

**INTER-AMERICAN TROPICAL TUNA COMMISSION
COMISION INTERAMERICANA DEL ATUN TROPICAL**

Bulletin — Boletín

Vol. 16, No. 3

**TUNPØP, A COMPUTER SIMULATION MODEL OF THE
YELLOWFIN TUNA POPULATION AND THE SURFACE
TUNA FISHERY OF THE EASTERN PACIFIC OCEAN**

**TUNPØP, UN MODELO COMPUTADOR DE SIMULACION
DE LA POBLACION DEL ATUN DE ALETA AMARILLA Y
DE LA PESCA ATUNERA EPIPELAGICA DEL OCEANO
PACIFICO ORIENTAL**

**by — por
ROBERT C. FRANCIS**

La Jolla, California
1974

CONTENTS — INDICE

ENGLISH VERSION — VERSION EN INGLES

	Page
ABSTRACT.....	235
INTRODUCTION.....	235
THE SIMULATION MODEL.....	239
Introduction.....	239
Equations.....	240
Computer program structure.....	244
EXAMPLE RESULTS.....	244
SENSITIVITY ANALYSIS.....	247
SUMMARY AND CONCLUSION.....	248
ACKNOWLEDGMENTS.....	248
—————	
FIGURES — FIGURAS.....	249
—————	
TABLES — TABLAS.....	257

VERSION EN ESPAÑOL — SPANISH VERSION

	Página
EXTRACTO.....	259
INTRODUCCION.....	259
MODELO DE SIMULACION.....	263
Introducción.....	263
Ecuaciones.....	265
Estructura del programa de cómputo.....	268
EJEMPLOS DE LOS RESULTADOS.....	268
ANALISIS DE SENSIBILIDAD.....	272
SUMARIO Y CONCLUSION.....	273
RECONOCIMIENTO.....	273
—————	
LITERATURE CITED — BIBLIOGRAFIA CITADA.....	274
—————	
APPENDIX TABLES — TABLAS DEL APENDICE.....	276

**TUNPØP, A COMPUTER SIMULATION MODEL OF THE YELLOWFIN
TUNA POPULATION AND THE SURFACE TUNA FISHERY
OF THE EASTERN PACIFIC OCEAN**

by

Robert C. Francis

ABSTRACT

Mathematical documentation of TUNPØP, an age-structured computer simulation model of the yellowfin tuna population and surface tuna fishery of the eastern Pacific Ocean, is described. Example runs of the model are presented and discussed, and the sensitivity of the model output to changes in various parameters is examined.

INTRODUCTION

The staff of the Inter-American Tropical Tuna Commission (IATTC) is charged with the responsibility of conducting scientific studies on the tropical tunas inhabiting the eastern Pacific Ocean in order to recommend measures which would result in the maintenance of these stocks at levels which support the maximum yields on a sustained basis. These studies have covered a number of species of tuna but have concentrated most heavily on yellowfin (*Thunnus albacares*) and skipjack (*Katsuwonus pelamis*). From an early date it has been clear that fishing affects the abundance of yellowfin, but not that of skipjack. Models formulated by the Commission staff indicated that in the early 1960's the catches of yellowfin in the eastern Pacific were in excess of the estimated maximum amount that this stock could support on a sustained basis. In 1962 the Commission delineated an area within which recommendations for management of this stock would apply, the Commission Yellowfin Regulatory Area (CYRA, Figure 1). In 1966 a conservation program on yellowfin was established within the CYRA. This program, modified annually, is still in effect. Review of the motivation and evolution of the yellowfin management program is given by Joseph (1970).

The purpose of this paper is to provide the basic mathematical documentation of a computer simulation model of the yellowfin tuna population and the surface tuna fishery of the eastern Pacific Ocean. In addition, example runs of the model are presented and discussed, and the sensitivity of the output from the model to changes in various parameters is examined.

The objectives of the model, hereinafter referred to as TUNPØP, are threefold: (1) to investigate the yellowfin tuna population structure in the eastern Pacific Ocean; (2) to investigate the causes of changes in both the magnitude and size composition of the yellowfin catch in the CYRA

during recent years; (3) to study the potential yield of yellowfin in the CYRA under various management schemes.

Mathematical models which have traditionally been used for stock assessment and management by fisheries scientists can be categorized into two groups; stock production models and age-structured models.

Stock production models are used to attempt to relate directly the instantaneous rate of change of the stock biomass to the existing biomass level and the amount of fishing effort being applied to the stock at any instant in time. This type of model enables the investigator to estimate the proportion of the stock removed by a single unit of fishing effort, the intrinsic ability of the stock to increase and the maximum size that the stock could theoretically attain. Consequently this type of model can be used to predict the theoretical maximum yield that the stocks can support on a sustained basis, as well as the average yield under any given fishing intensity. Stock production models were first used in tuna research by Schaefer (1954, 1957) and were refined and expanded by Pella and Tomlinson (1969) and Fox (1970). The biological motivation for the logistic form of the stock production model is discussed by Pielou (1969). Models of this type are relatively easy to apply since all that is required as data is a time series of catch and effort statistics for the stock under investigation.

Three key population properties upon which the validity of a production model analysis rest are:

- 1) The population must be a distinct self-sustaining unit.
- 2) The population must tend to a stable size and age distribution at each level of fishing effort.
- 3) Each standard unit of effort must remove, on the average, a constant fraction of the population. In other words the probability that a given unit of effort encounters a given unit of the population is constant over time. Thus at any fixed level of population biomass, each unit of effort is assumed to be applied at a constant intensity and with a constant distribution over the exploited portion of the population age structure. In addition a constant fraction of the population is assumed to be available and vulnerable to the fishery at any time.

It is of interest to examine the eastern Pacific yellowfin fishery over the past ten years as it relates to these properties in order to determine how well suited for production model analysis this group of fish is. With respect to property 1), the fishery has expanded in area from a predominantly coastal fishery during the early 1960's to a present day fishery which covers a great proportion of the CYRA and areas to the west of the CYRA (Figure 2). Age-structured analyses (summarized later in this paper)

indicate that the proportion of the stock available to the fishery has increased with this offshore expansion of the effort. Thus there is some question as to whether the stock now being exploited is the same basic unit as that which was being exploited in earlier years.

With respect to property 2), the average size of fish in the catch has changed significantly for similar "near equilibrium" yields. In 1966 the catch of yellowfin within the CYRA was 182 million pounds and the average weight of fish in the catch was 22.4 pounds, whereas in 1967 the catch was 179 million pounds and the average weight of fish in the catch was 19.3 pounds. In 1970 the yield of yellowfin was 285 million pounds and the average weight of fish in the catch was 31.5 pounds whereas in 1971 the catch was 226 million pounds and the average weight of fish in the catch was 27.7 pounds. In 1967 and 1971, the two years of lesser average weights, large quantities of skipjack tuna were caught in the CYRA. During a year of good skipjack catches the fleet is concentrated more along the coastline of Central and South America where the skipjack concentrate and where surface schools of small yellowfin are encountered. Under these conditions the average weight of yellowfin in the catch tends to be relatively low. Contrastingly in 1966 and 1970 the fishery was distributed more in the offshore region of the CYRA where larger yellowfin are encountered predominantly with schools of porpoises. Under these conditions the average weight of yellowfin in the catch tends to be relatively high.

The following table gives the fraction of the total number of successful sets on yellowfin which were porpoise associated sets for each of the four years.

<u>Years</u>	<u>Fraction Porpoise Sets</u>
1966	0.59
1967	0.47
1970	0.53
1971	0.44

It thus appears that the average size of yellowfin in the CYRA catch is strongly affected by both the geographical distribution of the effort and the fishing mode (porpoise or non-porpoise) in which that effort is predominantly employed.

