 1995 to 2008, catches varied between 7,206 and 18,460 t, with the maximum in 2006. In 2002 the National Fisheries Institute (INP) initiated a program to estimate an index of abundance independent of the fishery, and for that year a red octopus biomass of 22,737 t was estimated for the coast of the Yucatán Peninsula. The maximum biomass estimate (25,944 t) was recorded in 2004 and the minimum (16,219 t) in 2008. Since 2002, an annual quota has been established for this fishery based on biomass estimates. It is important to point out that this is one of the few quota-regulated fisheries in Mexico. Though it is not clear how this quota has generally been established and what fishery management strategy is being implemented (INP 2002, 2007, INAPESCA 2008), the quota has varied between 44% and 50% of the estimated biomass; however, catches have ranged from 30% to 76% of the estimated biomass. The largest catch (18 460 t) was recorded in 2006 and may have caused an important decrease in the vulnerable biomass of the following years.

This fishery provides an important opportunity to model different management scenarios owing to the availability of the index of abundance and of information on the implementation error in the proposed quota. This type of error plays an important role in the dynamics of the species because it reflects the implications of the inability to fully implement

directos y un ingreso anual de 360 millones de pesos mexicanos (INAPESCA 2008). La explotación comercial se inició en 1949 (Solís-Ramírez *et al.* 1997). Tres flotas participan en la pesquería, dos flotas artesanales trabajando en aguas someras y una flota de embarcaciones medianas en aguas profundas capturando el pulpo rojo y el pulpo común (*Octopus vulgaris*). El arte de pesca, localmente conocida como “jimba”, consiste de una caña con varias líneas con carnada de cangrejo (Arreguín-Sánchez *et al.* 2000). Las flotas artesanales capturan alrededor del 80% de la captura anual de pulpo rojo. El porcentaje de pulpo rojo en la captura de la flota de embarcaciones medianas varía entre el 70% y 80% de la captura total de pulpo.

El manejo de los recursos pesqueros en México está basado en tres herramientas de manejo: los planes de manejo, la Carta Nacional Pesquera (contiene información breve de los recursos pesqueros mexicanos, como captura, regulaciones pesqueras, estado de salud del recurso, etc.) y las normas oficiales mexicanas. Las normas oficiales mexicanas son regulaciones técnicas obligatorias expedidas por el gobierno mexicano, estableciendo reglas, especificaciones, atributos, y características aplicadas a productos, procesos, logística, sistemas, actividades, servicios, o métodos de producción (*Diario Oficial de la Federación* 30/04/2009). En particular, dos normas oficiales mexicanas, NOM-008-PESC-1993 y NOM-009-PESC-1993, están dedicadas al manejo de la pesquería del pulpo rojo. La primera norma establece una talla mínima de manto de 110 mm y prohíbe el uso de ganchos y figgas. La segunda norma, establece la necesidad de crear vedas en las aguas mexicanas; en particular, la veda para el pulpo rojo va del 16 de diciembre al 31 de julio (INAPESCA 2008).

A partir de 1995 hasta 2008, las capturas de pulpo han variado entre 7,206 y 18,460 t con un máximo en 2006. En 2002 el Instituto Nacional de la Pesca (INP) desarrolló un programa para estimar un índice de abundancia independiente de la pesquería. La campaña de evaluación de la biomasa produjo una estimación de 22,737 t en la costa de la península de Yucatán en ese año. La estimación máxima de biomasa se registro en 2004 con 25,944 t. La estimación mínima fue de 16,219 t en 2008. A partir de 2002, se ha establecido una cuota anual para esta pesquería basada en la estimación de la biomasa. Es importante señalar que ésta es una de las pocas pesquerías en México regulada por cuota. A pesar de que no es claro como se ha establecido esta cuota y cuál es la estrategia de manejo implementada en esta pesquería (INP 2002, 2007, INAPESCA 2008), la cuota ha variado entre 44% y 50% de la biomasa estimada. Sin embargo, las capturas han variado entre 30% y 76% de la biomasa estimada. La mayor captura (18 460 t) se realizó en 2006 y podría haber causado un importante decremento en la biomasa vulnerable en los años subsecuentes.

Esta pesquería presenta una oportunidad importante para la modelación de diferentes escenarios de manejo debido a la disponibilidad de un índice de abundancia y datos del error

management actions (Punt and Hilborn 2001) and is recognized as an important component in fisheries decision analysis (Rice and Richards 1996).

Though they provide valuable information, current quantitative methods used in the management of this resource do not assess the response of the red octopus population to fishing pressure, nor do they measure the productivity of this resource. This study constitutes a first step in taking a different quantitative approach for red octopus fishery management based on the same information available for the current management. In this analysis, a Bayesian approach is introduced to assess the potential medium-term consequences of different fishing scenarios under a constant harvest rate. The objective is to provide additional information for Mexican fisheries managers regarding the uncertainty, the productivity, and the response to fishing pressure of this resource. This kind of approach could help to assure a sustainable exploitation of the red octopus off the Yucatan Peninsula and of other Mexican marine resources.

MATERIAL AND METHODS

This analysis used fishery-dependent data of commercial landings of the Yucatán red octopus collected from 1995 to 2008 and an index of abundance independent of the fishery estimated by INP/INAPESCA from 2002 to 2008 (INP 2002, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008). Commercial landings data were acquired from the offices of the Mexican Ministry of Agriculture, Animal Husbandry, Rural Development, Fisheries and Food (SAGARPA) at Campeche and Yucatán. Modeling of the red octopus population dynamics off the Yucatán Peninsula was based on the Schaefer (1954) model:

$$B_{t+1} = B_t + rB_t \left(1 - \frac{B_t}{K}\right) - C_t \quad (1)$$

where B_t is the biomass in year t , r is the intrinsic population growth rate, K is the population carrying capacity, and C_t is the commercial catch in year t . The initial population in 1995 (B_0) was assumed to be a percentage of the carrying capacity. The Schaefer model is one of the simplest tools that can be used to characterize the status and productivity of a population (Punt and Hilborn 1996). Dynamic models have been applied primarily to species with a fairly low intrinsic growth rate (Punt and Hilborn 1996), as is the case of the red octopus. Model fitting was carried out assuming observation error on log-normal distributed annual biomass estimates (I_t^{obs}); therefore, for a given year t , the individual negative log-likelihood (LL) is given by (Hilborn and Mangel 1997):

$$LL = 1n(\sigma) + \frac{1n(I_t^{obs}) - 1n(I_t^{est})^2}{2\sigma^2} \quad (2)$$

The total negative log-likelihood is the sum of the n components (number of I_t^{obs} data available). The standard error (σ)

de implementación en la cuota propuesta. Este tipo de error tiene un papel importante en la dinámica de las especies porque refleja las implicaciones de la incapacidad de implementar plenamente las acciones de manejo (Punt y Hilborn 2001) y es reconocida como un componente importante en el análisis de decisión pesquero (Rice y Richards 1996).

A pesar de que proveen información valiosa, los métodos cuantitativos actualmente usados en el manejo de este recurso no valoran la respuesta de la población de pulpo rojo a la presión de pesca; tampoco miden la productividad de este recurso. Este análisis es un primer paso en el establecimiento de un método cuantitativo diferente para el manejo de la pesquería del pulpo rojo basado en la misma información disponible para el manejo actual. En este análisis, se usa un método Bayesiano para valorar las consecuencias potenciales de distintos escenarios de pesca bajo una tasa de explotación constante en el mediano plazo. En este trabajo se pretende proveer información adicional para las autoridades pesqueras mexicanas acerca de la incertidumbre, la productividad y la respuesta a la presión de pesca de este recurso. Este tipo de método podría asegurar una explotación sustentable del pulpo rojo en la península de Yucatán y otros recursos marinos mexicanos.

