

**CONTROL OPTIMO DE UN SISTEMA BIOECONOMICO.
LA PESQUERIA DEL ATUN ALETA AMARILLA (*Thunnus
albacares*) EN EL OCEANO PACIFICO ORIENTAL**

**OPTIMUM CONTROL OF A BIOECONOMIC SYSTEM.
THE YELLOWFIN TUNA (*Thunnus albacares*) FISHERY
IN THE EASTERN PACIFIC OCEAN**

Michel Jules Dreyfus-León
Héctor Guillermo Manzo-Monroy

Facultad de Ciencias Marinas
Universidad Autónoma de Baja California
Apartado postal 453
Ensenada, Baja California, México

Recibido en noviembre de 1991; aceptado en junio de 1993

RESUMEN

Mediante la teoría de control óptimo, se maximiza la función objetivo de valor presente neto de la pesquería, utilizando la información de 40,000 lances de pesca de la flota atunera mexicana del periodo de 1980 a 1990, con la cual se estimó el esfuerzo en días normales de pesca (DNP) de la flota internacional que opera en la zona. Se modificó el modelo de Schnute (1977), con el fin de determinar tasa de crecimiento poblacional, capacidad de carga del medio ambiente y coeficiente de capturabilidad. En el modelo bioeconómico, se utilizaron adicionalmente costos de operación, diversos precios de la tonelada de atún y tasas de descuento, para calcular el tamaño óptimo de biomasa (variable de estado) y el esfuerzo óptimo (variable de control). Se consideraron dos variantes: coeficiente de capturabilidad constante y coeficiente en función inversa del tamaño de la población. Se determinó que bajo cualquier contexto el esfuerzo aplicado en años recientes es casi el doble del óptimo económico obtenido en este trabajo.

ABSTRACT

The present value objective function of the fishery is maximized with the use of optimum control theory and information from 40,000 fishing sets of the Mexican tuna fishing fleet dating from 1980 to 1990. These data were used to obtain standard fishing days (SFD) as a measure of effort of the international fleet in the eastern Pacific Ocean. The Schnute model (1977) was modified and population growth rate, environmental carrying capacity and catchability coefficient were estimated. Operative costs, several prices for the tuna caught and discount rates were used to obtain optimum biomass level (state variable) and effort (control variable). A constant catchability coefficient and a variable one, as an inverse function of biomass level, were considered. In any case, the effort being applied recently is almost double with respect to the economic optimum calculated in this work.

INTRODUCCION

En el aprovechamiento de los recursos naturales, existe una serie de problemas en cuanto a la razón óptima de explotación. En términos generales, se manifiestan situaciones

INTRODUCTION

In the utilization of natural resources, there are a number of problems regarding the optimum rate of exploitation. In general terms, situations occur that accelerate the

que aceleran la disminución de las existencias naturales, que son finitas. Otro tipo de problemas en este aspecto es la perturbación del medio ambiente por contaminación y desechos o vertimientos.

De acuerdo con la economía del bienestar, los dos tipos de problemas mencionados surgen por la existencia de los denominados bienes de uso común o bienes comunes, puesto que el costo del uso de los recursos naturales y vertimiento de los desechos no se incluye en el mecanismo de precios. En las pesquerías no reguladas de acceso abierto (bienes de uso común), generalmente se manifiesta una sobrexplotación, en que la productividad biológica y de los bienes de capital no se encuentran en el punto óptimo.

El equilibrio de mercado para una pesquería de este tipo fue descrito y explicado como un modelo bioeconómico estático, por primera vez, por Gordon (1954). A partir del mismo principio, se han desarrollado y aplicado modelos similares para el análisis de diferentes pesquerías como la langosta (Fullenbaum y Bell, 1974) y el atún (Dreyfus y Manzo, 1990), entre otros.

Los modelos dinámicos que consideran situaciones de no equilibrio representan aspectos más reales, ya que incorporan los cambios de las poblaciones (crecimiento y disminución) en el tiempo. Estos desarrollos son producto de la aplicación de extensiones de la teoría neoclásica del capital a aspectos de economía aplicada. El problema en la administración de un recurso se transforma en la selección de un flujo de consumo (pesca) óptimo en el tiempo. Esto implica la selección de un nivel óptimo de población productiva en el tiempo (Clark y Munro, 1975), lo que equivale a pasar de periodo a periodo para maximizar los retornos netos en valor presente para la sociedad o el propietario, con el argumento económico de que las decisiones de inversión de las empresas tienen el objetivo de maximizar su bienestar (Clark, 1985). La solución a este tipo de problemas ha sido tradicionalmente buscada por el cálculo de variaciones, programación dinámica o por teoría del control óptimo. Esta última es la herramienta central de la teoría del capital (Dorfman, 1969). Importantes contribuciones a los modelos dinámicos bioeconómicos de pesquerías se encuentran en Quirk y Smith (1969), Herfindahl y Kneese (1974), Clark y Munro (1975), Nijkamp (1977) y Clark (1985).

depletion of natural resources, which are finite. Another type of problem is the perturbation of the environment as a result of contamination and waste discharges.

According to welfare economics, the two types of problems mentioned arise because of the existence of the so-called common property resources, since the cost of exploiting natural resources and waste discharges are not included in the pricing. In the unregulated open access fisheries (common resources), overexploitation generally occurs when biological productivity and capital assets are not optimum.

The market equilibrium for a fishery of this type was described and explained as a static bioeconomic model, for the first time, by Gordon (1954). From the same principle, similar models have been developed and applied for the analysis of different fisheries, such as the lobster (Fullenbaum and Bell, 1974) and tuna (Dreyfus-León and Manzo-Monroy, 1990), among others.

Dynamic models that consider situations of non-equilibrium represent more real aspects, since they incorporate changes in the population (growth and depletion) in time. These developments are the result of applying extensions of the neoclassic capital theory to aspects of applied economy. The problem in the management of a resource consists of the selection of an optimum flow of consumption (fishing) in time. This implies the selection of an optimum level of productive population in time (Clark and Munro, 1975), which amounts to moving from period to period to maximize the net returns to present value for the society or owner, based on the economic argument that investment decisions of companies have the objective of maximizing their profits (Clark, 1985). The solution to this type of problem has been attempted by means of the calculation of variations, dynamic programming or optimum control theory. The last one is the main tool of the capital theory (Dorfman, 1969). Important contributions to dynamic bioeconomic models of fisheries can be found in Quirk and Smith (1969), Herfindahl and Kneese (1974), Clark and Munro (1975), Nijkamp (1977) and Clark (1985).

El recurso pesquero de los túnidos es de gran importancia mundial por su dinámica biológica y económica. Las capturas de este grupo en el Océano Pacífico constituyen aproximadamente el 50% del volumen mundial. El Océano Pacífico oriental (OPO) representa un área de gran importancia para esta pesquería, y las especies atún aleta amarilla (*Thunnus albacares*) y barrilete (*Katsuwonus pelamis*) son las más importantes. Las principales flotas atuneras en el OPO son las de México, E.U.A., Venezuela y Ecuador (CIAT, 1991). La administración de este recurso pesquero ha suscitado controversias en algunos aspectos, entre los países que lo capturan y existen diferentes organizaciones internacionales para regularla, aunque sin carácter plenamente vigente ni obligatorio.