Finally, with respect to property 3), the catchability, or vulnerability of the available population to the fleet, appears to have changed with the refinement of purse-seine techniques and the movement of the fleet offshore. If the CYRA is divided into two areas (Figure 3), area A1 being the historic area of the fishery and area A2 the more recently exploited offshore area within the CYRA, then the following table of the percent of the total CYRA yellowfin catch and standardized effort within A2 sheds some light on the

above-mentioned problem. The estimates of effort have been adjusted or standardized for "apparent" changes in efficiency due to changes in successful set ratios.

<u>Year</u>	<u>Percent CYRA catch in A2</u>	<u>Percent CYRA standard effort in A2</u>
1962	0	0
1963	10	4
1964	17	10
1965	31	16
1966	34	20
1967	26	19
1968	27	18
1969	55	41
1970	44	37
1971	37	21
1972	58	45

It is apparent that the fraction of the total CYRA catch for A2 increased more rapidly than the fraction of the total CYRA standardized effort applied to A2. Assuming a unit stock within the CYRA, these data indicate that as the fleet expanded into area A2 the overall efficiency of the fleet, in terms of catchability, increased. It thus appears that production modeling techniques should be applied to the recent years of the eastern Pacific yellowfin fishery with some degree of caution.

Whereas stock production models represent the dynamics of stock biomass as a single unit, age-structured models use the relationships among growth, mortality and reproduction of the individual elements that make up the population to simulate stock biomass dynamics. The basic mathematical theory for these models was developed by Baranov (1918) and refined by Ricker (1945, 1958) and Beverton and Holt (1957) in attempts to relate the expected yield from a cohort of fish as it passes through a fishery to the interaction of growth, mortality and age at entry to the fishery. This type of model is commonly referred to as a "yield-per-recruit" model. Unfortunately, the traditional yield-per-recruit models of Ricker and Beverton and Holt fail to take into account variations in recruitment to a population, and therefore cannot be applied to represent the dynamics of total yield from a stock of fish being exploited over a period of time. TUNPØP is an attempt at expansion of age-structured modeling to investigate the long-term dynamics of abundance and age structure in a population subject to age-dependent exploitation and variable recruitment, the yellowfin tuna population of the eastern Pacific Ocean. In recent years similar models have been produced for other species by Walters (1969), Tillman and Paulik (1971), and Fox (1973).

THE SIMULATION MODEL

Introduction

The primary function of a population simulator such as TUNPØP is to describe accurately the manner in which population biomass varies over time. There are five basic mechanisms which operate in an exploited fish population to produce biomass flux: recruitment, growth, natural mortality, fishing mortality and graduation (Fig. 4). In a given unit time period these mechanisms operate as follows in TUNPØP. Recruitment, the addition of fish to the youngest age class represented in the simulator, is assumed to occur in a "knife-edge" fashion at the beginning of the unit time period. The magnitude of the recruitment can either be computed as a function of stock biomass during some previous time period or can be specified as input to the model. It should be noted that recruitment to the simulator can occur at the beginning of any unit time period over which a simulation is being made. In the examples presented later in the paper two annual cohorts, recruited at half-year intervals, are simulated simultaneously. In this case a unit time period is a quarter of a year, and thus recruitment occurs at the beginning of every other unit time period. Gross growth is the gross biomass added to the population by the process of individual fish growth during the unit time period. Thus gross growth refers to the total individual growth by both those fish which survive to the end of the unit of time and those fish which are removed from the population during that unit time period. For the latter it includes growth only up to the time of removal, of course. Individual fish growth is represented by empirical growth functions which are input to the model. Separate growth functions can be utilized for separate cohorts as they pass through the fishery. Thus in the examples employed later, separate growth functions are used for the two annual recruitment groups or cohorts whose joint dynamics are being simulated. Natural mortality refers to losses from all causes other than fishing and graduation from the oldest age class. Natural mortality rates occur as input to the model. Fishing mortality refers to losses from fishing. The ability to harvest fish depends on the interaction between the availability of the population to the fishery and vulnerability, or effectiveness, of the effort in capturing the available population. If a given fish is unavailable to the fishery at the beginning of the time unit it remains unavailable for the entire unit. Thus availability is defined in the sense of Ricker (1958) and Yamanaka (1961). During any unit time period the fish which are present at the beginning of the time period can be divided into two groups: unavailable and available, the former being acted upon only by natural mortality and the latter being acted upon by both natural and fishing mortality during the time period. Vulnerability, which when multiplied by fishing intensity, or effort, produces the fishing mortality rate, refers to the likelihood that a unit of effort encounters an available unit of the population in a unit of time. It is commonly referred to as the catchability coefficient. Finally,

graduation, the loss of fish from the oldest age group represented in the simulator, is assumed to occur in a "knife-edge" fashion at the end of the time period. Once a fish graduates from the simulated population it is no longer available to the fishery and is no longer considered in determining future recruitment levels.

The population of yellowfin is partitioned into 18 quarterly age classes. The first age class is determined by the youngest age at which fish appear in the eastern Pacific yellowfin fishery in significant numbers. Recruitment into the simulated fishery occurs when fish enter this age class at the beginning of their second year of life. An average recruit is assumed to weigh 3 pounds and have a fork length of 40 cm. The last age class contains the oldest fish which appear in the fishery in significant numbers and for which age can be determined by analysis of modal progressions. Thus graduation from the simulated fishery occurs when animals leave this age class in the middle of their sixth year of life. An average graduate is assumed to weigh 135 pounds and have a fork length of 145 cm.

All parameters are held constant over a unit time period, that interval of time that any individual animal spends in an age class. Thus in this case model parameters can only be varied on a quarterly basis. However, within a unit time period, computations are made on a continuous time basis. Thus to upgrade the time resolution of the model the population would have to be divided into more age classes, reducing the unit time period. The TUNPØP program is written so that the user can vary the length and/or number of time periods without changing the program. However the length of time that an animal spends in an age class must coincide with a unit time period in the simulator.

Equations

Since the basic structural unit of the simulated population is the age group, the algebraic manipulations which make the model function can be best understood if the computations performed to advance a group of fish through the unit time period (in this case a quarter of a year) that it spends in a given age group are revealed. Thus let

$\{t, t + 1\}$ = unit time period commencing at time t (an integer) and ending at time $t + 1$ during which a given cohort of fish is assumed to be of age i .

Assuming constant rates of growth, natural mortality, catchability and availability as well as constant application of effort during the unit time period, the state variables are computed as follows:

$$\begin{aligned} (1) \quad N_{i+1}(t + 1) &= \text{number of fish entering age group } i + 1 \text{ at time } t + 1 \\ &= \rho_i(t) N_i(t) e^{-Z_i(t)} + [1 - \rho_i(t)] N_i(t) e^{-M_i} \end{aligned}$$

where

$Z_i(t)$ = instantaneous unit time total mortality rate on age group i during $\{t, t + 1\}$

$$= F_i(t) + M_i,$$

$F_i(t)$ = instantaneous unit time fishing mortality rate on age group i during $\{t, t + 1\}$

$$= q_i(t)f(t),$$

$q_i(t)$ = catchability coefficient on age group i during $\{t, t + 1\}$ (INPUT),

$f(t)$ = number of standard days effort during $\{t, t + 1\}$ (INPUT),

M_i = instantaneous unit time natural mortality rate on age group i (INPUT),

$\rho_i(t)$ = fraction of $N_i(t)$ available to the fishery during $\{t, t + 1\}$ (INPUT).

(2) $B_i(t)$ = biomass entering age group i at time t

$$= N_i(t) w_i(t)$$

where

$w_i(t)$ = average weight of an individual at entry into age group i at time t (INPUT).