MATERIAL Y MÉTODOS

Se usaron datos de la pesquería comercial del pulpo rojo en Yucatán de 1995 a 2008 y un índice de abundancia estimado por personal del INP/INAPESCA de 2002 a 2008 (INP 2002, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, INAPESCA 2008). Los datos de los desembarcos comerciales se obtuvieron de las oficinas de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) en Campeche y Yucatán. La modelación de la dinámica poblacional del pulpo rojo en la península de Yucatán se realizó con el modelo de Schaefer (1954):

$$B_{t+1} = B_t + rB_t \left(1 - \frac{B_t}{K}\right) - C_t \quad (1)$$

donde B_t es la biomasa en el año t , r es la tasa intrínseca de crecimiento, K es la capacidad de carga poblacional y C_t es la captura comercial en el año t . Se supuso que la población inicial en 1995 (B_0) era un porcentaje de la capacidad de carga. El modelo de Schaefer es una de las herramientas más simples que pueden ser usadas para caracterizar el estado de salud y la productividad de una población (Punt y Hilborn 1996). Los modelos dinámicos han sido aplicados principalmente a las especies con una tasa intrínseca de crecimiento relativamente baja (Punt y Hilborn 1996), como es el caso del pulpo rojo. El ajuste del modelo se llevo a cabo suponiendo error de observación con distribución log-normal en las estimaciones anuales de la biomasa (I_t^{obs}); entonces, para un año

associated with each index of abundance estimate was not available (INP 2002–2007, INAPESCA 2008) and was therefore assumed constant to help reduce the number of estimated parameters from $n + 4$ to 5 and make the estimation process possible. Since the annual survey was conducted in the middle of the year, I^{est} was calculated as:

$$I_t^{est} = \hat{q} \frac{(\hat{B}_{t+1} + \hat{B}_t)}{2} \quad (3)$$

where \hat{q} is the estimated catchability coefficient and \hat{B} the estimated biomass.

The data were also fitted to a Pella-Tomlinson (1969) model and compared against the Schaefer model using the Akaike (1973) criterion:

$$AIC = -2 \ln(L_{max} + 2p) \quad (4)$$

where the first term represents the negative log-likelihood and p the number of parameters included in the model.

Bayesian goodness of fit was used (Hilborn and Mangel 1997). This approach provides a simple way of using additional information to build prior distribution for model parameters. In this statistical framework, the probability of the hypothesis given the data or posterior probability distribution $Pr\{H_i|data\}$ was estimated with the following equation:

$$Pr\{H_i|data\} = \frac{L\{data|H_i\}Prior\{H_i\}}{\sum_j L\{data|H_j\}Prior\{H_j\}} \quad (5)$$

where L is the likelihood of the data given the hypothesis and $Prior$ is the prior probability distribution of each hypothesis that summarizes all previous knowledge. Unfortunately there is only one previous study on the red octopus reporting a point estimate for the intrinsic growth rate (0.57) of the Schaefer model (Arreguín-Sánchez 2000). This value was used assuming a log-normal distribution for this parameter. Therefore, for the remaining parameters, uniform priors were built $(-\infty, \infty)$.

The posterior probability distribution of the following model parameters was estimated: carrying capacity, intrinsic growth rate, catchability coefficient, initial biomass (1995), and standard error of the annual biomass survey. Posterior probability distributions were also estimated for the indices of policy performance (current stock biomass in 2008 and depletion of the stock in 2008). Posterior probability distributions of parameters and indices of policy performance were estimated using Markov Chain Monte Carlo (MCMC) simulations. A total of 30 million runs were done using AD Model Builder (Fournier 1996) with a “burn-in” of 1000 parameter vectors. Every 500th sample was saved to test convergence

dado t , el logaritmo negativo de la verosimilitud (LL) es (Hilborn y Mangel 1997):

$$LL = 1n(\sigma) + \frac{1n(I_t^{obs}) - 1n(I_t^{est})^2}{2\sigma^2} \quad (2)$$

El logaritmo negativo total de la verosimilitud es la suma de los n componentes (número de los datos disponibles de I^{obs}), el error estándar (σ) asociado a cada estimado del índice de abundancia no estuvo disponible (INP 2002–2007, INAPESCA 2008); por consiguiente se supuso un valor constante para ayudar a reducir el número de parámetros estimados de $n + 4$ a 5 y hacer el proceso de estimación posible. Debido a que la evaluación anual de la biomasa se llevó a cabo a la mitad del año, I^{est} fue calculado como:

$$I_t^{est} = \hat{q} \frac{(\hat{B}_{t+1} + \hat{B}_t)}{2} \quad (3)$$

donde \hat{q} es el coeficiente de capturabilidad estimado y \hat{B} es la biomasa estimada. También se ajustó un modelo de Pella-Tomlinson (1969) y se comparó con el modelo de Schaefer usando el criterio de Akaike (1973):

$$AIC = -2 \ln(L_{max} + 2p) \quad (4)$$

donde el primer termino representa el logaritmo negativo de la verosimilitud y p el numero de parámetros incluidos en el modelo.

Se usó ajuste de bondad bayesiano (Hilborn y Mangel 1997). Este enfoque brinda una forma sencilla de incorporar información adicional para construir las distribuciones a priori de los parámetros del modelo. En este marco estadístico, la probabilidad de la hipótesis dados los datos o la distribución de probabilidad posterior $Pr\{H_i|data\}$ se estima con la siguiente ecuación:

$$Pr\{H_i|data\} = \frac{L\{data|H_i\}Prior\{H_i\}}{\sum_j L\{data|H_j\}Prior\{H_j\}} \quad (5)$$

donde L es la verosimilitud de los datos dado la hipótesis y $Prior$ es la distribución de probabilidad *a priori* para cada hipótesis que resume todo el conocimiento previo. Desafortunadamente sólo existe un estudio previo del pulpo rojo reportando una estimación puntual de la tasa intrínseca de crecimiento (0.57) del modelo de Schaefer (Arreguín-Sánchez 2000). Se usó este valor suponiendo una distribución log-normal para este parámetro. Por consiguiente, para los parámetros restantes se usó una *Prior* uniforme $(-\infty, \infty)$.

Se estimó la distribución de probabilidad posterior de los siguientes parámetros: la capacidad de carga, la tasa

by the Geweke (1992), Heidelberger and Welch (1983), and autocorrelation tests from CODA (Convergence Diagnosis and Output Analysis Software for Gibbs sampling outputs, version 4.0) for the statistical R package (R Foundation for Statistical Computing, ISBN 3-900051-07-0).

To assess the resource's response to different levels of exploitation, a decision analysis was performed. The Schaefer model was projected ten years considering two different management scenarios: in the first, a range of constant harvest rates varying from 30% to 60% by 5% intervals was used, and in the second, the same levels of exploitation were used but a normally distributed implementation error was added (1732.71 ± 3658.2 t), based on proposed quota data and the actual landings registered (fig. 1). The performance indices used to assess each management option were the probability of the population being less than 40% of the carrying capacity and the catch in 2018. The first indicator provides information on the stock's reproductive capacity and has been used in the management of other fishing resources (Simpfendorfer *et al.* 2000). The second indicator measures the fishery outputs. Although more indicators could be used, in this initial analysis, these two indicators can measure the basic expected performance of the red octopus fishery. Later analyses will incorporate additional indicators depending on the needs of the fishery and its management. Results were summarized in decision tables. These tables are a good way of presenting the decision analysis results to fisheries managers when few hypotheses are managed. In this case, only three hypotheses were assumed regarding biomass level (low, medium, and high) in the last year of the stock assessment. The probabilities assigned (first row in tables 2–5) to these three levels were taken from the posterior marginal distribution for the biomass in 2008 to calculate the expected value of the indicators chosen (tables 2–5).

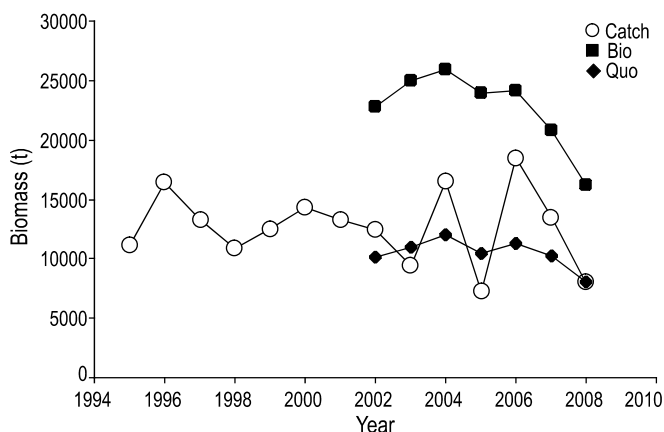


Figure 1. Temporal trend of the estimated (survey) red octopus biomass (Bio), catch and proposed quota (Quo) for the red octopus fishery in the Yucatán Peninsula.