Con este trabajo se pretende contribuir a mejorar la administración del atún como recurso, al ofrecer elementos de juicio para la toma de decisiones mediante un modelo dinámico de optimización.

METODOLOGIA

De acuerdo con Clark (1985) y Beltrami (1987), se utilizó la expresión

$$VP = \int_0^{\infty} e^{-\delta t} (qPX - c) E dt \quad (1)$$

como función por maximizar para representar los retornos netos del capital de la pesquería, en el tiempo. En ella, q es coeficiente de capturabilidad; p , precio; c , costo por unidad de esfuerzo; X , biomasa (toneladas); E , esfuerzo en días normales de pesca (DNP) y δ , tasa de descuento

El esfuerzo es estandarizado con respecto a las embarcaciones atuneras de capacidad de acarreo superior a mil toneladas. El valor presente (VP) es la función objetivo, sujeta a las condiciones

$$\frac{dx}{dt} = f(X) - qEX \quad (2)$$

$$0 \leq E(t) \leq 35,000 DNP$$

$$0 \leq X(t)$$

The tuna fishery is of great importance worldwide because of its biological and economic dynamics. Tuna catches in the Pacific Ocean constitute approximately 50% of the world volume. The eastern Pacific Ocean (EPO) represents an area of great importance for this fishery, and the most important species are the yellowfin (*Thunnus albacares*) and skipjack (*Katsuwonus pelamis*) tuna. The main tuna fishing fleets operating in the EPO are those of Mexico, USA, Venezuela and Ecuador (CIAT, 1991). The management of this fishery resource has caused controversy among the countries that catch it and there are several international organizations for its regulation, without being fully in force or obligatory.

This study aims to contribute to the better management of the tuna fishery, by offering facts for the taking of decisions based on a dynamic optimization model.

METHODOLOGY

According to Clark (1985) and Beltrami (1987), the expression

was used as a function to be maximized to represent the capital net returns of the fishery in time, where q is the catchability coefficient; p , price; c , cost per unit effort; X , biomass (tons); E , effort in standard fishing days (SFD) and δ , discount rate.

Effort is standardized with respect to tuna fishing vessels with a carrying capacity of more than 1,000 tons. The present value (VP) is the objective function, subject to the conditions

donde

where

$$f(X) = rX \left[1 - \frac{X}{K} \right]$$

siendo r tasa instantánea de crecimiento poblacional y K , capacidad de carga del medio ambiente.

and r is the instantaneous population growth rate and K the environmental carrying capacity.

De acuerdo con la teoría de control óptimo, se requiere determinar la función de esfuerzo en el tiempo (variable de control), que maximiza las ganancias netas de la pesquería en valor presente.

According to the optimum control theory, the function of effort in time (control variable) has to be determined, which maximizes the net gains of the fishery to present value.

Se define la ecuación hamiltoniana:

The Hamiltonian equation is defined:

$$H(X, \lambda, E) = -\lambda_0 e^{-\delta t} (qPX - c)E + \lambda(f(X) - qEX) \quad (3)$$

donde λ es una función desconocida (variable adjunta) que se determina para cumplir con las condiciones de maximización:

where λ is an unknown function (attached variable) which is determined to fulfill the conditions of maximization:

$$\frac{\partial H}{\partial E} = 0 \quad (4)$$

(de donde se obtiene λ y su derivada)

(from which λ and its derivative are obtained)

$$\frac{d\lambda}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial X} \quad (5)$$

Se trabajó este modelo con los parámetros r , K , y q , determinados con la metodología de Schnute (1977) y modificados con la expresión

The parameters r , K and q used in this model were determined with the methodology of Schnute (1977) and modified with the expression

$$S_1(r, K, q) = \sum \left[\ln \left(\frac{U_n}{U_{n-1}} \right) - r + q \left(\frac{E_{n-1} + E_n}{2} \right) + \frac{r}{qK} \left(\frac{U_{n-1} + U_n}{2} \right) \right]^2 \quad (6)$$

que representa la suma de cuadrados por minimizar para la obtención de los parámetros. Los términos U_n y E_n son, respectivamente, captura por unidad de esfuerzo y esfuerzo estándar respectivo del año n . La modificación consiste en definir.

which represents the sum of squares to be minimized in order to obtain the value of the parameters. The terms U_n and E_n are, respectively, catch per unit effort and standard effort of year n . The modification consists in defining

$$x_n = P_1 E_{n-1} + P_2 E_n \text{ en lugar de/instead of } x_n = \frac{1}{2} (E_{n-1} + E_n) \quad (7)$$

$$y_n = P_3 U_{n-1} + P_4 U_n \text{ en lugar de/instead of } y_n = \frac{1}{2}(U_{n-1} + U_n) \quad (8)$$

where

$$(P_1 + P_2) = (P_3 + P_4) = 1$$

Se consideró el precio por tonelada de atún de 800, 900 y 1,000 dólares, y se determinó un costo por unidad de esfuerzo de 10,000 dólares, basado en las estimaciones de Hudgins (1986), con diferentes tasas de descuento en un intervalo de 0 a 100%. Asimismo, se consideraron dos variantes en la función objetivo con respecto al coeficiente de capturabilidad: a) coeficiente de capturabilidad constante y b) coeficiente de capturabilidad en función inversa de la biomasa de la población capturable. Esto último debido a que tanto los peces agrupados en cardúmenes como el esfuerzo de pesca se concentran preferentemente en ciertas áreas y, en consecuencia, una unidad de esfuerzo puede capturar una proporción mayor de la población global conforme ésta disminuye en abundancia (Radovich, 1973, MacCall, 1976). Por no existir información del grado y forma de la variación del coeficiente de capturabilidad con respecto a la biomasa, se consideró la ecuación de una recta con pendiente negativa y la variación de la misma en el intervalo de confianza obtenido con el modelo de Schnute (1977) aquí modificado.

RESULTADOS

Modelo bioeconómico con coeficiente de capturabilidad constante.

La función por optimizar es el valor presente de los réditos netos descontados de la pesquería. Empleando la ecuación hamiltoniana, se obtiene una ecuación cuadrática en X (tamaño de la población), cuya solución en términos de los parámetros biológicos (K , r) y económicos (p , c), expresa el tamaño óptimo de la población:

$$X^2 \left(-\frac{2Pr}{K} \right) + X \left(-\delta P + \frac{cr}{qK} + Pr \right) + \frac{\delta c}{q} = 0 \quad (9)$$

The price per ton of tuna was considered at 800, 900 and 1,000 dollars and a cost per unit effort of 10,000 dollars was determined, based on the estimates by Hudgins (1986), with different discount rates in a range 0-100%. Likewise, two variants were considered in the objective function with respect to the catchability coefficient: a) constant catchability coefficient and b) catchability coefficient as an inverse function of the biomass of the catchable population. The latter was considered since both school fish and fishing effort concentrate in certain areas and, consequently, one unit of effort can have a higher proportion of the overall population as its abundance decreases (Radovich, 1973; MacCall, 1976). As there is no information on the degree and shape of the variation of the catchability coefficient with respect to biomass, a straight-line equation with negative slope was assumed, as well as its variation in the confidence interval obtained with the Schnute model (1977), here modified.