(3) $YN_i(t)$ = catch in numbers of age group i during $\{t, t + 1\}$

$$= \int_t^{t+1} \rho_i(t) F_i(t) N_i(x) dx$$

$$= \frac{\rho_i(t) N_i(t) F_i(t)}{F_i(t) + M_i} \left[1 - e^{-(F_i(t) + M_i)} \right]$$

(4) $YW_i(t)$ = catch in weight of age class i during $\{t, t + 1\}$

$$= \int_t^{t+1} \rho_i(t) F_i(t) B_i(x) dx$$

$$= \frac{\rho_i(t) F_i(t) B_i(t)}{G_i(t) - F_i(t) - M_i} \left[e^{(G_i(t) - F_i(t) - M_i)} - 1 \right]$$

where

$$\begin{aligned} G_i(t) &= \text{instantaneous growth rate of age class } i \text{ during } \{t, t+1\} \\ &= \ln \left[\frac{w_{i+1}(t+1)}{w_i(t)} \right]. \end{aligned}$$

Also note that

$$R(t) = N_i(t) = \text{number of fish recruited into age class } i \text{ at time } t.$$

In addition two more variables of interest are computed on each age group for each unit time period.

$$\begin{aligned} (5) \quad \bar{B}_i(t) &= \text{average biomass in age class } i \text{ during } \{t, t+1\} \\ &= \int_t^{t+1} B_i(x) dx \\ &= \frac{\rho_i(t) B_i(t)}{G_i(t) - F_i(t) - M_i} \left[e^{(G_i(t) - F_i(t) - M_i)} - 1 \right] \\ &\quad + \frac{(1 - \rho_i(t)) B_i(t)}{G_i(t) - M_i} \left[e^{(G_i(t) - M_i)} - 1 \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (6) \quad GG_i(t) &= \text{gross growth of age class } i \text{ during } \{t, t+1\} \\ &= GG1_i(t) + GG2_i(t) \end{aligned}$$

where

$$\begin{aligned} GG1_i(t) &= \text{total biomass added to age class } i \text{ by fish which survive } \{t, t+1\} \\ &= N_{i+1}(t+1) [w_{i+1}(t+1) - w_i(t)] \\ &= N_{i+1}(t+1) w_i(t) [e^{G_i(t)} - 1] \text{ and} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \mathbf{GG}2_i(t) = \text{total biomass added to age class } i \text{ by fish which die} \\
 & \text{during } \{t, t + 1\} \\
 & = \int_t^{t+1} [\rho_i(t)F_i(t) + M_i] N_i(x)w_i(t) [e^{G_i(t)(x-t)} - 1] dx \\
 & = \left\{ \begin{array}{l}
 [\rho_i(t)F_i(t) + M_i] N_i(t) W_i(t) \left\{ \rho_i(t) \left[\frac{1 + e^{-Z_i(t)}}{Z_i(t)} - \frac{1}{Z_i(t)} \right] \right. \\
 \quad \left. + (1 - \rho_i(t)) \left[\frac{e^{G_i(t)-M_i}}{G_i(t) - M_i} + \frac{e^{-M_i}}{M_i} - \frac{1}{G_i(t) - M_i} - \frac{1}{M_i} \right] \right\} \\
 \text{if } G_i(t) = Z_i(t). \\
 \\
 [\rho_i(t)F_i(t) + M_i] N_i(t) w_i(t) \left\{ \rho_i(t) \left[\frac{e^{G_i(t)-Z_i(t)}}{G_i(t) - Z_i(t)} + \frac{e^{-Z_i(t)}}{Z_i(t)} - \right. \right. \\
 \quad \left. \left. \frac{1}{G_i(t) - Z_i(t)} - \frac{1}{Z_i(t)} \right] + (1 - \rho_i(t)) \left[1 + \frac{e^{-M_i}}{M_i} - \frac{1}{M_i} \right] \right\} \\
 \text{if } G_i(t) = M_i. \\
 \\
 0 \\
 \text{if } Z_i(t) = 0. \\
 \\
 [\rho_i(t)F_i(t)] N_i(t) w_i(t) \left\{ \rho_i(t) \left[\frac{e^{G_i(t)-Z_i(t)}}{G_i(t) - Z_i(t)} + \frac{e^{-Z_i(t)}}{Z_i(t)} - \right. \right. \\
 \quad \left. \left. \frac{1}{G_i(t) - Z_i(t)} - \frac{1}{Z_i(t)} \right] + (1 - \rho_i(t)) \left[\frac{e^{G_i(t)}}{G_i(t)} + 1 - \frac{1}{G_i(t)} \right] \right\} \\
 \text{if } M_i = 0, F_i(t) \neq 0. \\
 \\
 [\rho_i(t)F_i(t) + M_i] N_i(t) w_i(t) \left\{ \rho_i(t) \left[\frac{e^{G_i(t)-Z_i(t)}}{G_i(t) - Z_i(t)} + \frac{e^{-Z_i(t)}}{Z_i(t)} \right. \right. \\
 \quad \left. \left. - \frac{1}{G_i(t) - Z_i(t)} - \frac{1}{Z_i(t)} \right] + (1 - \rho_i(t)) \right. \\
 \quad \left. \left[\frac{e^{G_i(t)-M_i}}{G_i(t) - M_i} + \frac{e^{-M_i}}{M_i} - \frac{1}{G_i(t) - M_i} - \frac{1}{M_i} \right] \right\} \\
 \text{otherwise.}
 \end{array} \right.
 \end{aligned}$$

Thus the population gross growth is simply the sum of the age-specific gross growths during that time interval. The reasons for computing gross growth are twofold. First it is of interest to look at the ratio of total biomass added to the population to total biomass removed from the population by both fishing and natural causes. Second, as TUNPØP may eventually be utilized as a population energetics simulator, a computation of gross growth must be made in order to subsequently compute the total amount of energy used by a population in the course of a unit time period.

Computer program structure

Figure 5 is a flow diagram of the procedure which binds the model inputs and age-specific computations together to produce the desired model output. The input to the model includes the basic time parameters, fishing parameters and variables (age- and time-specific availability and vulnerability and time-specific fishing effort), natural population parameters (age-specific natural mortality, time-specific recruitment, and time and age-specific size (weight) at entry into each age group). Initial values for the state variables must be specified in order to activate the model. The output from the model includes age-specific data on numbers, biomass, growth and yield for each unit time interval over which a simulation is made. Also, the average weight of a fish in the catch and the ratio of gross growth to losses in weight due to natural causes and fishing are given for each unit time interval. Finally, the model produces annual statistics of age-specific catch in numbers and weight.

EXAMPLE RESULTS

Two example runs of the model were made to attempt to mimic a six-year (1966-1971) history of quarterly age-specific yellowfin catch statistics in the CYRA. In run 1 quarterly variations in the level of fishing effort are taken into account in determining age-specific fishing mortality rates, whereas in run 2 these age-specific rates remain constant throughout the simulation.

For both runs the model input parameters were estimated utilizing quarterly statistics on catch, effort and size of the fish in the catch (length-frequency data) for 1966-1971. For each quarter of 1966 through 1971 the total catch of yellowfin from the CYRA was grouped into length intervals based upon data from length-frequency samples. For the purpose of this analysis two recruitment groups were assumed to enter the fishery each year. Modal groups from the length-frequency samples were assigned to one of two categories, designated X and Y, on the basis of their recruitment dates into the fishery. Recruitment is defined to occur when a fish attains the length of 40 cm (approx. 1 year old). Utilizing back-calculations by means of growth curves, fish which were estimated to have been recruited during the first six months of a year were assigned to the X group and fish which were estimated to have been recruited during the second six months of a year were assigned to the Y-group. Thus each quarter's catch is segmented into both X and Y age distributions. The concept of X and Y groups was introduced by Hennemuth (1961) although in this study the fish were assigned to the groups in a slightly different manner. The age-length relationships (slight differences between the X and Y groups) used to transform the length-frequency samples to age-frequency samples (annual X and Y age groups) were estimated by Tom-

linson (personal communication). Estimates were then made of the quarterly age-(cohort)-specific catches for the years of concern by combining the age-frequency samples with the quarterly catch statistics. The Murphy technique (Tomlinson, 1970) was then used with these age-specific catch data to estimate the quarterly age-specific fishing mortality rates ($F_i(t)$) and year class abundances ($N_i(t)$). Quarterly age specific catchability coefficients ($q_i(t)$) were then computed by dividing the fishing mortality rates by the quarterly estimates of standardized fishing effort ($f(t)$). The Murphy analyses were performed for the X and Y groups separately under the assumption that the instantaneous natural mortality rate (M) was constant at 0.8 on an annual basis for both groups.