Figure 1. Tendencia temporal de las estimaciones (evaluación) de biomasa (Bio), captura (Catch) y cuota propuesta (Quo) para la pesquería de pulpo rojo en la Península de Yucatán.

intrínseca de crecimiento, el coeficiente de capturabilidad, la biomasa inicial (1995) y el error estándar de la valoración de la biomasa anual. También se estimaron las distribuciones de probabilidad posterior de los indicadores de desempeño (la biomasa en 2008 y la reducción porcentual del stock en 2008). La distribución de probabilidad posterior de los parámetros y los indicadores de desempeño fueron estimados con simulaciones de las cadenas de Markov-Monte Carlo (MCMC). Se hicieron un total de 30 millones de simulaciones usando el software AD Model Builder (Fournier 1996) con un “quemado” inicial de 1000 vectores de parámetros. Se registraron los vectores de parámetros cada 500 simulaciones para probar la convergencia con las pruebas Geweke (Geweke 1992), Heidelberger y Welch (Heidelberger y Welch 1983) y la prueba de autocorrelación del paquete CODA (Convergence Diagnosis and Output Analysis Software for Gibbs sampling outputs version 4.0) para el paquete estadístico R (R Foundation for Statistical Computing, ISBN 3-900051-07-0).

Para valorar la respuesta del recurso a diferentes niveles de explotación, se llevó a cabo un análisis de decisión, el modelo de Schaefer fue proyectado 10 años considerando dos escenarios de manejo distintos. En el primer escenario, se usó un rango de tasas de explotación constante de 30% a 60% en intervalos de 5%. En el segundo escenario, se usaron los mismos niveles de explotación pero se agregó un error de implementación con distribución normal (1732.71 ± 3658.2 t), basado en datos de las cuotas propuestas y los desembarcos registrados (fig. 1). Los índices de desempeño para valorar cada opción de manejo fueron la probabilidad de ser menor al 40% de la capacidad de carga y la captura en 2018. El primer indicador provee información en la capacidad reproductiva del stock y ha sido usado en el manejo de otros recursos pesqueros (Simpfendorfer *et al.* 2000). El segundo indicador mide las salidas típicas de una pesquería. A pesar de que se pudieron usar más indicadores en este análisis, estos dos indicadores pueden medir el desempeño esperado de la pesquería del pulpo rojo. Análisis posteriores incorporaran indicadores adicionales dependiendo de las necesidades de la pesquería y su manejo. Los resultados se resumieron en las tablas de decisión.

Las tablas de decisión son un buen método para mostrar los resultados del análisis de decisión a las autoridades pesqueras cuando se manejan pocas hipótesis. En el presente caso, se supusieron sólo tres hipótesis sobre el nivel de biomasa (bajo, mediano, alto) en el último año de la valoración del stock. Las probabilidades asignadas (primer renglón de las tablas 2–5) a estos tres niveles fueron tomadas de la posterior marginal para la biomasa en 2008 para calcular la esperanza de los indicadores seleccionados (tablas 2–5).

RESULTADOS

El criterio de Akaike para el modelo de Schaefer fue -28.485 con cinco parámetros y un logaritmo negativo de la

RESULTS

The Akaike criterion for the Schaefer model was -28.485 with five parameters and a negative log-likelihood of -19.242 , and for the Pella-Tomlinson model it was -27.224 with six parameters and a negative log-likelihood of -19.612 . Results of the MCMC run indicated that the Schaefer model shows a good fit to the observed index of abundance data from 2002 to 2008 (fig. 2). The estimated carrying capacity for the Yucatán red octopus population was 104,213 t with a 95% probability interval (86,908, 137,837). The estimate of intrinsic growth rate was 0.63 with a 95% probability interval (0.53, 0.74). The estimate of the catchability coefficient was 1.01 with a 95% probability interval (0.87, 1.21). The estimate of the biomass standard deviation used in the objective function was 0.034 with a 95% probability interval (0.030, 0.040). Posterior distributions are shown in figures 3 and 4. There was only one high correlation between the catchability coefficient and the intrinsic growth rate (0.8892). The carrying capacity and the intrinsic growth rate were negatively correlated (-0.4365). The remaining correlation coefficients were small (table 1).

The estimated stock biomass decreased from 1995 to 2008 (fig. 5), with the most probable value (mode of the marginal posterior distribution) of biomass in 1995 of 24,992 t with a 95% probability interval (21,537, 31,462), which is equivalent to 23% of the carrying capacity with a 95% probability interval (0.19, 0.29). Results suggest that there was an important decrease in red octopus biomass during the last two years (19,191 and 16,160 t). The MCMC results confirm the depletion level of the biomass in 2008, suggesting that there was an estimated biomass equivalent to 14% of the population carrying capacity with 95% probability interval (0.11, 0.17), and the cumulative posterior distribution suggested that there was a probability of 0.6 of the depletion being less or equal to 15% of the carrying capacity.

Regarding the convergence tests, the p values of the Z score in the Geweke convergence diagnostic were all greater than 0.05, indicating no evidence against convergence. The Heidelberg and Welch halfwidth and stationary tests

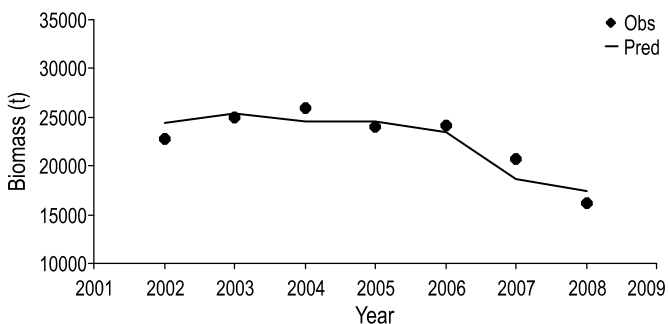


Figure 2. Schaefer model MCMC fit for the Yucatán red octopus observed biomass data.

Figura 2. Ajuste MCMC del modelo de Schaefer para lo datos observados de biomasa del pulpo rojo de Yucatán.

verosimilitud de -19.242 . Para el modelo de Pella-Tomlinson el criterio de Akaike fue de -27.224 con seis parámetros y un logaritmo negativo de la verosimilitud de -19.612 . Los resultados de las corridas MCMC mostraron que el modelo de Schaefer se ajustó bien a los datos observados del índice de abundancia de 2002 a 2008 (fig. 2). La capacidad de carga estimada para la población del pulpo rojo en Yucatán fue de 104,213 t con un intervalo de 95% de probabilidad de (86,908, 137,837). La estimación de r fue 0.63 con un intervalo de 95% de probabilidad de (0.53, 0.74). La estimación del coeficiente de capturabilidad fue 1.01 con un intervalo de 95% de probabilidad de (0.87, 1.21). La estimación del error estándar de la biomasa usado en la función objetivo fue 0.034 con un intervalo de 95% de probabilidad de (0.030, 0.040). Las distribuciones de probabilidad posteriores se muestran enseguida (figs. 3, 4). Se encontró una sola correlación alta entre el coeficiente de capturabilidad y la tasa intrínseca de crecimiento (0.8892). La capacidad de carga y la tasa intrínseca de crecimiento estuvieron negativamente correlacionados (-0.4365). Los coeficientes de correlación restantes fueron muy pequeños (tabla 1).

La biomasa estimada del stock disminuyó de 1995 a 2008 (fig. 5), con el valor más probable (moda de la distribución posterior marginal) de la biomasa en 1995 de 24,992 t con un intervalo de 95% de probabilidad (21,537, 31,462), que es equivalente al 23% de la capacidad de carga con un intervalo de probabilidad de (0.19, 0.29). Los resultados sugieren que hubo una disminución importante de la biomasa del pulpo

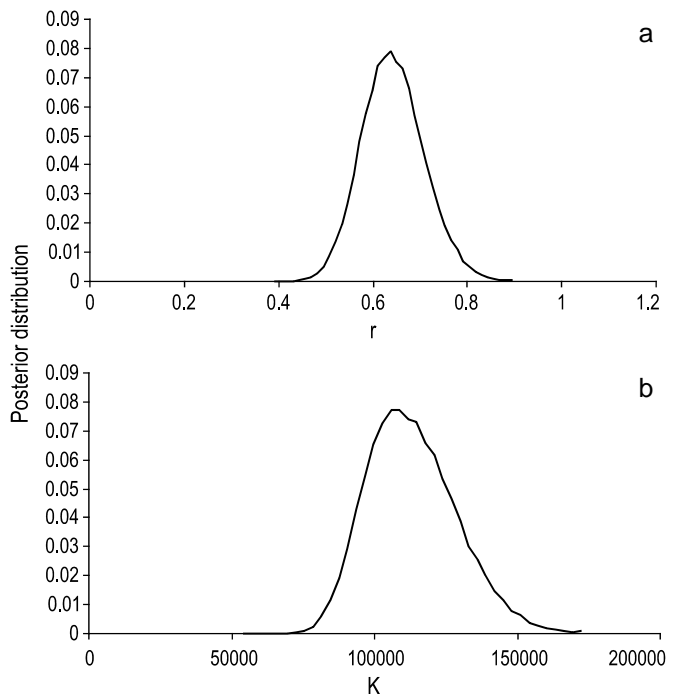


Figure 3. Posterior distributions for the Schaefer model parameters: (a) intrinsic growth rate and (b) carrying capacity.