RESULTS

Bioeconomic model with constant catchability coefficient

The function to be optimized is the present value of the net returns deducted from the fishery. Using the Hamiltonian, a quadratic equation in X (size of the population) is obtained, whose solution in terms of the biological (K , r) and economic (p , c) parameters expresses the optimum size of the population:

Se calcula el esfuerzo óptimo correspondiente con la relación

The corresponding optimum effort is calculated with the relation

$$E^* = r X^* (1 - X^* / K) / q X^* \quad (10)$$

y la correspondiente captura en equilibrio

and the corresponding catch in equilibrium

$$C^* = q E^* X^* \quad (11)$$

De acuerdo con Clark (1985) y Beltrami (1987), la solución es del tipo *bang-bang*, es decir, si la población es de tamaño superior a X^* , se debe aplicar el esfuerzo máximo y, si es menor, no se debe explotar para llevar el recurso al nivel de X^* lo más rápidamente posible

According to Clark (1985) and Beltrami (1987), the solution is of the bang-bang type, that is, if the size of the population is greater than X^* , maximum effort must be applied, and if it is smaller, it must not be exploited in order to let the resource reach a level of X^* as quickly as possible

$$E(t) = \begin{cases} 0 & \text{si/if } X(t) < X^* \\ E_{\text{máx}} & \text{si/if } X(t) > X^* \\ E^* & \text{si/if } X(t) = X^* \end{cases} \quad (12)$$

En las Figs. 1 y 2 y tabla 1 se presentan los valores de los parámetros pesqueros óptimos (X^* , C^* , E^*) en función de la tasa de descuento y los precios. Se muestra una disminución de la biomasa óptima al incrementarse tanto la tasa de descuento como los precios de venta, así como un cambio porcentual del punto medio de la biomasa en función de δ , mayor para precios altos y tasas bajas (0.51%) que para precios bajos y tasas altas (0.31%). El correspondiente cambio porcentual de la biomasa del punto medio en función del precio es mayor para precios bajos y tasas altas (1.33%) y menor (0.63%) para el caso inverso. Sin embargo, estas diferencias de los cambios porcentuales dentro de todo el espacio de variación son insignificantes, por lo que se considera que el cambio de la biomasa se puede representar por una superficie de gradiente constante. El correspondiente cambio de esfuerzo óptimo tiene un comportamiento inverso en función del precio y la tasa de descuento, con mayor esfuerzo para precios y tasas de descuento altas. De manera análoga, el cambio del esfuerzo en todo el espacio de valores se puede representar por

The values of the optimum fishery parameters (X^* , C^* , E^*) as a function of the discount rate and prices are presented in Figs. 1 and 2 and table 1. There is an increase in optimum biomass as both the discount rate and selling price increase, as well as a percentage change of the mean point of the biomass as a function of δ , higher for high prices and low rates (0.51%) than for low prices and high rates (0.31%). The corresponding percentage change of the biomass of the mean point as a function of price is higher for low prices and high rates (1.33%) and lower (0.63%) for the opposite case. However, these differences of the percentage changes in all the range of variation are insignificant, and it is therefore considered that the change of the biomass can be represented by a surface of constant gradient. The corresponding change of optimum effort has the opposite behaviour as a function of price and discount rate, with greater effort for high prices and discount rates. Similarly, the change of effort in all the range of values can be represented by a flat surface with a tendency towards low prices and discount rates.

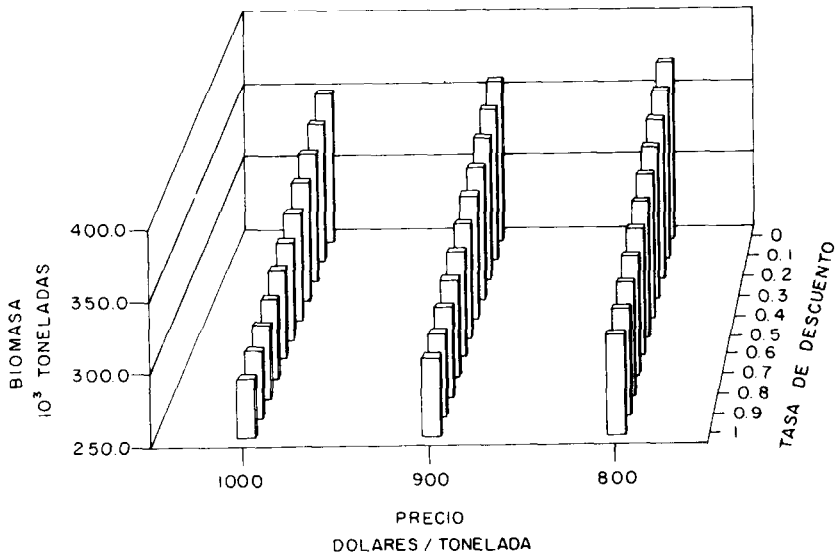


Figura 1. Biomasa óptima en función del precio (en dólares) por tonelada de atún y tasa de descuento. Modelo con coeficiente de capturabilidad constante.
Figure 1. Optimum biomass as a function of price (in dollars) per ton of tuna and discount rate. Model with constant catchability coefficient.

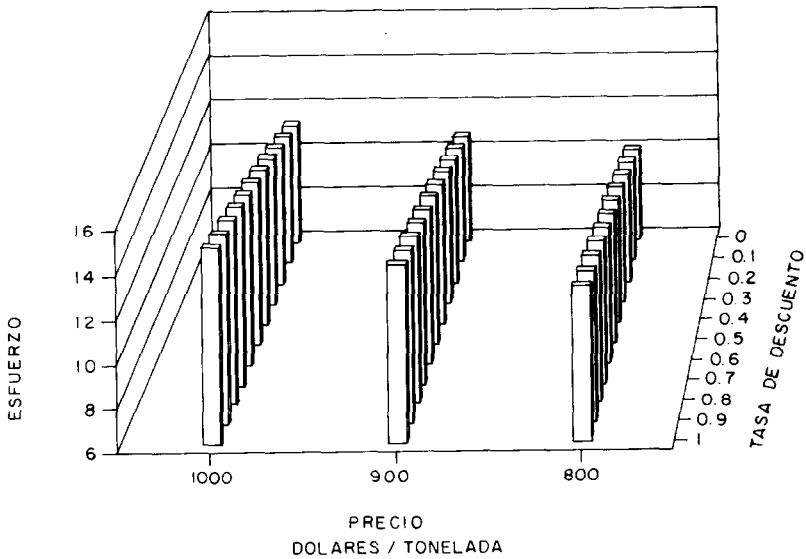


Figura 2. Esfuerzo óptimo con diferentes niveles de precio por tonelada de atún (en dólares) y tasa de descuento. Modelo con coeficiente de capturabilidad constante.
Figure 2. Optimum effort with different levels of price per ton of tuna (in dollars) and discount rate. Model with constant catchability coefficient.

Tabla 1. Biomasa, captura y esfuerzo óptimos determinados de acuerdo con el precio por tonelada de atún y tasa de descuento, considerando el coeficiente de capturabilidad constante.