Simulations were made over a 24-quarter (6-year) time span (1966-1971). Estimates of recruitment to the fishery, in millions of fish, derived from the previously mentioned Murphy analysis, are as follows:

<u>Year</u>	<u>X-group</u>	<u>Y-group</u>
1966	33.3	17.2
1967	19.1	24.3
1968	13.7	17.6
1969	19.5	20.3
1970	20.0	19.7
1971	21.4	17.5
Overall average	21.2	20.6

These values are direct input to the simulations. Estimates of the quarterly fishing effort were derived from mean catch per unit of effort estimates for those 5° squares in the CYRA where predominantly yellowfin was caught. These values of CPUE were divided into the corresponding total quarterly CYRA yellowfin catch statistics to give estimates of total effective standardized yellowfin effort (Table 1). Thus when all of these estimates are employed in the simulation unmodified, the output consists of the exact catches obtained from the length frequency-catch statistics analysis, since the simulator is structurally similar to the basic Murphy model.

In the first run of the model, mean values of age-specific catchability ($\bar{q}_i; i = 1, \dots, 18$) estimated by the Murphy model were employed for the X and Y groups (Table 2). These values were then combined with the quarterly estimates of yellowfin effort to produce quarterly age-specific fishing mortality rates. In the second run of the model, mean values of age-specific fishing mortality rates ($\bar{F}_i; i = 1, \dots, 18$) estimated by the Murphy model were computed and employed directly, again using separate X and Y group means (Table 2). In both runs all availability rates were equated to unity.

Examples of the three basic categories of model output are given in Appendix I. These three are 1) a listing of all input variables and parameters, 2) output from a unit time period simulation, 3) output from a year's simulation. All output is summarized by X and Y groupings as well as the combination of the two. The final table of the unit time period output gives the ratio of biomass removed from the population by fishing and natural death to the combination of gross growth plus recruitment to age class 1 minus emigration from age class 18. The final table of the annual output section gives the gross annual changes in population biomass due to five sources: Increases due to recruitment and growth, and decreases due to fishing, natural death and graduation. In addition the net annual change in population biomass is given.

Graphs of the quarterly catch in number and weight and average weight in the catch are given in Figures 6, 7 and 8. Using the criterion for goodness of fit of sums of squared deviations, the following results were obtained:

a) The sum of squared deviations of observed from simulated quarterly age-specific catch in numbers was 55 percent lower for Run 2 than Run 1.

b) The sum of squared deviations of observed from simulated quarterly age-specific catch in weight was 54 percent lower for Run 2 than Run 1.

c) The sum of squared deviations of observed from simulated quarterly average weight in the catch was 74 percent higher for Run 2 than Run 1.

From a linear regression of the form $Z = a + bW$ between the simulated age-specific catch in numbers (Z) and the observed age-specific catch in numbers (W) to assay the model bias, it appears that whereas in Run 2 one obtains a consistent over-estimate of the observed by the simulated (*i.e.* " b " not significantly different from one and " a " significantly greater than zero), in Run 1 a bias exists which is not consistent (*i.e.* " b " significantly different from one) over the range of observed age-specific catches. It would thus appear in this case that while the magnitude of the catch in those age classes which contributed most heavily to the total catch in numbers and total catch in weight can be simulated adequately by applying constant age-specific fishing mortality rates (*i.e.* not taking into account the year to year fluctuations in quarterly effort), the variation in the relative contributions of the various age groups to the catch can be more adequately described by taking into account the interaction between constant age-specific vulnerability (catchability) and variable effort to generate a variable time series of age-specific fishing mortality rates. Figure 9 gives the quarterly sum of squared deviations of observed from simulated catch in numbers for the years 1966-1971 for the X and Y groups sep-

arately. This figure gives some indication of within and between year variability in the accuracy of the two simulations. It is interesting to note that for both the X and Y groups in Run 1, the simulated catch tends to deviate most markedly from the observed catch at times when the average size in the catch is reduced (Figure 8). Of course these are the times when the greatest numbers of fish are caught and thus one would expect the deviations of catch in numbers to be relatively high. However it also might indicate that the model, as structured, is relatively insensitive to the annual and seasonal fluctuations in small fish abundance and/or availability. From the results of these runs it appears that to improve the accuracy of the model under constant age-specific catchability coefficients 1) better estimates of yellowfin effort must be obtained, and 2) time and age-specific availability factors must be employed in the model.

SENSITIVITY ANALYSIS

An analysis was performed to examine the sensitivity of the model output to systematic changes in input parameters and independent variables. Three output variables were utilized: annual catch in numbers, annual catch in weight, and annual average weight in the catch.

Let

x = input variable or parameter with respect to which the sensitivity analysis is being performed

$y(x)$ = output variable which is to measure the sensitivity of the model to changes in x , and

Δx = change in x to be simulated.

Then

$$\begin{aligned} S(x,y,\Delta x) &= \text{net sensitivity of } y \text{ to a change, } \Delta, \text{ in } x \\ &= \frac{y(x + \Delta x) - y(x)}{y(x)} \end{aligned}$$

The ambient conditions from which the input variables and parameters were systematically varied were those values used in Run 2 of the previous section. Constant annual X- and Y-group recruitments (21.2 million and 20.6 million fish annually to the X- and Y-groups respectively) were used so that all yield values could be computed under equilibrium conditions. Thus letting

$y_1(x)$ = annual equilibrium catch in numbers

x = instantaneous natural mortality rate

Δx = $0.10x$

then

$S(x, y_1, \Delta x)$ = fraction change in annual equilibrium catch in numbers in response to a 10% increase in natural mortality.

The sensitivity of annual equilibrium catch in numbers, catch in weight, and average weight in the catch was tested with respect to

- 1) annual age-specific catchability coefficients
- 2) fishing effort (fishing mortality)
- 3) recruitment
- 4) natural mortality
- 5) availability

The results of the analysis are presented in Table 3. In the general vicinity of the values of the model input variables and parameters utilized in Run 2, the output from the fishery, in particular yield in weight, appears to be much more sensitive to changes in recruitment and natural mortality than it is to changes of a similar magnitude in availability, age-specific catchability, or fishing intensity (effort).

It is interesting to note that a 10-percent decrease in availability produces a 17 percent greater decrease in equilibrium catch in weight than does a 10-percent decrease in fishing effort. Also a 10-percent change in natural mortality produces a larger than 10-percent change in the equilibrium yield in weight. Finally, it appears that in the vicinity of the values of the model input values and parameters used in Run 2, the equilibrium output from the fishery is more sensitive to changes in catchability on age 3 fish than on any other annual age group.

SUMMARY AND CONCLUSION

The purpose of this paper was to provide the basic reference document for TUNPØP, a computer simulation model of the yellowfin tuna population and surface fishery in the eastern Pacific Ocean. In addition example runs of the model and the results of a limited sensitivity analysis were presented. It is hoped that this model will aid in the revelation of the basic structure of the yellowfin tuna population in the eastern Pacific and its response to exploitation by the surface fishery in recent years.

ACKNOWLEDGMENTS

The author is most grateful to Dr. William Bayliff, Inter-American Tropical Tuna Commission, Mr. Joseph Greenough, National Marine Fisheries Service, and Dr. Robin Allen, Fisheries Research Division, New Zealand Ministry of Agriculture and Fisheries, for their helpful comments on the manuscript.