Figura 3. Distribuciones posteriores para los parámetros del modelo de Schaefer: (a) tasa de crecimiento intrínseca y (b) capacidad de carga.

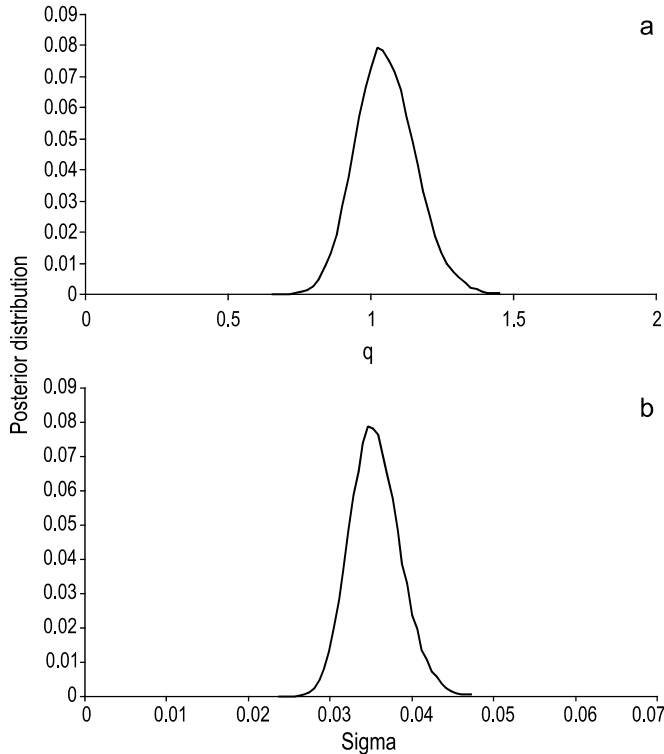


Figure 4. Posterior distributions for the Schaefer model parameters, (a) catchability coefficient and (b) biomass standard deviation.

Figura 4. Distribuciones posteriores para los parámetros del modelo de Schaefer: (a) coeficiente de capturabilidad y (b) desviación estándar de la biomasa.

indicated that all parameters had passed both tests. In general, results from these tests suggest that the number of iterations (30,000,000) for the MCMC sampler was sufficient for convergence.

Regarding the MCMC projections of the future red octopus population, the most probable 2008 and 2018 biomass trajectories for the different levels of harvest rate under two scenarios are shown in figure 6(a, b). When the implementation error was not included, most of the constant harvest rate levels allowed the population to grow, except the 55% and 60% levels that caused the population to decrease relative to the biomass level registered in 2008. The most probable biomass in 2018 for the 55% harvest rate was 15,814 t, while the biomass associated with the 60% harvest rate was 11,308 t. The 30% harvest rate produced a probable biomass of 50,249 t equivalent to 48% of the carrying capacity. When the implementation error was included, the 50%, 55%, and 60% harvest rate levels produced a decreasing red octopus biomass. The most probable biomass in 2018 for the 50%, 55%, and 60% harvest rates were 9680, 7177, and 4954 t, respectively. The 45% harvest rate kept the biomass (17,779 t) slightly larger than the biomass level in 2008. The remaining exploitation levels caused the biomass to increase, with the largest increase corresponding to the 30% harvest

Table 1. Parameter correlations of the Schaefer model set up for the red octopus in the Yucatán Peninsula.

Tabla 1. Correlaciones de los parámetros del modelo de Schaefer para el pulpo rojo de la Península de Yucatán.

	Sigma	q	r	K
Sigma	1			
q	-0.1426	1		
r	-0.0985	0.8892	1	
K	-0.073	-0.0166	-0.4365	1

rojo en los últimos dos años (19,191 y 16,160 t). Los resultados de las simulaciones MCMC confirman el nivel de reducción de la biomasa en 2008, sugiriendo que la biomasa estimada es equivalente al 14% de la capacidad de carga con un intervalo de 95% de probabilidad de (0.11, 0.17) y la distribución posterior acumulativa sugirió que hay una probabilidad de 0.6 de que la reducción sea menor o igual al 15% de la capacidad de carga.

Respecto a las pruebas de convergencia, los valores *p* de la puntuación de la Z en el diagnóstico de convergencia de Geweke fueron mayores que 0.05 indicando que no existe evidencia contra la convergencia. Las pruebas estacionaria y de medio ancho de banda de Heidelberger y Welch indicaron que todos los parámetros pasaron ambas pruebas. En general los resultados de estas pruebas sugieren que el número de iteraciones (30,000,000) en las simulaciones MCMC fueron suficientes para la convergencia.

En cuanto a las proyecciones MCMC para la futura población del pulpo rojo, las trayectorias más probables de la biomasa de 2008 a 2018 para los distintos niveles de tasa de explotación constante se muestran enseguida la figura 6(a, b). Como se observa, cuando el error de implementación no fue incluido, la mayoría de las tasas de explotación constantes permitieron que la población creciera, excepto los niveles de

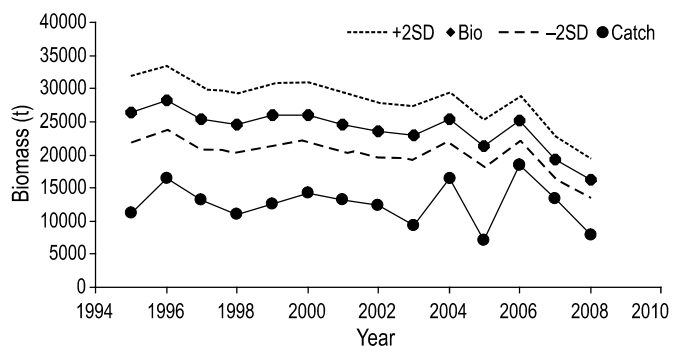


Figure 5. Time series of the red octopus biomass estimates with their 95% probability interval (dotted lines) in the Yucatán peninsula from 1995 to 2008 and landings registered in the same period of time.

Figura 5. Serie de tiempo de las estimaciones de biomasa de pulpo rojo con su intervalo del 95% de probabilidad (líneas punteadas) en la Península de Yucatán de 1995 a 2008, y desembarques registrados en el mismo periodo de tiempo.

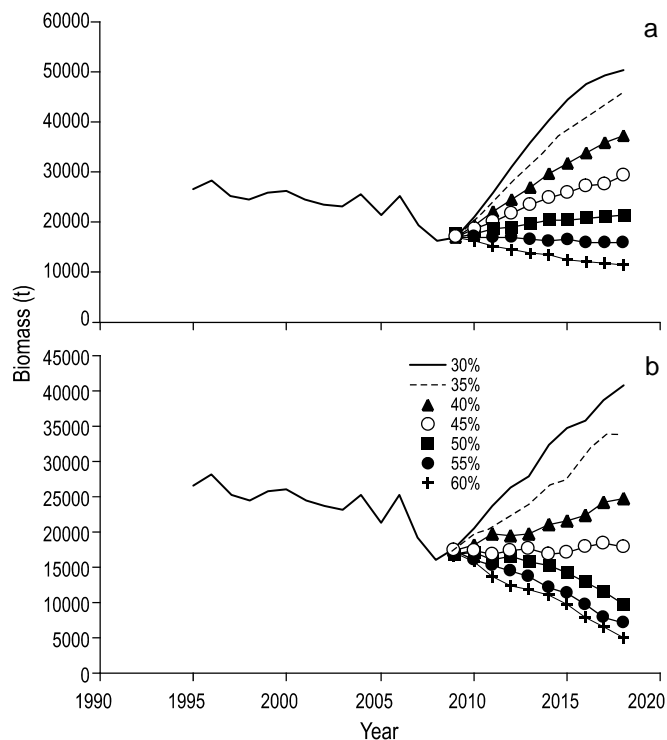


Figure 6. MCMC model projections for the red sea octopus biomass under two scenarios of constant harvest rates, (a) no implementation error, (b) implementation error.

Figura 6. Proyecciones del modelo MCMC para la biomasa del pulpo rojo en dos escenarios de tasas constantes de extracción, (a) sin error de implementación y (b) con error de implementación.

rate level. It is important to indicate, however, that the biomass level (32% of the carrying capacity) reached in 2018 in this scenario with positive implementation error was smaller than the biomass estimated with the same harvest rate when no implementation error was included.