Table 1. Optimum biomass, catch and effort determined according to the price per ton of tuna and discount rate, considering the constant catchability coefficient.

| P R E C I O | | | | | | | | | |
|------------------------|---------|---------|----------|---------|---------|----------|---------|---------|----------|
| δ TASA DESCUENTO | 8 0 0 | | | 9 0 0 | | | 1 0 0 0 | | |
| | X * | C * | E * | X * | C * | E * | X * | C * | E * |
| | BIOMASA | CAPTURA | ESFUERZO | BIOMASA | CAPTURA | ESFUERZO | BIOMASA | CAPTURA | ESFUERZO |
| 0 | 371491 | 231137 | 10108 | 360209 | 239133 | 10785 | 351183 | 244852 | 11327 |
| 0.1 | 365478 | 235516 | 10470 | 353585 | 243388 | 11184 | 344040 | 248950 | 11756 |
| 0.2 | 359706 | 239467 | 10816 | 347215 | 247175 | 11566 | 337159 | 252543 | 12169 |
| 0.3 | 354172 | 243024 | 11148 | 341096 | 250530 | 11933 | 330539 | 255669 | 12567 |
| 0.4 | 348871 | 246220 | 11466 | 335227 | 253489 | 12285 | 324180 | 258367 | 12949 |
| 0.5 | 343797 | 249084 | 11771 | 329603 | 256085 | 12623 | 318079 | 260674 | 13315 |
| 0.6 | 338945 | 251644 | 12062 | 324220 | 258350 | 12946 | 312235 | 262626 | 13666 |
| 0.7 | 334307 | 253929 | 12341 | 319073 | 260317 | 13255 | 306643 | 264258 | 14001 |
| 0.8 | 329879 | 255963 | 12607 | 314155 | 262012 | 13550 | 301297 | 265602 | 14322 |
| 0.9 | 325650 | 257769 | 12860 | 309460 | 263465 | 13832 | 296193 | 266688 | 14628 |
| 1 | 321616 | 259370 | 13102 | 304981 | 264698 | 14101 | 291324 | 267544 | 14925 |

una superficie plana con inclinación hacia los precios y tasas de descuento de valores bajos.

Estos resultados indican que, en términos económicos, el valor presente de las capturas disminuye al aumentar la tasa de descuento, provocando un incremento en el esfuerzo y una disminución del tamaño óptimo de población en las capturas. De igual manera, un precio mayor causa mayor valor de los ingresos a corto plazo, e incrementa consecuentemente los esfuerzos y capturas, disminuyendo el tamaño óptimo de población.

Análisis de sensibilidad

Se calculó la respuesta del valor de X^* con respecto a cambios porcentuales de los parámetros del modelo bioeconómico (p, δ, q, K, r). En la Fig. 3 y tabla 2, se expresan los cambios de la biomasa por variaciones de un 10% de cada uno de los parámetros en forma independiente. En todos los casos la respuesta es inelástica (< 1), y existe una respuesta positiva significativamente mayor con K que con r ; el mayor cambio negativo de X^* es por q y no hay tantas diferencias en los valores de respuesta negativa, que son función de los parámetros económicos y del coeficiente de capturabilidad.

These results indicate that, in economic terms, the present value of the catches decreases as the discount rate increases, causing an increase in effort and a decrease in the optimum size of the population in the catches. Likewise, a higher price causes a greater value of the revenues in the short term, and consequently increases the effort and catches, decreasing the optimum size of the population.

Sensitivity analysis

The response of the value of X^* was calculated with respect to percentage changes of the parameters of the bioeconomic model (p, δ, q, K, r). The changes of the biomass by variations of 10% of each one of the parameters are expressed independently in Fig. 3 and table 2. In all cases, the response is inelastic (< 1) and there is a significantly higher positive response with K than with r . The biggest negative change of X^* is by q , and there are no large differences in the values of negative response, which are a function of the economic parameters and of the catchability coefficient.

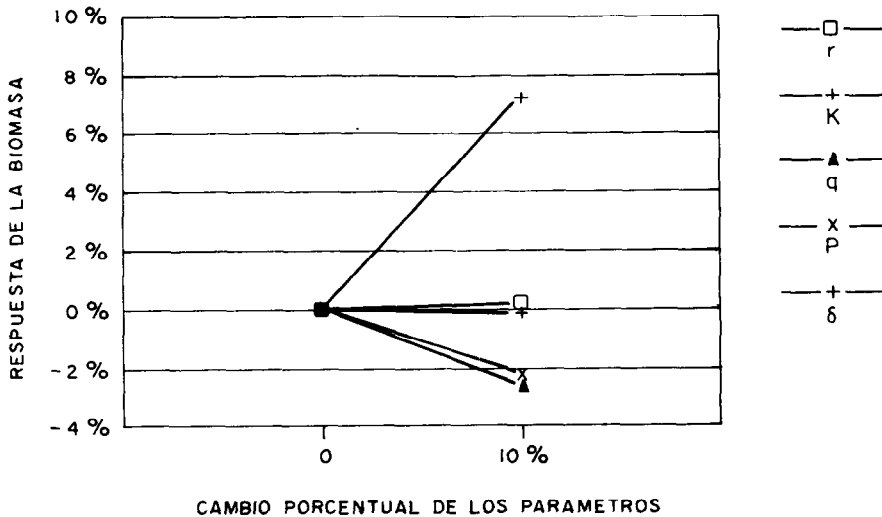


Figura 3. Análisis de sensibilidad. Cambio de biomasa óptima como respuesta al cambio porcentual de los valores de los parámetros en un 10%.

Figure 3. Sensitivity analysis. Change of optimum biomass in response to a percentage change of the values of the parameters by 10%.

Tabla 2. Variación de la biomasa óptima en función de incrementos de 10% en los parámetros del modelo bioeconómico con coeficiente de capturabilidad constante.

Table 2. Variation of the optimum biomass as a function of 10% increases in the parameters of the bioeconomic model with constant catchability coefficient.

| PARAMETROS | PORCENTAJE DE CAMBIO EN LA BIOMASA OPTIMA |
|------------|---|
| r | 0.2 % |
| K | 7.3 % |
| q | - 2.6 % |
| P | - 2.2 % |
| δ | - 1.0 % |

Modelo bioeconómico con coeficiente de capturabilidad en función de la biomasa

Una solución al modelo anterior (ec. 1) se obtiene, de acuerdo con Clark (1985), al resolver la siguiente ecuación:

Bioeconomic model with catchability coefficient as a function of biomass

A solution to the previous model (eq. 1) is obtained, according to Clark (1985), by solving the following equation:

$$F'(X) - \frac{c'(X)F(X)}{P - c(X)} = \delta \quad (13)$$

donde $F'(X)$ es la primera derivada de la función de crecimiento logística y $[c(X) = c/(qX)]$ es el costo por unidad de biomasa en el nivel (X) de la población. Por lo que la ecuación desarrollada para la solución de X^* es

$$r - \frac{2rX}{K} - \frac{\left[\frac{1}{(a-bX)} \left(-\frac{c}{X^2} \right) + \frac{bc}{X(a-bX)^2} \right] \left[rX - \frac{rX^2}{K} \right]}{P - \frac{c}{(a-bX)}} = \delta \quad (14)$$

A partir de esta fórmula, se estiman los valores de C^* y E^* (tabla 3). Los resultados son semejantes al caso anterior, en cuanto a las pendientes de las superficies de X^* y E^* (Figs. 4, 5) como función del precio y tasa de descuento. Para X^* , disminuye al aumentar los valores de precios y tasa de descuento, es decir, se estima una superficie de pendiente constante. Para E^* , la superficie de los valores se inclina hacia precios y tasas de descuento de bajo valor. Al emplear el coeficiente de capturabilidad en función de la biomasa, los cambios de X^* y E^* son de menor variación que en el caso de coeficiente constante. Por otra parte, con el coeficiente en función inversa de la biomasa, los niveles de biomasa son mayores y los niveles de esfuerzo menores que en el caso del coeficiente constante.