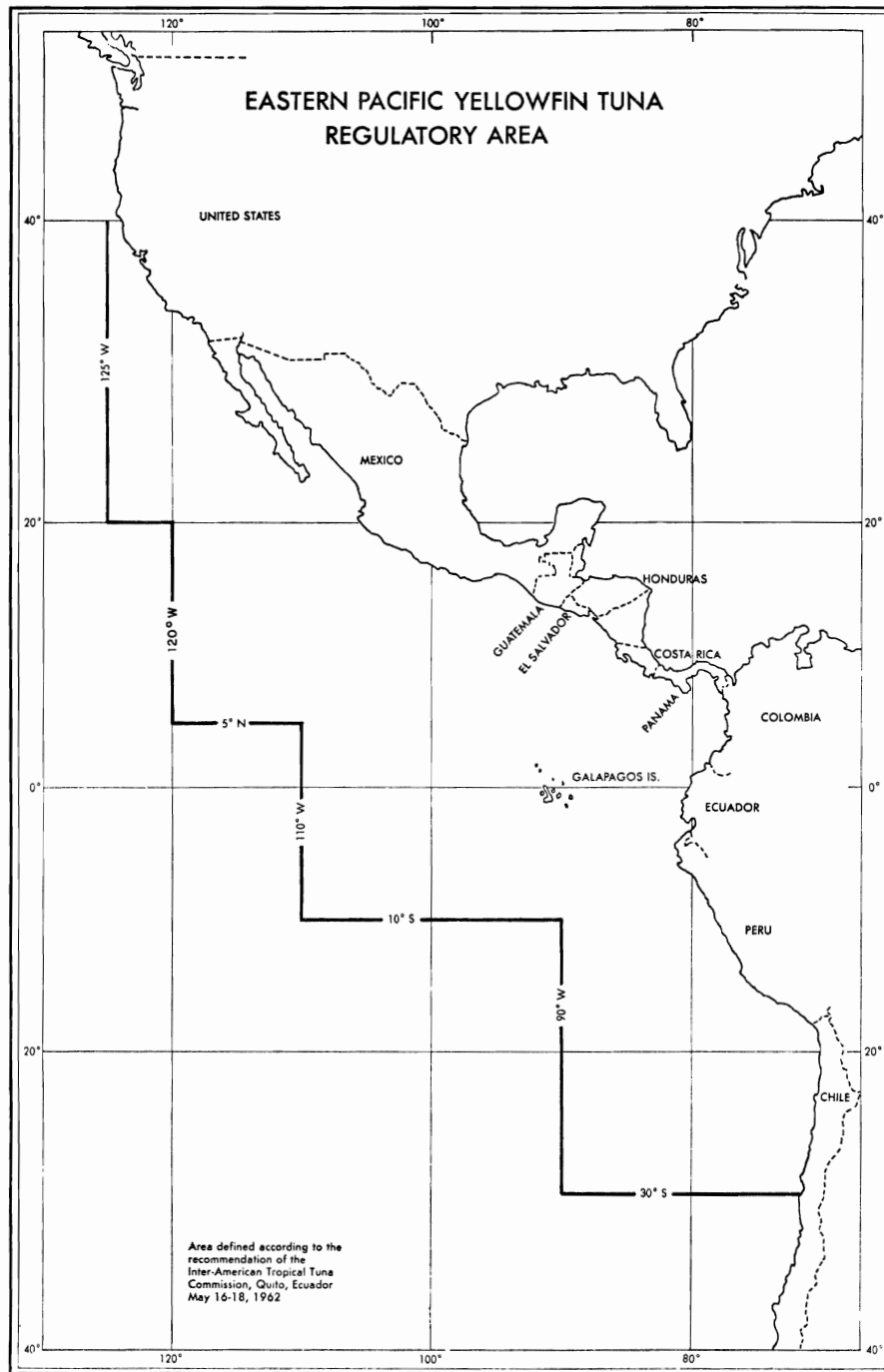


FIGURE 1. Commission Yellowfin Regulatory Area—CYRA.

FIGURA 1. Area Reglamentaria de la Comisión de Atún Aleta Amarilla—ARCAA.

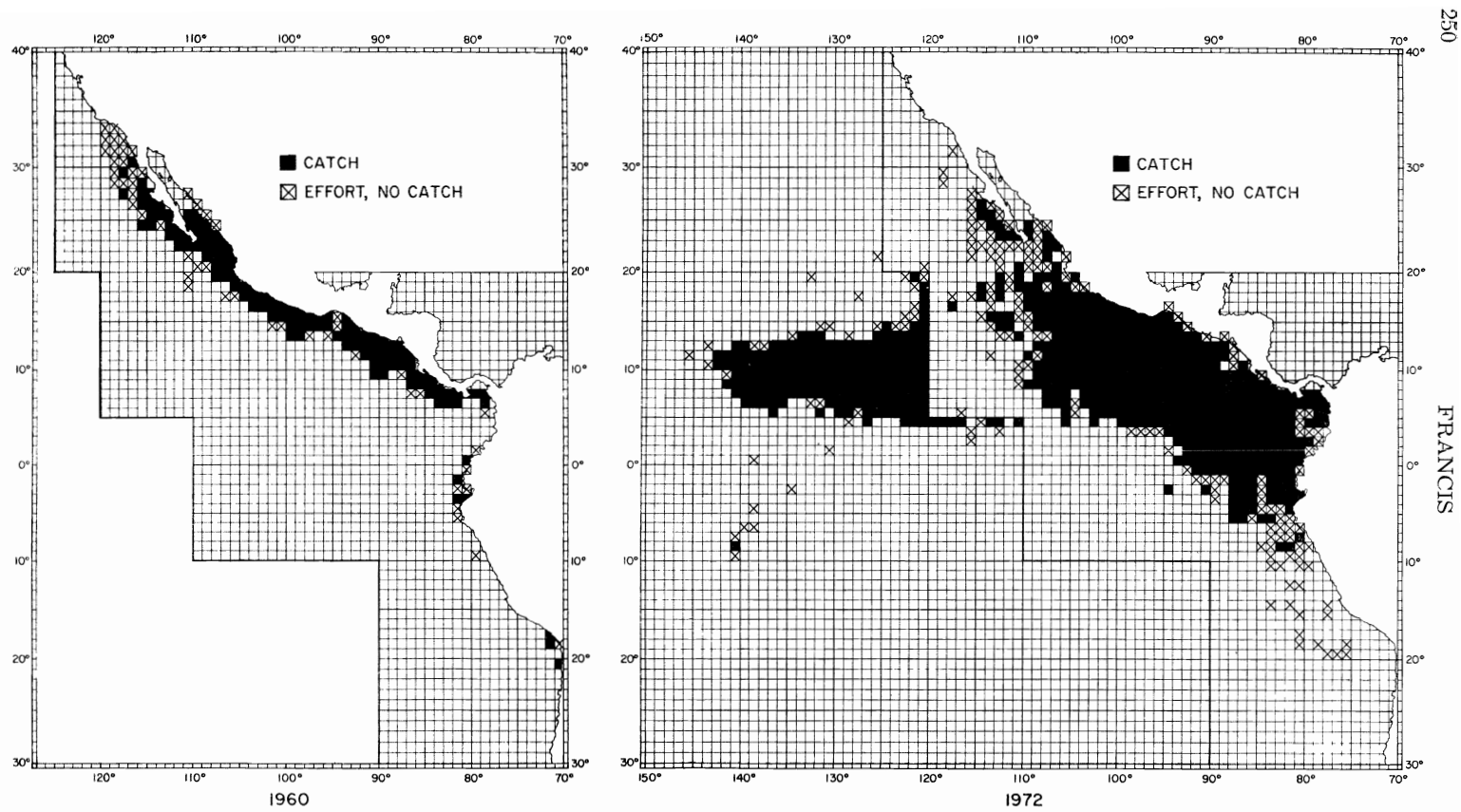


FIGURE 2. Areas of exploitation in 1960 and 1972.

FIGURA 2. Areas de explotación en 1960 y 1972.