As mentioned, the decision analysis included two different scenarios using the same constant harvest rate values, and considered the uncertainty of the biomass estimate in the last year (tables 2–5) and the parameter uncertainty. In the first scenario, when no implementation error was included, simulation results suggested that the 30% harvest rate produced the smaller expected probability (0.11) of the red octopus biomass in 2018 being less than 40% of the carrying capacity. The next level of exploitation (35%) produced an expected probability of 0.53 of the red octopus biomass being less than 40% of the carrying capacity. The remaining levels of exploitation increased this probability considerably (table 2). In this scenario, the exploitation rate with the highest expected catch achieved in 2018 corresponded to the 30% harvest rate (16,168 t). The following harvest rate (35%) produced an expected catch in 2018 of 16,044 t. A declining trend in the expected catch can be observed for the remaining harvest rates, with the smallest expected catch (7358 t) corresponding to the 60% harvest rate (table 3). It is important to mention that this catch is slightly smaller than the catch registered in 2008.

55% y 60% que provocaron que la población disminuyera con respecto al nivel de la biomasa registrado en 2008. El valor más probable en 2018 para la tasa de explotación de 55% fue 15,814 t mientras que la biomasa correspondiente a la tasa de explotación de 60% fue de 11,308 t. Asimismo, la tasa de explotación de 30% produjo una biomasa probable de 50,249 t, equivalente al 48% de la capacidad de carga. Cuando el error de implementación se incluyó, las tasas de explotación de 50%, 55% y 60% provocaron una disminución de la biomasa del pulpo rojo. La biomasa más probable en 2018 para las tasas de explotación de 50%, 55% y 60% fueron 9870, 7177 y 4954 t, respectivamente. La tasa de explotación de 45% mantuvo a la biomasa (17,779) ligeramente mayor que el nivel de la biomasa en 2008. Los niveles de explotación restantes permitieron que la biomasa aumentara de tal forma que el mayor incremento correspondió a la tasa de explotación de 30%. Sin embargo, es importante señalar que el nivel de la biomasa (32% de la capacidad de carga) alcanzado en 2018 en este escenario con el error de implementación fue menor que la biomasa estimada con la misma tasa de explotación cuando no se incluyó el mencionado error.

El análisis de decisión incluyó dos escenarios diferentes usando los mismos valores de tasa de explotación y tomó en cuenta la incertidumbre de la estimación de la biomasa en el último año (tablas 2–5) y la incertidumbre de los parámetros. En el primer escenario, cuando no se incluyó el error de implementación, los resultados de la simulación sugirieron que la tasa de explotación de 30% produjo la menor esperanza (0.11) de la probabilidad de que la biomasa del pulpo rojo fuera menor al 40% de la capacidad de carga. El siguiente nivel de explotación (35%) produjo una esperanza de 0.53 de la probabilidad que la biomasa del pulpo rojo fuera menor del 40% de la capacidad de carga. Los niveles restantes de tasa de explotación incrementaron la esperanza de esta probabilidad considerablemente (tabla 2). En este escenario, la tasa de explotación con la esperanza más alta para la captura en 2018 correspondió a la tasa de explotación de 30% (16,168 t). La siguiente tasa de explotación (35%) produjo una esperanza para la captura en 2018 de 16,044 t. Una tendencia decreciente en la esperanza de la captura puede ser observada para las siguientes tasas de explotación, con la esperanza más pequeña correspondiendo a la tasa de explotación de 60% (tabla 3). Es importante señalar que esta captura es ligeramente menor que la captura registrada en 2008.

En el segundo escenario se incluyó un error de implementación. En general, los resultados de estas simulaciones son menos optimistas. Al contrario del primer escenario, aun la tasa de explotación más baja produjo una esperanza mayor de 0.5 de que la población sea menor que el 40% de la capacidad de carga (tabla 4). La tasa de explotación de 50% incremento la esperanza de la probabilidad de que la biomasa sea menor a 40% de la capacidad de carga a 0.82. Con respecto a la esperanza de la captura en 2018, una vez más, la captura más grande correspondió a la tasa de explotación de 30% con

Table 2. Decision analysis for the red octopus fishery in Yucatán Peninsula estimated with a constant harvest rate strategy and no implementation error. The probability of the biomass being less than 40% of the carrying capacity in 2018 was used as index of policy performance. The probabilities of three levels of biomass in 2008 are shown, low biomass from 9,800 t to 15,700 t (.25), medium biomass from 15,700 t to 18,300 t (0.50) and high biomass 18,300 t to 31,700 t (0.25).

Tabla 2. Análisis de decisión para la pesquería de pulpo rojo en la Península de Yucatán estimado con una estrategia de tasa de extracción constante y sin error de implementación. Se utilizó como índice de desempeño de la política la probabilidad de que la biomasa resulte menor al 40% de la capacidad de carga en 2018. Se muestran las probabilidades de tres niveles de biomasa en 2008: bajo, de 9,800 t a 15,700 t (.25); medio, de 15,700 t a 18,300 t (0.50); y alto, de 18,300 t a 31,700 t (0.25).

	Low	Medium	High	Expected
H rate	0.250000	0.500000	0.250000	
30%	0.001518	0.051468	0.336733	0.110
35%	0.120520	0.532991	0.911904	0.525
40%	0.600817	0.940543	0.998640	0.870
45%	0.933443	0.998628	1.000000	0.983
50%	0.995959	0.999967	1.000000	0.999
55%	0.999686	1.000000	1.000000	1.000
60%	1.000000	1.000000	1.000000	1.000

In the second scenario, an implementation error was included. In general, the results from these simulations are less optimistic. Contrary to the first scenario, even the lowest harvest rate produced an expected probability greater than 0.50 of the population being smaller than 40% of the red octopus carrying capacity (table 4). The 50% harvest rate level increased the expected probability of the biomass being less than 40% to 0.82. Regarding the expected catch in 2018, once again, the highest catch (12,058 t) corresponded to the 30% harvest rate. Note that the levels of exploitation greater than 40% harvest rate produced expected catches of less than 10,000 t.

The probability of the population being less than 50% of the carrying capacity was also implemented in both scenarios, with and without implementation error, and with the same levels of exploitation. All expected probabilities for both scenarios were greater than 0.55; in fact, except for the constant harvest rate of 30% without implementation error, the remaining expected probabilities were greater or equal to 0.7, and in most cases greater than 0.8. This criterion suggests that overfishing of the population ($B_{current} < B_{MSY}$) would still likely continue with the implementation of the simulated harvest rates.

DISCUSSION

The red octopus fishery is of great economic importance in the Yucatán region. It is the third most important

Table 3. Decision analysis for the red octopus fishery in Yucatán Peninsula estimated with a constant harvest rate strategy and no implementation error. The catch in 2018 was used as index of policy performance. The probabilities of three levels of biomass in 2008 are shown, low biomass from 9,800 t to 15,700 t (.25), medium biomass from 15,700 t to 18,300 t (0.50) and high biomass 18,300 t to 31,700 t (0.25).

Tabla 3. Análisis de decisión para la pesquería de pulpo rojo en la Península de Yucatán estimado con una estrategia de tasa de extracción constante y sin error de implementación. Se utilizó como índice de desempeño de la política la captura en 2018. Se muestran las probabilidades de tres niveles de biomasa en 2008: bajo, de 9,800 t a 15,700 t (.25); medio, de 15,700 t a 18,300 t (0.50); y alto, de 18,300 t a 31,700 t (0.25).

	Low	Medium	High	Expected
H rate	0.250	0.500	0.250	
30%	17348.800	16214.540	14895.900	16168
35%	17879.520	16053.110	14190.450	16044
40%	17249.680	14824.150	12597.110	14874
45%	15841.950	13132.860	10747.410	13214
50%	13950.340	11187.440	8824.098	11287
55%	11952.730	9147.179	6901.925	9287
60%	9829.454	7200.819	5202.814	7358

12,058 t. Es importante señalar que los niveles de explotación mayores que la tasa de explotación de 40% produjeron que la esperanza de la captura fuera menor a 10,000 t.

También se usó la probabilidad de que la población fuera menor que 50% de la capacidad de carga con ambos escenarios, con y sin error de implementación, y los mismos niveles de explotación. Todas las esperanzas de las probabilidades de que la biomasa fuera menor que el 50% de K para ambos escenarios fueron mayores que 0.55; de hecho, excepto por la tasa constante de 30% sin error de implementación, las esperanzas de las probabilidades restantes fueron mayores o iguales a 0.7, con la mayoría de los casos mayores a 0.8. Este criterio sugiere que la implementación de las tasas de explotación simuladas mantendría probablemente a la población en sobrepesca ($B_{current} < B_{MSY}$).