Análisis de sensibilidad

La respuesta del tamaño óptimo de biomasa por cambios porcentuales en los parámetros del modelo (tabla 4, Fig. 6) indica cambios positivos con respecto a (K, b, r), en orden de magnitud. La respuesta de cambio es negativa con respecto a la abscisa (a), precio (p) y tasa de descuento (δ). El comportamiento es semejante al del caso del coeficiente constante; sin embargo, aquí la respuesta de la biomasa en valores absolutos es más sensible a cambios de los parámetros, con excepción de r .

DISCUSION

Los resultados de ponderación del esfuerzo y del índice de abundancia con la modificación del modelo de Schnute (1977) se encuentran en el intervalo de valores determinados en otros trabajos (CIAT, 1991), por lo que se justifica haber usado el DNP como medida de esfuerzo, en lugar del tiempo de búsqueda.

where $F'(X)$ is the first derivative of the logistic growth function and $[c(X) = c/(qX)]$ is the cost per unit biomass in level (X) of the population. Therefore, the equation developed for the solution of X^* is

From this formula, the values of C^* and E^* are estimated (table 3). The results are similar to the previous case, in regard to the slopes of the X^* and E^* surfaces (Figs. 4, 5) as a function of price and discount rate. For X^* , it decreases as the values of price and discount rate increase, that is, a surface of constant slope is estimated. For E^* , the surface of the values tends towards prices and discount rates of low value. On using the catchability coefficient as a function of biomass, the changes of X^* and E^* are smaller than in the case of the constant coefficient. On the other hand, with the coefficient as an inverse function of biomass, the levels of biomass are higher and the levels of effort lower than in the case of the constant coefficient.

Sensitivity analysis

The response of optimum biomass size by percentage changes in the parameters of the model (table 4, Fig. 6) indicates positive changes with respect to (K, b, r), in order of magnitude. The response of change is negative with respect to abscissa (a), price (p) and discount rate (δ). The behaviour is similar to that of the constant coefficient, but in this case the response of the biomass in absolute values is more sensitive to changes of the parameters, except for r .

DISCUSSION

The results of weighting the effort and abundance index with the modification of the Schnute model (1977) are found in the range of values determined in other works (CIAT, 1991). This justifies the use of SFD as a measure of effort instead of search time.

Regarding the catchability coefficient ($q = 0.000061$), the estimate is higher than that reported by CIAT (1991), $q = 0.000039$,

Tabla 3. Biomasa, captura y esfuerzo óptimos determinados de acuerdo con el precio por tonelada de atún y tasa de descuento, considerando el coeficiente de capturabilidad variable.

Table 3. Optimum biomass, catch and effort determined according to the price per ton of tuna and discount rate, considering the variable catchability coefficient.

| P R E C I O | | | | | | | | | |
|-------------------------------|---------|---------|----------|---------|---------|----------|---------|---------|----------|
| | 8 0 0 | | | 9 0 0 | | | 1 0 0 0 | | |
| δ TASA DESCUENTO | X * | C * | E * | X * | C * | E * | X * | C * | E * |
| | BIOMASA | CAPTURA | ESFUERZO | BIOMASA | CAPTURA | ESFUERZO | BIOMASA | CAPTURA | ESFUERZO |
| 0 | 389000 | 216867 | 7964 | 376000 | 227679 | 8650 | 365000 | 235852 | 9231 |
| 0.1 | 383500 | 221504 | 8254 | 369500 | 232616 | 8993 | 358000 | 240587 | 9600 |
| 0.2 | 377500 | 226495 | 8571 | 363600 | 237242 | 9336 | 351000 | 244961 | 9969 |
| 0.3 | 372000 | 230754 | 8861 | 357000 | 241234 | 9653 | 344500 | 248698 | 10313 |
| 0.4 | 366500 | 234790 | 9151 | 351000 | 244961 | 9969 | 338000 | 252122 | 10656 |
| 0.5 | 361500 | 238255 | 9415 | 345000 | 248421 | 10286 | 331500 | 255235 | 10999 |
| 0.6 | 356500 | 241555 | 9679 | 339500 | 251360 | 10576 | 325500 | 257831 | 11315 |
| 0.7 | 352000 | 244358 | 9917 | 334000 | 254074 | 10867 | 320000 | 259976 | 11606 |
| 0.8 | 347000 | 247297 | 10181 | 329000 | 256349 | 11131 | 314000 | 262063 | 11922 |
| 0.9 | 342500 | 249785 | 10418 | 324000 | 258438 | 11395 | 309000 | 263598 | 12186 |
| 1 | 338500 | 251870 | 10629 | 319000 | 260343 | 11658 | 303500 | 265073 | 12477 |

Tabla 4. Variación de la biomasa óptima en función de incrementos de 10% en los parámetros del modelo bioeconómico con coeficiente de capturabilidad en función de la biomasa.

Table 4. Variation of the optimum biomass as a function of 10% increases in the parameters of the bioeconomic model with catchability coefficient as a function of biomass.

| PARAMETROS | PORCENTAJE DE CAMBIO EN LA BIOMASA OPTIMA |
|------------|--|
| r | 0.1 % |
| K | 7.9 % |
| q | - 3.7 % |
| b | 0.9 % |
| P | - 2.8 % |
| δ | - 0.3 % |

En lo referente al coeficiente de capturabilidad ($q = 0.000061$), la estimación es mayor que la indicada por la CIAT, $q = 0.000039$ (1991), posiblemente por haber considerado aquí la categoría más eficiente de toda la flota internacional. Además, no hay

posiblemente porque la más eficiente categoría de la flota internacional fue considerada aquí. También debe notarse que el esfuerzo de la flota mexicana está principalmente enfocado en la pesca de atún asociada con delfines. Así, mayores capturas se obtienen por set que aumentan

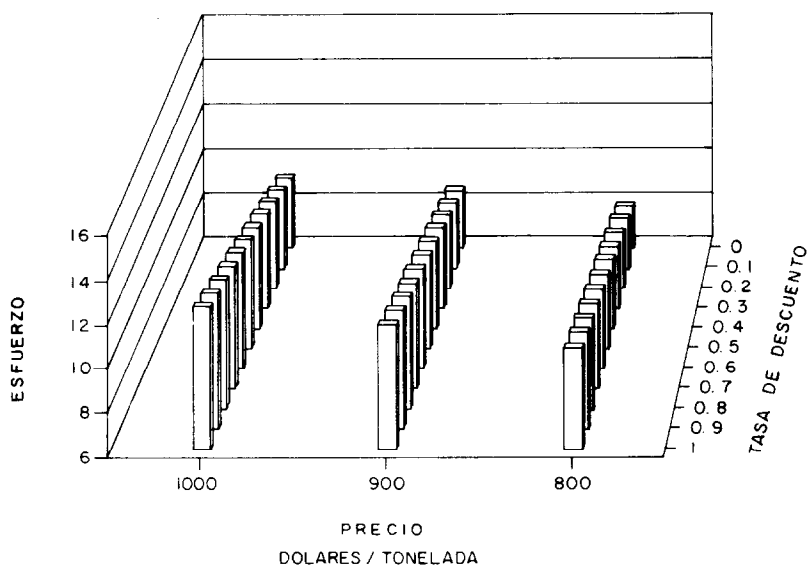


Figura 4. Esfuerzo óptimo con diferentes niveles de precio por tonelada de atún (dólares) y tasa de descuento. Modelo con coeficiente de capturabilidad variable.