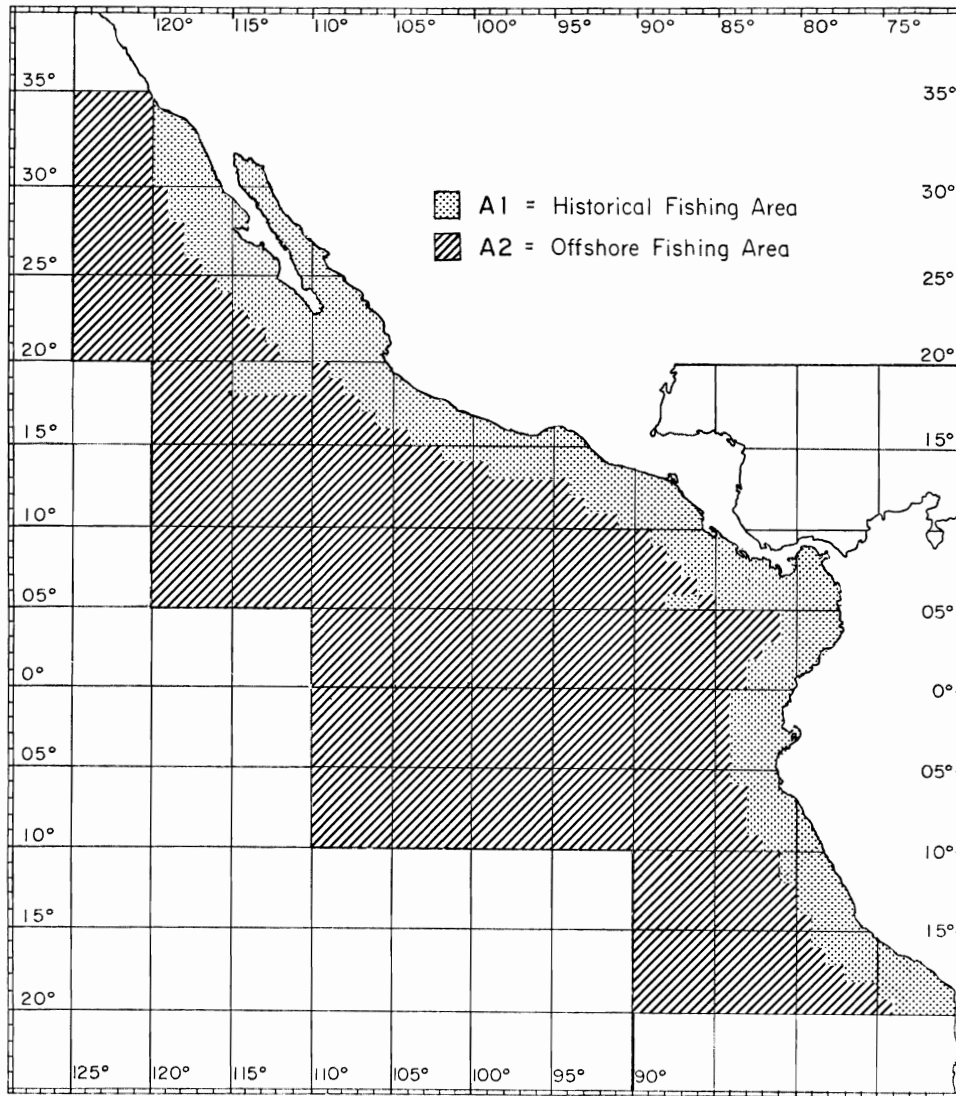


FIGURE 3. Historical and offshore fishing areas.

FIGURA 3. Areas de pesca históricas y fuera de la costa.

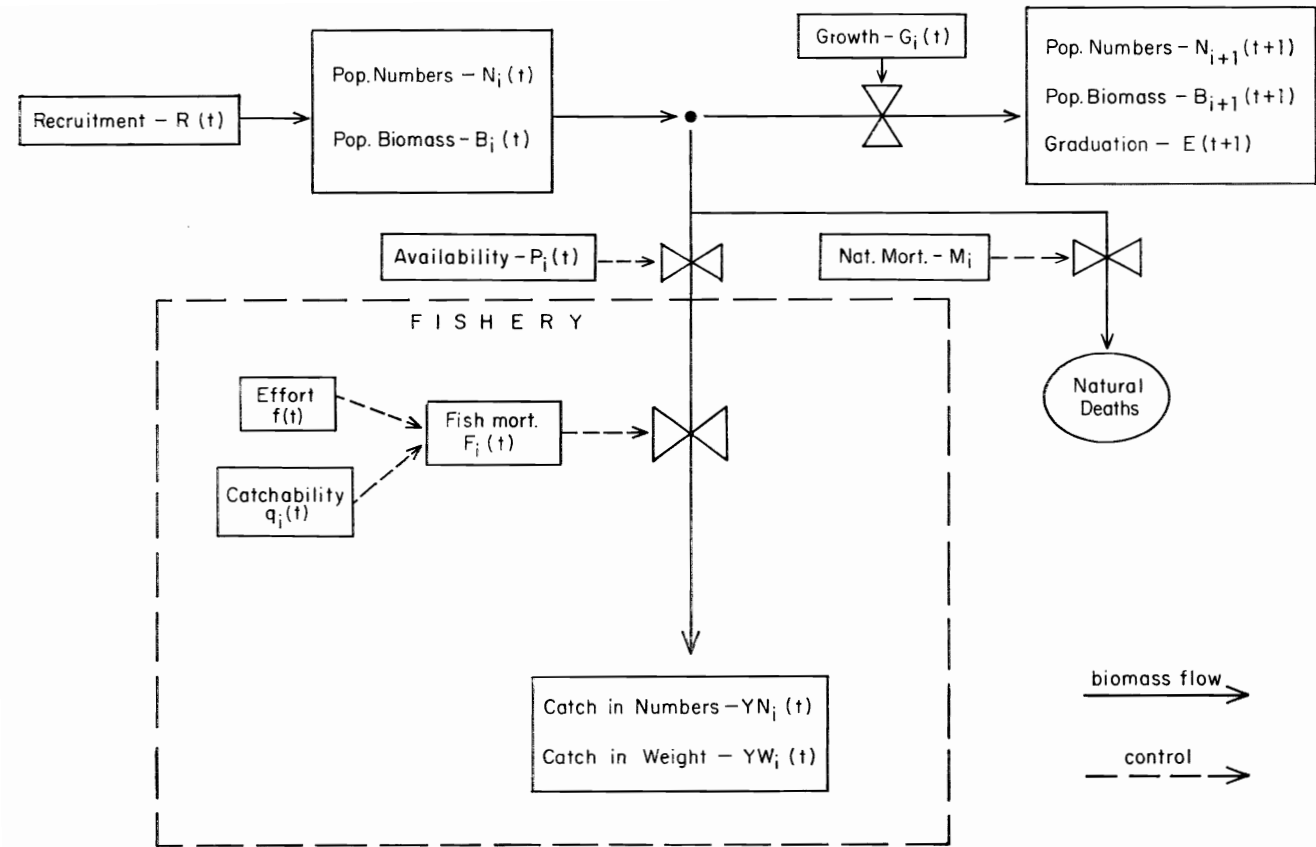


FIGURE 4. Basic TUNPØP mechanisms.

FIGURA 4. Mecanismos básicos de TUNPØP.