DISCUSIÓN

La pesquería del pulpo rojo tiene una gran importancia económica en la región de Yucatán; esta pesquería es la tercera comercial más importante en el país de acuerdo al valor monetario de su captura, sólo debajo de las pesquerías de atún y camarón (*Diario Oficial de la Federación* 25/08/2006), generando empleos directos e indirectos y siendo también una fuente importante de captación de divisas extranjeras; por consiguiente es importante asegurar la sustentabilidad de este recurso. Actualmente existen algunas regulaciones para el manejo de esta pesquería. Sin embargo, estas regulaciones podrían ser insuficientes para garantizar un manejo óptimo de este recurso y maximizar las capturas

Table 4. Decision analysis for the red octopus fishery in Yucatán Peninsula estimated with a constant harvest rate strategy and implementation error. The probability of the biomass being less than 40% of the carrying capacity in 2018 was used as index of policy performance. The probabilities of three levels of biomass in 2008 are shown, low biomass from 9,800 t to 15,700 t (.25), medium biomass from 15,700 t to 18,300 t (0.50) and high biomass 18,300 t to 31,700 t (0.25).

Tabla 4. Análisis de decisión para la pesquería de pulpo rojo en la Península de Yucatán estimado con una estrategia de tasa de extracción constante y error de implementación. Se utilizó como índice de desempeño de la política la probabilidad de que la biomasa resulte menor al 40% de la capacidad de carga en 2018. Se muestran las probabilidades de tres niveles de biomasa en 2008: bajo, de 9,800 t a 15,700 t (.25); medio, de 15,700 t a 18,300 t (0.50); y alto, de 18,300 t a 31,700 t (0.25).

	Low	Medium	High	Expected
H rate	0.250000	0.500000	0.250000	
30%	0.209744	0.551662	0.705754	0.505
35%	0.246915	0.791338	0.902982	0.683
40%	0.259588	0.896696	0.952511	0.751
45%	0.331996	0.979595	0.965454	0.814
50%	0.354667	0.985362	0.955644	0.820
55%	0.363266	0.988213	0.982533	0.831
60%	0.345668	0.988463	1.000000	0.828

commercial fishery in Mexico according to its catch value, only below the tuna and shrimp fisheries (*Diario Oficial de la Federación* 25/08/2006), generating direct and indirect jobs, as well as being an important source of foreign currency. It is therefore important to assure the sustainability of this resource. Some management tools are currently available for this fishery, but they may not be enough to guarantee the optimal management of the resource and maximize the sustainable catches between 10,000 and 12,000 annual tons as established by Mexican fishery managers (INP 2000); however, the results show that by only reducing the exploitation rate to 30% these catch levels could be achieved in a period of approximately six years.

This fishery is characterized by the quantitative approaches used for its management. Efforts have focused on establishing an annual quota based on an annual biomass survey (INP 2006). Although the survey carried out by INP provides useful information, no effort has been made to develop a statistical framework able to measure the potential consequences of the current fishing levels on the red octopus population. The quota system established for this fishery apparently increased the catch variability because managers were unable to close the fishery once the quota was reached.

Regarding the uncertainty of the model, the Akaike criterion suggested that the Schaefer model better described the red octopus population dynamics than the Pella-Tomlinson model; therefore, all analyses were done using the Schaefer model. The present study shows the potential flexibility of

Table 5. Decision analysis for the red octopus fishery in Yucatán Peninsula estimated with a constant harvest rate strategy and implementation error. The catch in 2018 was used as index of policy performance. The probabilities of three levels of biomass in 2008 are shown, low biomass from 9,800 t to 15,700 t (.25), medium biomass from 15,700 t to 18,300 t (0.50) and high biomass 18,300 t to 31,700 t (0.25).

Tabla 5. Análisis de decisión para la pesquería de pulpo rojo en la Península de Yucatán estimado con una estrategia de tasa de extracción constante y error de implementación. Se utilizó como índice de desempeño de la política la captura en 2018. Se muestran las probabilidades de tres niveles de biomasa en 2008: bajo, de 9,800 t a 15,700 t (.25); medio, de 15,700 t a 18,300 t (0.50); y alto, de 18,300 t a 31,700 t (0.25).

	Low	Medium	High	Expected
H rate	0.250	0.500	0.250	
30%	5220.000	14752.080	13508.980	12058
35%	5427.488	13808.050	12399.620	11361
40%	6463.391	12410.360	10366.730	10413
45%	5653.100	10629.130	9666.348	9144
50%	5750.000	8866.233	8197.222	7920
55%	5704.906	7802.029	7028.911	7084
60%	5841.031	6955.331	6013.628	6441

sostenibles entre 10,000 y 12,000 t anuales como se estableció por parte de las autoridades pesqueras mexicanas (INP 2000). De hecho los resultados muestran que sólo reduciendo la tasa de explotación a 30%, estos niveles de captura serán alcanzados en un periodo de seis años aproximadamente.

Esta pesquería se caracteriza por los métodos cuantitativos usados en su manejo. Los esfuerzos se enfocaron en establecer una cuota anual basada en la valoración anual de la biomasa (INP 2006). A pesar de que la valoración de biomasa llevada a cabo por el INP/INAPESCA provee información útil, ningún esfuerzo se realizó para el desarrollo de un marco estadístico capaz de medir las consecuencias potenciales de los niveles actuales de la pesca del pulpo rojo. El establecimiento del sistema de cuotas en esta pesquería aparentemente incrementó la variabilidad de la captura debido a que las autoridades pesqueras no fueron capaces de cerrar la pesquería una vez que se alcanzó la cuota recomendada.

Respecto a la incertidumbre del modelo, el criterio de Akaike sugirió que el modelo de Schaefer es mejor para describir la dinámica poblacional del pulpo rojo que el modelo de Pella-Tomlinson. Por consiguiente todos los análisis fueron hechos con el modelo de Schaefer. El presente trabajo muestra la flexibilidad potencial de los modelos de producción excedente cuando son usados en un marco Bayesiano que permite usarlos en análisis de riesgo y/o análisis de decisión para producir recomendaciones para el manejo que van más allá del indicador de desempeño tradicional de rendimiento máximo sostenible (MSY) y el esfuerzo correspondiente cuando se supone el equilibrio (Haddon 2001). Se han

the surplus production models when applied in a Bayesian framework that allows using them in risk and/or decision analyses to produce management advice that goes well beyond the old traditional performance indicator of maximum sustainable yield (MSY) and the corresponding effort assuming equilibrium (Haddon 2001). Advantage has been taken of these methods and available information to estimate important population parameters and their uncertainty and assess the potential consequences of fishing. Results suggest that the current level of exploitation might be unsustainable.

In particular, the use of an independent index of abundance has important consequences. The use of catch per unit of effort (CPUE) data as index of abundance could bring potential problems, because in some cases the CPUE remains high until the stock is badly depleted, due to fish schooling (Hilborn and Mangel 1997). Moreover, as fishermen tend to direct their fishing effort to the highest densities of fish populations, attempts to estimate fish abundance from commercial catch and effort data can be expected to be biased. Management agencies try to avoid the biases of commercial catch data by using research surveys that can use a planned sampling design and controlled gear conditions (Hilborn and Walters 1992).

Most of the parameters estimated in this study were uncorrelated, contrary to that observed for the Baja California red sea urchin fishery (Jurado-Molina *et al.* 2009), where the high correlation between parameters might be due to the CPUE data used in the model fitting. A strong correlation is a problem that occurs in many fishery statistics. When two parameters are correlated we cannot readily distinguish between different combinations of the two parameters and it is impossible to determine which “independent” variable or model parameter is most closely related to changes in the so-called dependent variable, such as the biomass of the species. The effects of correlated independent variables are said to be confounded (Haddon 2001). It is therefore important to maintain the biomass survey program for the red octopus and establish new programs for suitable species, such as the red sea urchin in Baja California, to avoid biases in the estimation of the stock.

The estimated current level of red octopus biomass (14% of K) provides a formal criterion to classify the status of the population. This biomass level suggests that the population could be depleted instead of exploited at the maximum sustainable level as previously suggested (INP 2006). It is important to mention that 20% of virgin biomass is not considered a conservative level, but represents an inferior limit where low levels of recruitment could be observed (Beddington and Cooke 1983). This statement is reinforced by the latest biomass estimates (INP 2007, 2008) and the reduced catch registered in 2007 and 2008. As the results suggest that the red octopus population is already depleted, it might be necessary to develop a rebuilding plan to avoid closing the fishery in the medium term.

aprovechado estos métodos para llevar a cabo la estimación de parámetros poblacionales y su incertidumbre y para valorar las consecuencias de la pesca tomando toda la ventaja de la información disponible. Los resultados sugieren que el nivel de explotación actual podría ser no sustentable.