Figure 4. Optimum effort with different levels of price per ton of tuna (dollars) and discount rate. Model with variable catchability coefficient.

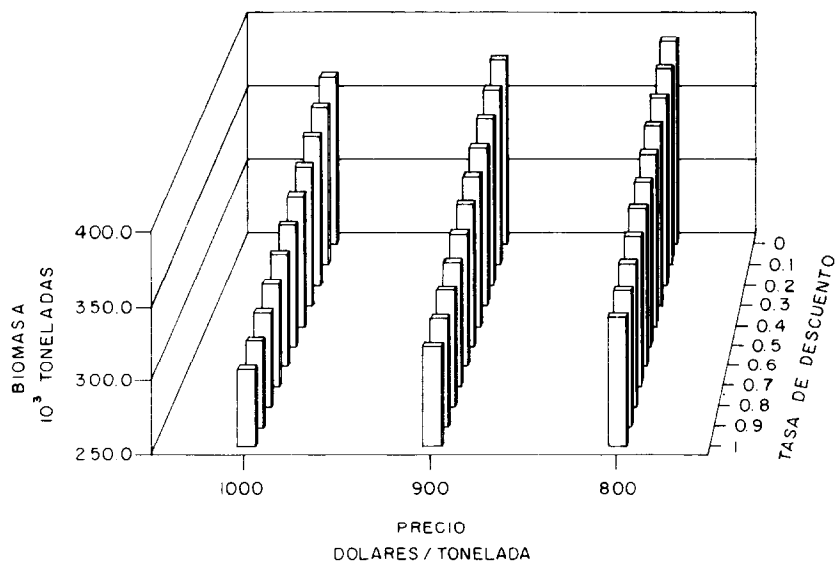


Figura 5. Biomasa óptima en función del precio (en dólares) por tonelada de atún y tasa de descuento. Modelo con coeficiente de capturabilidad variable.

Figure 5. Optimum biomass as a function of price (in dollars) per ton of tuna and discount rate. Model with variable catchability coefficient.

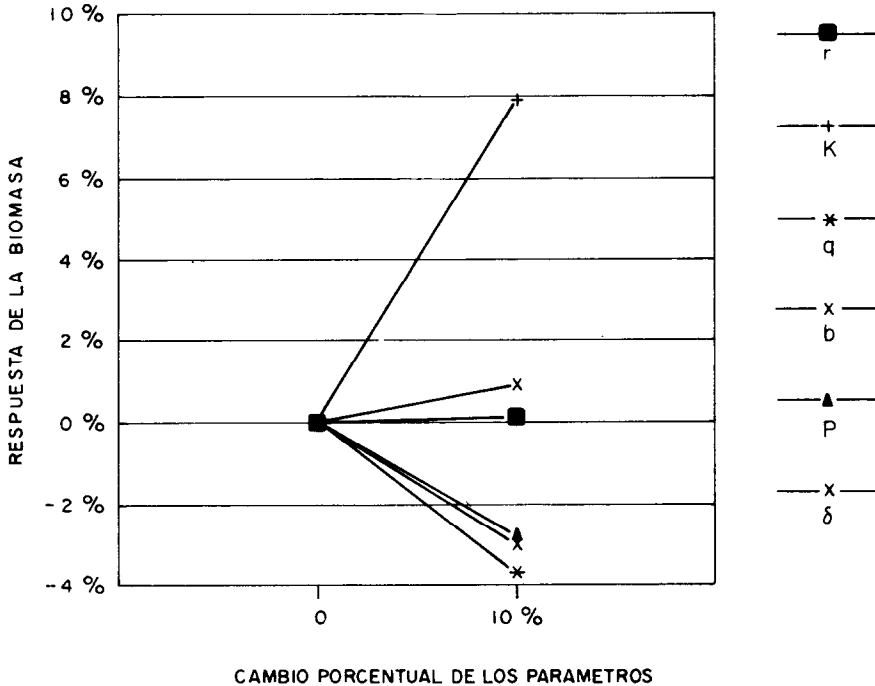


Figura 6. Análisis de sensibilidad. Cambio de la biomasa óptima como respuesta al cambio porcentual de los valores de los parámetros en un 10%.

Figure 6. Sensitivity analysis. Change of optimum biomass in response to a percentage change of the values of the parameters by 10%.

que olvidar que el esfuerzo de la flota mexicana está enfocado principalmente a la pesca asociada con delfines, con la que se obtienen mayores capturas por lance, que aumentan el coeficiente de capturabilidad. Se puede, eso sí, especificar que la medida o unidad de esfuerzo estándar utilizada en este trabajo es el DNP de una embarcación mexicana de mil toneladas o más de capacidad de acarreo. El índice de ajuste obtenido fue de 0.23, que se considera aceptable de acuerdo con Schnute (1977).

En términos de administración de los recursos pesqueros, algunos autores proponen que la regulación del esfuerzo pesquero es mejor que la de la captura (Sissenwine y Kirkley, 1982; Anderson, 1982; Beddington y Rettig, 1983). Sin embargo, la consideración fundamental es el control sobre la mortalidad por pesca y, de tal forma, se plantea que el esfuerzo pesquero y la mortalidad son directamente proporcionales. Esta relación implica las hipótesis de distribución homogénea del

the catchability coefficient. We can, however, specify that the measure or unit of standard effort used in this study is the SFD of a Mexican vessel with a carrying capacity of 1,000 tons or more. The index of adjustment obtained was 0.23, which is considered acceptable, according to Schnute (1977).

In terms of management of the fishery resources, some authors propose that fishing effort is better than catch (Sissenwine and Kirkley, 1982; Anderson, 1982; Beddington and Rettig, 1983). However, the basic consideration is the control over fishing mortality, and it is therefore proposed that fishing effort and mortality are directly proportional. This relation involves the hypotheses of homogeneous distribution of the resource in the area, random search of the resource by vessels and constant catchability coefficient, among others. However, the behaviour of association in schools of the yellowfin tuna is known, so the simple relation between effort, mortality, catch and abundance of the resource is not

recurso en su área, búsqueda al azar del recurso por las embarcaciones y coeficiente de capturabilidad constante, entre otras. Sin embargo, es conocido el comportamiento de asociación en cardúmenes del atún aleta amarilla, de manera que la relación simple entre esfuerzo, mortalidad, captura y abundancia del recurso no se cumple totalmente, y es importante realizar modificaciones o ajustes al modelar la dinámica de los recursos pesqueros. El emplear la captura por unidad de esfuerzo (CPUE) como índice de abundancia, sin las adecuaciones correspondientes al comportamiento del recurso, puede traer serias consecuencias en la administración del mismo. La agrupación del atún aleta amarilla en cardúmenes con distribución espaciotemporal en el OPO es más o menos definida (Arenas, CIAT; comunicación personal), lo que permite suponer que los pescadores emplean una estrategia de ajuste según la distribución espacial del recurso, buscando maximizar sus razones de captura, primeramente sobre las mayores concentraciones.