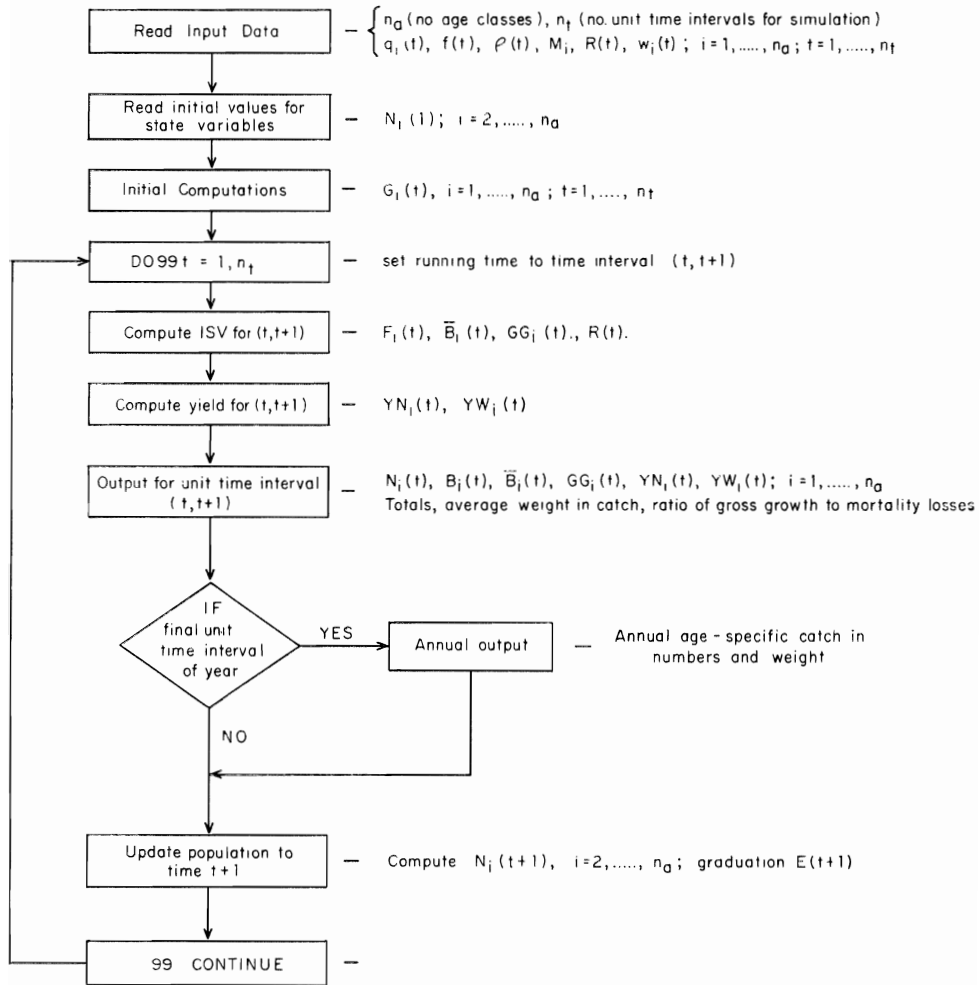


FIGURE 5. Flow diagram of TUNPØP computer program.

FIGURA 5. Organigrama del programa de cómputo TUNPØP.

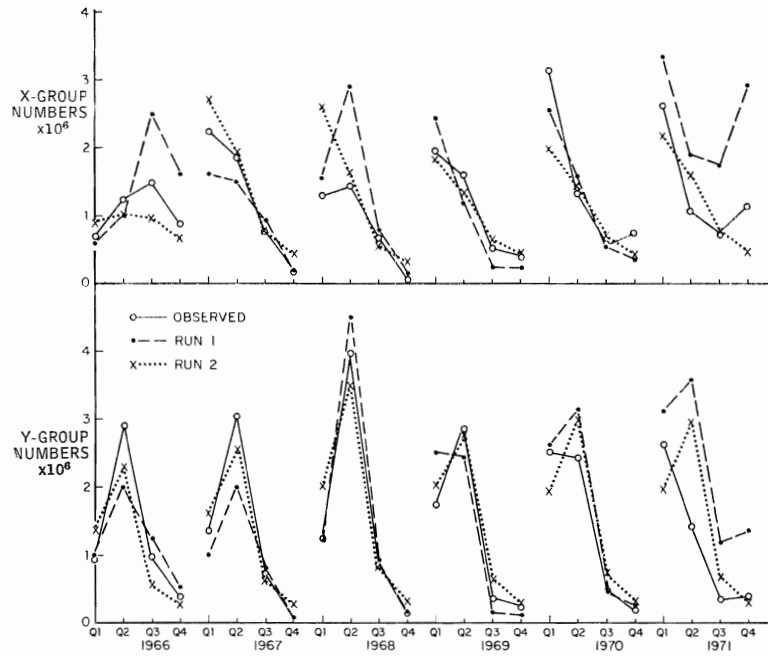


FIGURE 6. Quarterly catch in numbers.

FIGURA 6. Captura trimestral en cantidades.

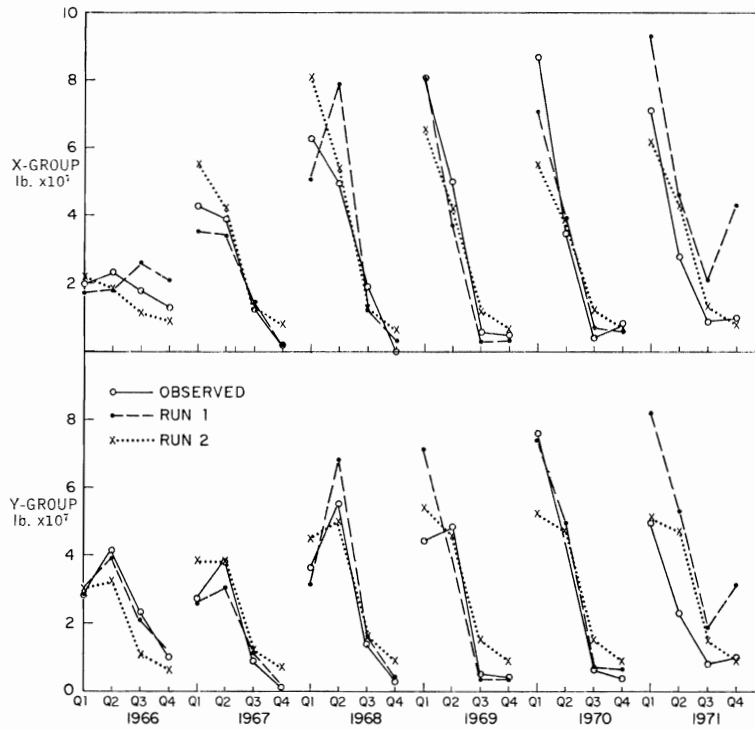


FIGURE 7. Quarterly catch in weight.

FIGURA 7. Captura trimestral en peso.

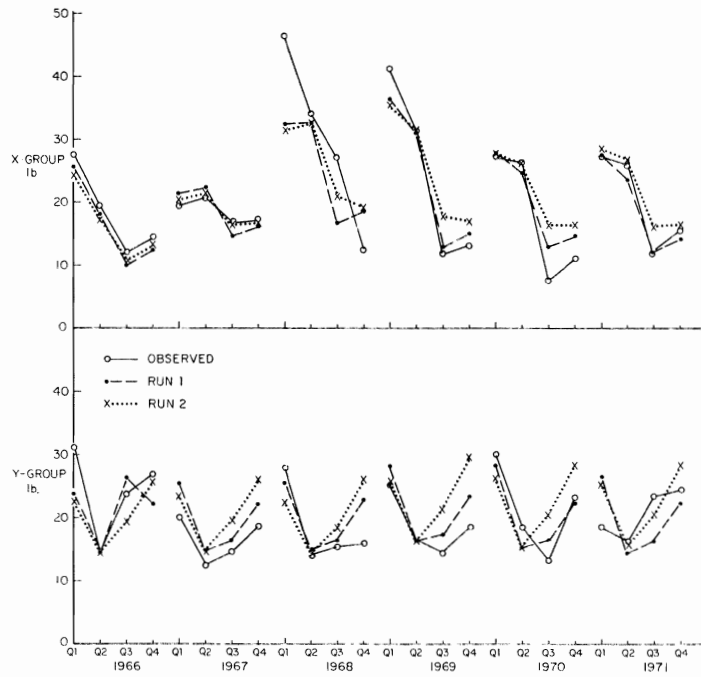


FIGURE 8. Quarterly average weight in the catch.
FIGURA 8. Peso promedio en la captura trimestral.