En particular, el uso de un índice de abundancia independiente de la pesquería tiene consecuencias importantes. Usar los datos de CPUE como un índice de abundancia puede potencialmente traer problemas porque en algunos casos la CPUE permanece alta hasta que el stock ha disminuido drásticamente, esto sucede debido a la formación de bancos (Hilborn y Mangel 1997). Adicionalmente, los pescadores tienden a dirigir el esfuerzo pesquero a las zonas con altas densidades de población, por lo tanto se puede esperar que los intentos para estimar la abundancia de organismos a partir de datos comerciales de captura y esfuerzo estén sesgados. Las autoridades pesqueras han intentado evadir los sesgos de los datos de captura comercial usando campañas de valoración que pueden usar diseño experimental y de muestreo y condiciones controladas para los artes de pesca (Hilborn y Walters 1992).

En particular, en los resultados la mayoría de los parámetros estimados no estaban correlacionados, opuesto a los resultados de la pesquería del erizo rojo en Baja California (Jurado-Molina *et al.* 2009), donde la alta correlación entre los parámetros podría deberse a los datos de CPUE usados en el ajuste del modelo. Las correlaciones altas son un problema que ocurre en muchas estadísticas pesqueras. Cuando dos parámetros están correlacionados, no se puede distinguir entre las diferentes combinaciones de los dos parámetros y es imposible determinar cuál de las variables “independientes” o parámetros del modelo está más cercanamente relacionado a los cambios en las llamadas variables dependientes, tales como la biomasa de la especie. Los efectos de las variables independientes correlacionadas se dice que están confundidos estadísticamente (Haddon 2001). Por consiguiente es importante mantener el programa de campañas de valoración de biomasa para el pulpo rojo y establecer nuevos programas para las especies adecuadas como el erizo rojo en Baja California para evitar sesgos en la estimación del stock.

El nivel de biomasa actual estimado (14% de K) provee un criterio formal para clasificar el estado de salud de la población del pulpo rojo. Este nivel de biomasa sugiere que la población pudiera estar sobre explotada en lugar de explotada al nivel máximo sustentable como se sugirió previamente (INP 2006). Es importante mencionar que 20% de la biomasa virgen es un nivel que no se considera conservador, sino que representa un límite inferior donde niveles bajos de reclutamiento pueden ser observados (Beddington y Cooke 1983). Este hecho es reforzado por las últimas estimaciones de biomasa llevadas a cabo por el INP/INAPESCA (2007, 2008) y la captura decreciente registrada en 2007 y 2008. Debido a que los resultados sugieren que la población del pulpo rojo está reducida a niveles muy bajos, sería necesario

In general, policy options with the highest yields also have the highest risks of stock depletion, so fishery managers must choose a policy that has the highest expected benefits but also acceptably low risks (McAllister and Kirkwood 1998). Decision analysis is an ideal tool to achieve this goal. The inclusion of the implementation error provides a more realistic scenario and it is a more conservative option; hence, using this type of data, when available, in the decision making process is recommended.

Results from the implementation error scenario suggest that the 30% constant harvest rate is the policy that potentially has the highest benefits and acceptable low risks, and might be the best option to rebuild the red octopus population; however, some economical considerations must be taken into account since opposition to this strategy could arise due to the decrease in the annual quota. It is also necessary to assess the impact of this strategy regarding the loss of income and jobs. It is important to point out that when the implementation error was included in the simulations of the four higher harvest rate levels, the 1995 biomass levels were not attained. Implementation of the 40% harvest rate level for a period of ten years kept the red octopus biomass around the same level as in 1995. None of the simulated constant harvest rates was able to recover the biomass close to 50% of the carrying capacity in a period of ten years. Finally, the data suggest that the implementation error could be reduced when the biomass decreases because the scarcity of the resource would make it more difficult to reach the quota, requiring more fishing effort; however, it is difficult to verify this fact. Future data should provide more information in this respect.

The approach taken in this study constitutes a first step in using Bayesian methods to provide additional information for the decision making process that could assure a sustainable exploitation of the red octopus. Since only observation and implementation uncertainties were considered, the uncertainty could be underestimated. Further improvements may be attained when other types of uncertainty are explored, such as model uncertainty. In particular, analyses could be made including the Pella-Tomlinson (1969) model, a model with lagged recruitment, survival, and growth (Hilborn and Mangel 1997), or a full Deriso (1980) delay-difference model. Unlike the Schaefer model, these models are able to include alternative life history characteristics. Creating an ecosystem-based management scheme would require the exploration of indirect effects of fishing due to trophic interactions. Some efforts (Arreguín-Sánchez 2000) have been made to simulate changes in octopus vulnerability due to predation by the red grouper (*Epinephelus morio*) under three fishing mortality scenarios: one including a low constant fishing mortality, another including gradual increments of fishing mortality, and a third mimicking the fishing levels in 2000. Results of this analysis suggest that even when the fishing mortality intensity appears to produce a larger impact on the red octopus biomass, vulnerability has an important role when it is reduced and when the stock is submitted to

desarrollar un plan de reconstrucción para evitar el cierre de la pesquería en el mediano plazo.

En general, las opciones de manejo con los rendimientos más altos también tienen los riesgos más altos de reducción del stock; por consiguiente, las autoridades pesqueras deben escoger una estrategia pesquera que tenga los más altos beneficios pero también riesgos bajos aceptables (McAllister y Kirkwood 1998). El análisis de decisión es una herramienta ideal para alcanzar este objetivo. La inclusión del error de implementación provee un escenario más realista y es una opción más conservadora, por consiguiente se recomienda usar este tipo de datos en el proceso de toma de decisiones cuando estén disponibles.

Los resultados del escenario con error de implementación sugiere que la tasa de explotación constante del 30% es la estrategia que potencialmente tendría los beneficios más altos y niveles de riesgo aceptables y podría ser la mejor opción para reconstruir la población de pulpo rojo; sin embargo, se deben de tomar en cuenta algunas consideraciones de tipo económico porque puede surgir una oposición a esta medida debido a la disminución de la cuota anual. También es necesario valorar el impacto de esta estrategia en cuanto a la pérdida de empleos e ingreso. Es importante señalar que cuando se incluyó el error de implementación en las simulaciones de los cuatro niveles más altos de la tasa de explotación, no se logró alcanzar el nivel de biomasa que se tenía en 1995. La implementación de ninguna de las tasas de explotación permitió alcanzar el nivel de 50% de la capacidad de carga en diez años. Finalmente, los datos sugieren que el error de implementación se podría reducir cuando la biomasa disminuye porque es más difícil alcanzar la cuota debido a la escasez del recurso, requiriéndose más esfuerzo pesquero. Sin embargo es difícil verificar este hecho. Datos nuevos en los futuros años proveerán más información en este respecto.

El enfoque tomado en este trabajo es un primer paso en el uso de métodos Bayesianos para proveer información adicional para el proceso de toma de decisiones que pudiera asegurar una explotación sustentable del pulpo rojo. Sólo se tomaron en cuenta los errores de implementación y observación en el presente trabajo; por consiguiente, la incertidumbre podría estar subestimada. Algunas mejoras podrían ser alcanzadas cuando se exploren otros tipos de incertidumbre, como la incertidumbre del modelo. En particular se podría hacer un análisis incluyendo el modelo de Pella-Tomlinson (1969), un modelo con reclutamiento desfasado, supervivencia y crecimiento (Hilborn y Mangel 1997) o un modelo de diferencia-desfasamiento (Deriso 1980). En contraste con el modelo de Schaefer, estos modelos son capaces de incluir características alternas de historia de vida. Crear un manejo basado en el ecosistema requeriría la exploración de los efectos indirectos de la pesca debido a interacciones tróficas. Algún esfuerzo (Arreguín-Sánchez 2000) se ha llevado a cabo para simular los cambios en la vulnerabilidad por depredación del mero (*Epinephelus morio*) bajo tres escenarios de mortalidad por pesca, incluyendo una mortalidad por pesca

very high levels of exploitation. Further analysis must be carried out to explore the trophic interactions between the red grouper and the red octopus in a statistical Bayesian framework using a multispecies statistical model (Jurado-Molina *et al.* 2005).