Esto permite emplear el concepto de perfiles de concentración (densidad) (Clark, 1985). Se argumenta que para especies de rápido desplazamiento o alta difusión, como es el caso de los túnidos, el perfil de concentración [$\rho(X)$ vs. X] es no lineal [$\rho'(X) > 0$, $\rho''(X) > 0$], convexo en el origen, y se denomina tipo I. Este tiende a ser de tipo lineal cuando la densidad es homogénea para todo tamaño de población en el área de distribución local, de acuerdo con la hipótesis del modelo de Schaefer. Sin embargo, para especies con comportamiento de agrupación en cardúmenes, corresponde la hipótesis de la manifestación de un perfil de concentración [$\rho(X)$ vs. X] no lineal, de tipo cóncavo en el origen [$\rho'(X) > 0$, $\rho''(X) < 0$], denominado tipo II, con el cual las CPUE disminuyen con más lentitud que la población, para niveles relativamente altos de ésta. Así, es erróneo asumir que la CPUE es proporcional a X , ya que esto implica q constante. Si el recurso tiene un comportamiento de tipo I, la población remanente se subestima progresivamente, mientras que si es del tipo II, la población se sobrestima. Esto explica que en los presentes resultados usando q variable, los tamaños de población óptima son menores que usando q constante, para niveles iguales de CPUE proporcional a $\rho(X)$.

totally fulfilled and it is important to make modifications or adjustments on modelling the dynamics of fishery resources. Using catch per unit effort (CPUE) as an index of abundance without appropriate adjustments to the behaviour of the resource, can have serious consequences for the management of the fishery. The grouping of yellowfin tuna into schools with spatiotemporal distribution in the EPO has been more or less defined (Arenas, CIAT, personal communication). It can therefore be assumed that fishermen use a strategy of adjustment according to the spatial distribution of the resource, looking to maximize their catch ratios, primarily on the highest concentrations.

Thus, the concept of profiles of concentration (density) can be used (Clark, 1985). It has been argued that for highly migratory species, as is the case of the tunas, the profile of concentration [$\rho(X)$ vs. X] is non-linear [$\rho'(X) > 0$, $\rho''(X) > 0$], convex at the origin, and called type I. This tends to be linear when the density is homogeneous for all population sizes in the area of local distribution, according to the hypothesis of the Schaefer model. However, for species that are found in schools the profile of concentration [$\rho(X)$ vs. X] is non-linear, concave at the origin [$\rho'(X) > 0$, $\rho''(X) < 0$], and called type II, with which the CPUE decreases more slowly than the population, for relatively high levels of population. Thus, it is erroneous to assume that CPUE is proportional to X , since this implies q constant. If the resource has a type I behaviour, the remaining population is progressively underestimated, whereas if it is of type II, the population is overestimated. This explains why in the present results the optimum population sizes are smaller using q variable than using q constant, for the same levels of CPUE proportional to $\rho(X)$.

Considering the discount rate, based on international values in dollars, between 6 and 10%, the optimum effort estimated varies between 10,816 and 12,169 SFD for q constant and between 8,254 and 9,600 SFD for q variable, within the range of prices and discount rates considered, with respective catch values of 221,500 and 250,000 tons, approximately. In comparison, the average level of effort applied in recent years is 21,306 SFD (1984-1990). This magnitude of effort, approximately twice the optimum calculated,

Al considerar la tasa de descuento, con base en valores internacionales en dólares, entre el 6 y 10%, el esfuerzo óptimo estimado varía entre 10,816 y 12,169 DNP para q constante y entre 8,254 y 9,600 DNP para q variable, dentro del intervalo de precios y tasas de descuento considerados, con valores de captura respectivos de 221,500 y 250,000 t, aproximadamente. En comparación, el nivel promedio de esfuerzo aplicado en años recientes es de 21,306 DNP (1984 a 1990). Esta magnitud de esfuerzo, de aproximadamente el doble del óptimo calculado, correspondería a un óptimo con tasas de descuento superiores al cien por ciento, equivalente a una situación de pesquería de acceso abierto con disipación de la renta y sobrecapitalización de la pesquería o sobrepesca económica.

Cabe aclarar que la localización, en términos de esfuerzo, de los puntos de interés bioeconómico se hizo con base en estimaciones de costos de operación de la flota mexicana y, por tanto, representa situaciones en que la flota mexicana fuera la única operando en el OPO o los costos fueran semejantes para todas las flotas. De no ser así, la ubicación real de estos puntos, sería diferente.

En un trabajo previo (Dreyfus y Manzo-Monroy, 1990), se estimaron los puntos de equilibrio bioeconómico estático de acceso abierto con los modelos de Schaefer y de Fox. Se determinó, para ambos casos, que las capturas en equilibrio en acceso abierto corresponden prácticamente a la captura máxima sostenible con el modelo de Schaefer (185,439 t) con un esfuerzo de 13,360 lances, lo cual se aproxima al intervalo de variación del esfuerzo aplicado para los años de 1983 a 1987. El hecho de considerar un coeficiente de capturabilidad variable en función de la población, dentro de los modelos que representan una mayor aproximación al comportamiento del perfil de concentración del atún, impone un freno al esfuerzo óptimo, y causa el mantenimiento de una población natural mayor y menores capturas que con un coeficiente constante. Esto se debe a que cada unidad de esfuerzo tiene un costo fijo, pero la captura, y por tanto los ingresos, disminuyen más rápidamente con q variable que con q constante.

La sensibilidad de la mayor respuesta positiva de la biomasa óptima (7%) con

would correspond to an optimum with discount rates higher than 100%, equivalent to a situation of open access fishery with dissipation of the income and overcapitalization of the fishery or economic overfishing.

It is necessary to point out that the location, in terms of effort, of the points of bioeconomic interest was made based on estimates of operative costs of the Mexican fleet and, therefore, represents situations in which the Mexican fleet were the only one operating in the EPO or costs were similar for all the fleets. Otherwise, the real location of these points would be different.

In a previous work (Dreyfus-León and Manzo-Monroy, 1990), the points of open access static bioeconomic equilibrium were estimated with the models of Schaefer and Fox. It was determined, in both cases, that the catches in open access equilibrium practically correspond to the maximum sustainable catch with the Schaefer model (185,439 tons) with an effort of 13,360 sets, which approaches the range of variation of the effort applied for the years 1983 to 1987. Considering a variable catchability coefficient as a function of population in the models that better represent the behaviour of the concentration profile of the tuna, puts a curb on the optimum effort and maintains a larger natural population and lower catches than with a constant coefficient. This is because each unit of effort has a fixed cost, but the catch, and therefore the income, decrease more rapidly with q variable than with q constant.

The sensitivity of the highest positive response of the optimum biomass (7%), with respect to variations of parameter K (10%), as opposed to the subsequent value of sensitivity of the biomass (<1%), with respect to r (10%), allows the assumption that the yellowfin tuna shows density dependent changes, especially for high values of the population size (Fowler, 1981). The negative response of the biomass to changes in price and, to a lesser degree, to the discount rate, indicates that the optimization of the objective function (to maximize the net utilities in time) depends more on immediate or short-term decisions than on the long-term consideration of the value of the utilities. This means that the net utilities are relatively small per unit of effort. Therefore, the effect of the discount in time is minimized.

respecto a variaciones del parámetro K (10%) a diferencia del subsiguiente valor de sensibilidad de la biomasa ($< 1\%$), con respecto a r (10%), permite suponer que el atún aleta amarilla muestra cambios densodependientes, en especial para valores altos del tamaño de población (Fowler, 1981). La respuesta negativa de la biomasa a los cambios de precio y, en menor grado, a la tasa de descuento indica que la optimización de la función objetivo (el de maximizar las utilidades netas en el tiempo) depende más de las decisiones a corto o inmediato plazo que de las consideraciones del valor de las utilidades a largo plazo. Esto significa que las utilidades netas son relativamente pequeñas por unidad de esfuerzo, por lo que el efecto del descuento en el tiempo se minimiza.

CONCLUSIONES

Los valores óptimos de esfuerzo (de 7,964 a 14,925 DNP) y de captura (de 216,817 a 267,544 t), para maximizar la renta neta en valor presente de la pesquería de atún aleta amarilla en el OPO son menores que los niveles de esfuerzo (24,000 DNP) determinados en otro estudio (CIAT, 1991) para la captura máxima sostenible.

Cuando la tasa de descuento es cero, el óptimo correspondiente es igual al rendimiento económico máximo estático; cuando la tasa de descuento tiende a infinito, los óptimos corresponden al punto de equilibrio bioeconómico de acceso abierto o de total disipación de la renta de la pesquería. Esto sucede generalmente cuando no existe administración de los recursos en forma alguna. Comparando los valores actuales promedio de esfuerzo aplicado y los niveles de captura, se estima que dicha pesquería tiende a este último punto (acceso abierto) y que el costo de oportunidad para el capital invertido y el trabajo es cercano al mínimo alternativo para mantenerse en la pesquería.

Los resultados de optimización presentan valores mayores de población para el caso en que se considera el coeficiente de capturabilidad como función inversa de la biomasa, contra el caso constante, y se estima como una mejor hipótesis de aproximación q variable, debido al comportamiento de agrupación en cardúmenes del atún aleta amarilla.

La variante del modelo de Schnute permite realizar una ponderación del esfuerzo y del índice de abundancia, considerando

CONCLUSIONS

The optimum values of effort (7,964 to 14,925 SFD) and catch (216,817 to 267,544 tons) to maximize the net income to present value of the yellowfin tuna fishery in the EPO, are lower than the levels of effort (24,000 SFD) determined in another work (CIAT, 1991) for the maximum sustainable catch.

When the discount rate is zero, the corresponding optimum is equal to the static maximum economic yield. When the discount rate tends to infinity, the optima correspond to the point of open access bioeconomic equilibrium or of total dissipation of the income of the fishery. This generally occurs when there is no management of the resources at all. Comparing the mean actual values of applied effort and the levels of catch, it is estimated that this fishery tends to this point (open access) and that the cost of opportunity for the capital and labour invested is close to the alternative minimum to remain in the fishery.

The results of optimization present higher values of population in the case where the catchability coefficient as an inverse function of biomass is considered, than in the constant case, and it is regarded a better hypothesis of q variable approximation, due to the behaviour of the yellowfin tuna of grouping into schools.

With the variant of the Schnute model it is possible to weight the effort and abundance index, considering variations of the geometric mean for long periods of time and different specific weights for successive periods.

English translation by Christine Harris.

variaciones de la media geométrica para periodos de tiempo largo y diferentes pesos específicos para periodos sucesivos.

REFERENCIAS

- Anderson, L.G. (1982). *The economics of fisheries management*. Johns Hopkins Univ. Press, Baltimore, 214 pp.
- CIAT (1991). Reporte anual, 1989. *Comisión Interamericana del Atún Tropical*, La Jolla, Ca., 271 pp.

- Beddington, J.R. and Rettig, R.B. (1983). Approaches to the regulation of fishing effort. **FAO Fish. Tech. Pap.**, 243.
- Beltrami, E.J. (1987). **Mathematics for dynamic modelling**, Academic Press.
- Clark, C.W. and Munro, G.R. (1975). Economics of fishing and modern capital theory: a simplified approach. **Journal of Environmental Economics and Management**, 2: 92-106.
- Clark, W.C. (1985). **Bioeconomic modelling and fisheries management**. John Wiley, 291 pp.
- Dorfman, R. (1969). An economic interpretation of optimal control theory. **American Economic Review**, pp. 817-831
- Dreyfus-León, M.J. y Manzo-Monroy, H.G. (1990). Aplicación de un modelo bioeconómico a la pesquería de atún aleta amarilla (*Thunnus albacares*) en el Océano Pacífico oriental. **Ciencias Marinas**, 16(3): 63-76.
- Fowler, C.W. (1981). Density dependence as related to life history strategy. **Ecology**, 62(3): 602-610.
- Fullenbaum, R.F. and Bell, F.W. (1974). A simple bioeconomic fishery management model: A case study of the American lobster fishery. **Fish. Bull.**, 72 (Jan.): 13-25.
- Gordon, H.S. (1954). The economic theory of a common-property resource: the fishery. **Journal of Political Economy**, (6): 124-142.
- Herfindahl, O.C. and Kneese, A.V. (1974). **Economic theory of natural resources**. Resources for the future Inc., C.E. Merrill Pub., 227 pp.
- Hudgins, L.L. (1986). **Development of the Mexican tuna industry 1976-1986**. Research report series (5). Pacific Island Development Program, Honolulu, Hawaii, pp. 1-42.
- MacCall, A.D. (1976). Density dependence of catchability coefficient in the California Pacific sardine, *Sardinops sagax*, purse seine fishery. **CALCOFI Rep.**, 18: 136-148.
- Nijkamp, P. (1977). **Theory and application of environmental economics**. Free University North Holland, Amsterdam, 332 pp.
- Quirk, J.P. and Smith, V.L. (1969). Dynamic economic models of fishing. In: A. Scott (ed.), **Economics of fisheries management: A symposium**. M.R. MacMillan Lectures in fisheries, University of British Columbia, Vancouver, pp. 3-32.
- Radovich, J. (1973). Catch-per-unit-effort: fact, fiction and dogma. **CALCOFI Rep.**, Vol. 18, May 1973, pp. 31-33.
- Schnute, J. (1977). Improved estimates from the Schaefer production model. Theoretical considerations. **J. Fish. Res. Board Can.**, 34: 583-603.
- Sissenwine, M.P. and Kirkley, J.E. (1982). Practical aspects and limitations of fishery management techniques. **Marine Policy**, 6: 43-56.