As mentioned, the results presented here suggest that the red octopus might be overexploited. Keeping the current levels of exploitation would be a mistake and could result in the closure of the fishery with the corresponding loss of income and jobs. The development of a rebuilding plan for this fishery requires the establishment of clear short-, medium-, and long-term objectives, as well as clear strategies and tools for the management of this resource. The plan has to involve all sectors: research institutes and universities, federal and state fisheries authorities, and fishermen. The adoption of strategies and management tools has to occur by consensus, assuring that all measures will be adopted by all the sectors involved. Due to the availability of data, the management of the red octopus offers a great opportunity of establishing a formal quantitative approach based on Bayesian methodology that takes advantage of all available data to assure the sustainable exploitation of the fishing resources in Mexico.

REFERENCES

- Akaike M. 1973. Information theory and an extension of the maximum likelihood principle. In: Petrov B, Csaki F (eds.), Proc. 2nd International Symposium of Information Theory. Akademia Kiado, Budapest, pp. 267–281.
- Arreguín-Sánchez F. 2000. Octopus-red grouper interaction in the exploited ecosystem of the northern continental shelf of the Yucatan, Mexico. *Ecol. Model.* 129: 119–129.
- Arreguín-Sánchez F, Solís-Ramírez MJ, González de la Rosa ME. 2000. Population dynamics and stock assessment for the *Octopus maya* (Cephalopoda: Octopodidae) fishery in Campeche Bank, Gulf of Mexico. *Rev. Biol. Trop.* 48 (2–3): 323–331.
- Beddington JR, Cooke JG. 1983. The potential yield of fish stocks. *FAO Fish. Tech. Pap.* 242, 47 pp.
- Deriso RB. 1980. Harvesting strategies and parameter estimation for an age-structured model. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 37: 268–282.
- Fournier D. 1996. An introduction to AD MODEL BUILDER for use in nonlinear modeling and statistics. Otter Research Ltd., Canada.
- Fuentes D, Solís-Ramírez MJ, De la Garza J. 1965. Algunos aspectos de la reproducción de pulpo (*Octopus vulgaris* Lamarck) de la Sonda de Campeche. Res. II Congreso Nacional de Oceanografía, Ensenada, Baja California, México.
- Geweke J. 1992. Evaluating the accuracy of sampling-based approaches to the calculation of posterior moments. In: Berger JO, Bernardo JM, Dawid AP, Smith AFM (eds.), Bayesian Statistics. 4. Proceedings of the 4th Valencia International Meeting. Clarendon Press, Oxford, pp. 169–193.
- Haddon M. 2001. Modelling and Quantitative Methods in Fisheries. Chapman & Hall/CRC, Boca Raton, Florida, 406 pp.
- Heidelberger P, Welch P. 1983. Simulation run length control in the presence of an initial transient. *Oper. Res.* 31: 1109–1144.
- Hilborn R, Mangel M. 1997. The Ecological Detective: Confronting Models with Data. Princeton Univ. Press, Princeton, New Jersey, 315 pp.
- constante, un escenario con incrementos graduales de la mortalidad por pesca y un tercer escenario que simula los niveles de mortalidad en 2000. Los resultados de este análisis sugieren que aun cuando la intensidad de la mortalidad por pesca aparentemente produce un impacto importante en la biomasa del pulpo rojo. La vulnerabilidad tiene un papel importante cuando se reduce y cuando el stock es sometido a altos niveles de explotación. Más análisis se deben llevar a cabo para explorar las interacciones tróficas entre el mero y el pulpo rojo en un marco Bayesiano usando un modelo estadístico multiespecífico (Jurado-Molina *et al.* 2005).
- Como se mencionó anteriormente, los resultados de este análisis sugieren que el pulpo rojo podría estar sobreexplotado. Se podría considerar un error en el manejo de este recurso el mantener los niveles actuales de explotación y podría resultar en el cierre de esta pesquería con las correspondientes pérdidas de empleo e ingreso. El desarrollo de un plan de reconstrucción para esta pesquería requiere el establecimiento de objetivos claros en el corto, mediano y largo plazo y claras estrategias y regulaciones para el manejo de este recurso. El plan tiene que incluir todos los sectores involucrados, el académico (a través de universidades e instituciones de investigación), las autoridades pesqueras mexicanas (CONAPESCA, INAPESCA y las autoridades estatales), pescadores y armadores. La adopción de estrategias y regulaciones tiene que realizarse a través del consenso para que se asegure el cumplimiento de las regulaciones por todos los sectores involucrados. Debido a la disponibilidad de datos, el manejo del pulpo rojo ofrece una gran oportunidad para establecer un marco cuantitativo formal basado en la metodología Bayesiana que tome ventaja de todos los datos disponibles para asegurar una explotación sustentable de los recursos pesqueros en México.
-
- Hilborn R, Walters CJ. 1992. Quantitative fisheries stock assessment: choice, dynamics and uncertainty. Chapman and Hall, New York.
- INP. 2002, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007. Evaluación de la población de pulpo (*Octopus maya*) en la Península de Yucatán. Instituto Nacional de la Pesca, Mexico. [Http://www.inp.sagarpa.gob.mx/Dictamenes/Dictamenes.htm](http://www.inp.sagarpa.gob.mx/Dictamenes/Dictamenes.htm)
- INAPESCA. 2008. Evaluación de la población de pulpo (*Octopus maya*) en la Península de Yucatán 2008. Documento interno, Instituto Nacional de la Pesca, Mexico. [Http://www.inp.sagarpa.gob.mx/Dictamenes/Dictamenes.htm](http://www.inp.sagarpa.gob.mx/Dictamenes/Dictamenes.htm)
- Jurado-Molina J, Livingston PA, Ianelli JN. 2005. Incorporating predation interactions to a statistical catch-at-age model for a predator-prey system in the eastern Bering Sea. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 62: 1865–1873.
- Jurado-Molina J, Palleiro-Nadar JS, Gutiérrez NL. 2009. Developing a Bayesian framework for stock assessment and decision analysis of the red sea urchin fishery in Baja California, Mexico. *Cienc. Mar.* 35: 183–193.
- McAllister M, Kirkwood G. 1998. Using Bayesian decision analysis to help achieve a precautionary approach for managing developing fisheries. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 55: 2642–2661.
- Pella JJ, Tomlinson PK. 1969. A generalized stock-production model. *Bull. IATTC.* 13: 421–458.

- Punt AE, Hilborn R. 1996. Biomass Dynamics Models. User's manual. FAO Computerized Information Series (Fisheries) No. 10, Rome, 62 pp.
- Punt AE, Hilborn R. 2001. BAYES-SA: Bayesian Stock Assessment Methods in Fisheries. User's manual. FAO Computerized Information Series (Fisheries) No. 12, Rome, 56 pp.
- Rice JC, Richards LJ. 1996. A framework for reducing implementation uncertainty in fisheries management. *North Am. J. Fish. Manage.* 16: 488–494.
- Schaefer MB. 1954. Some aspects of the dynamics of populations important to the management of commercial marine fisheries. *Bull. IATTC*, 25–56 pp.
- Simpfendorfer C, Donahue K, Hall NG. 2000. Stock assessment and risk analysis for the whiskery shark (*Furgaleus macki* (Whitley)) in southwestern Australia. *Fish. Res.* 47: 1–17.
- Solís-Ramírez MJ. 1994. La pesquería del pulpo del Golfo de México y Caribe mexicano. In: Atlas Pesquero y Pesquerías Relevantes de México. CD Multimedia. Secretaría de Pesca, INP, CENEDIC, Univ. de Colima, México.
- Solís-Ramírez MJ, Chávez EA. 1986. Evaluación y régimen óptimo de pesca de pulpo de la Península de Yucatán, México. *Ann. Inst. Cienc. Mar Limnol. Univ. Nac. Aut. Méx.* 13: 1–18.
- Solís-Ramírez MJ, Arreguín-Sánchez F, Seijo JC. 1997. Pesquería de pulpo de la plataforma continental de Yucatán. In: Flores-Hernández D, Sánchez-Gil P, Seijo JC, Arreguín-Sánchez F (eds.), Análisis y Diagnóstico de los Recursos Pesqueros Críticos del Golfo de México. Universidad Autónoma de Campeche, EPOMEX Serie Científica 7, pp. 61–80.
- Van Heukelem WF. 1977. Laboratory maintenance, breeding and biomedical research potential of the Yucatan octopus (*Octopus maya*). *Lab. Anim. Sci.* 27: 825–859.
- Voss GL, Solís-Ramírez MJ. 1966. *Octopus maya*, a new species from the Bay of Campeche. *Bull. Mar. Sci.* 16: 615.

*Recibido en julio de 2009;
aceptado en noviembre de 2009.*