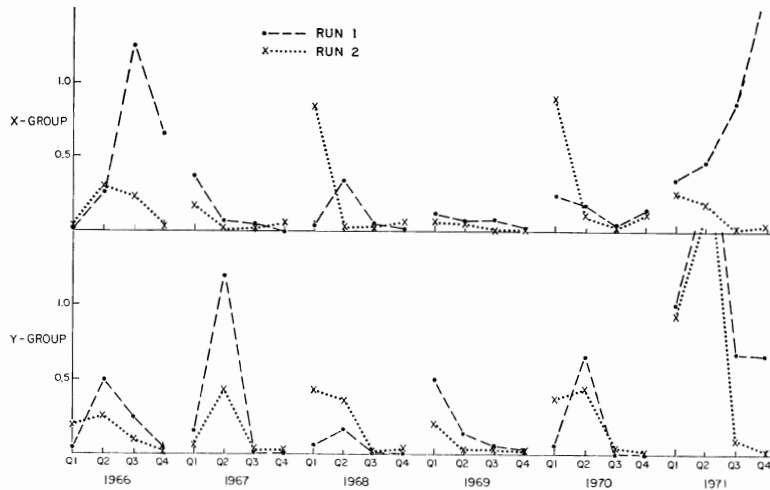


FIGURE 9. Sum of squared deviations of observed from simulated quarterly age-specific catch in numbers.
FIGURA 9. Suma de las desviaciones cuadradas de la captura trimestral en cantidades, observada a edad específica con relación a la simulada.

TABLE 1. Estimates of standard size-class 3* fishing days for TUNPØP Run 1.**TABLA 1.** Estimaciones de los días de pesca de la clase 3* de arqueo en la 1ra. pasada de TUNPØP.

YEAR — AÑO	QUARTER — TRIMESTRE			
	1	2	3	4
1966	7,992	6,494	6,214	4,231
1967	7,008	5,616	2,807	554
1968	5,891	9,414	3,128	803
1969	12,867	6,619	741	723
1970	13,786	8,109	1,676	1,405
1971	17,971	10,351	5,806	12,373

* See Shimada & Schaefer (1956) for size-class definition.
 Véase Shimada y Schaefer (1956) para la definición de las clases de arqueo.

TABLE 2. Mean age-specific quarterly catchability coefficients and instantaneous fishing mortality rates (1966-1971).**TABLA 2.** Coeficientes de la media de la edad específica trimestral de la captu- rabilidad, e índices de la mortalidad instantánea por pesca (1966-1971).

Quarterly age Edad trimestral	$\bar{q}_i \times 10^{-7}$		\bar{F}_i	
	X	Y	X	Y
1	0	2	.0005	.0005
2	29	8	.0210	.0025
3	206	56	.0451	.0689
4	277	422	.0431	.3162
5	193	448	.2097	.1114
6	282	377	.1996	.0549
7	191	365	.0519	.3585
8	99	317	.0191	.2456
9	448	199	.4457	.1041
10	579	180	.4152	.0701
11	148	454	.0728	.4332
12	149	336	.0228	.2486
13	381	81	.3922	.0701
14	361	102	.2708	.0788
15	75	241	.1081	.2347
16	36	184	.0516	.1573
17	0	16	0	.0226
18	0	0	0	0

TABLE 3. Sensitivity of annual equilibrium catch variables to systematic changes in model input parameters and variables.

TABLA 3. Sensibilidad de las variables de la captura anual de equilibrio, con relación a los cambios sistemáticos de los parámetros y variables en la entrada del modelo.

x	Δx	$S(x, y_i, \Delta x)$		
		y_1	y_2	y_3
$q_i; i = 1, \dots, 4$ (year 1)	$-.10x$	$-.023$	$+.005$	$+.028$
	$+.10x$	$+.025$	$-.005$	$-.030$
$q_i; i = 5, \dots, 8$ (year 2)	$-.10x$	$-.023$	$-.002$	$+.022$
	$+.10x$	$+.022$	$+.001$	$-.020$
$q_i; i = 9, \dots, 12$ (year 3)	$-.10x$	$-.008$	$-.012$	$-.004$
	$+.10x$	$+.007$	$+.011$	$+.003$
$q_i; i = 13, \dots, 16$ (year 4)	$-.10x$	$-.002$	$-.007$	$-.006$
	$+.10x$	$+.002$	$+.007$	$+.005$
f	$-.10x$	$-.056$	$-.019$	$+.040$
	$+.10x$	$+.051$	$+.013$	$-.037$
R	$-.10x$	$-.100$	$-.100$	$=$
	$+.10x$	$+.100$	$+.100$	$=$
$M_i; i = 1, \dots, 18$	$-.10x$	$+.110$	$+.160$	$+.045$
	$+.10x$	$-.097$	$-.135$	$-.042$
$\rho_i; i = 1, \dots, 18$	$-.10x$	$-.063$	$-.023$	$+.043$

y_1 = annual equilibrium catch in numbers
equilibrio anual de captura en cifras

y_2 = annual equilibrium catch in weight
equilibrio anual de captura en peso

y_3 = annual equilibrium average weight in the catch
peso promedio del equilibrio anual de captura.

TUNPØP, UN MODELO COMPUTADOR DE SIMULACION DE LA POBLACION DEL ATUN DE ALETA AMARILLA Y DE LA PESCA ATUNERA EPIPELAGICA DEL OCEANO PACIFICO ORIENTAL

por

Robert C. Francis

EXTRACTO

Se describe la documentación matemática de TUNPØP, un modelo computador de simulación basado en la edad de la población del atún aleta amarilla y de la pesca atunera epipelágica del Océano Pacífico oriental. Se presentan y se discuten ejemplos de las pasadas del modelo, y se examina la sensibilidad de los resultados de salida con relación a los cambios de varios parámetros.

INTRODUCCION

Los investigadores de la Comisión Interamericana del Atún Tropical (CIAT) tienen a su cargo la responsabilidad de realizar estudios científicos sobre los atunes tropicales que habitan el Océano Pacífico oriental, con el fin de recomendar las medidas que servirán para la conservación de estas existencias a niveles que puedan soportar una producción máxima en forma continua. Estos estudios han abarcado un número de especies de atunes pero se han concentrado especialmente en el atún aleta amarilla (rabil) (*Thunnus albacares*) y el barrilete (listado) (*Katsuwonus pelamis*). Desde hace mucho tiempo ha sido evidente que la pesca afecta la abundancia del aleta amarilla, pero no la del barrilete. Los modelos formulados por la Comisión indicaron que a principios del decenio de 1960 las capturas de aleta amarilla en el Pacífico oriental excedían la cantidad máxima estimada que esta población podía soportar en una forma continua. En 1962, la Comisión designó un área a la cuál se debían aplicar las recomendaciones para administrar esta población, el Area Reglamentaria de la Comisión de Atún Aleta Amarilla (ARCAA, Fig. 1). En 1966, se estableció en el ARCAA un programa de conservación sobre esta especie. Este programa, modificado anualmente, sigue vigente. Un examen del motivo y evolución del programa administrativo del aleta amarilla fue presentado por Joseph (1970).

El propósito de este estudio es suministrar la documentación básica, matemática, de un modelo computador de simulación de la población del aleta amarilla y de la pesca atunera epipelágica del Océano Pacífico oriental. Además, se presentan y discuten ejemplos de pasadas del modelo y se examina la sensibilidad de los resultados de salida con relación a los cambios de varios parámetros.

El objetivo del modelo, llamado de ahora en adelante TUNPØP, es triple: (1) investigar la estructura de la población del atún aleta amarilla en el Océano Pacífico oriental; (2) investigar las causas de los cambios tanto en magnitud como en la composición de talla de la captura de esta especie en el ARCAA durante los últimos años; (3) estudiar bajo varios esquemas administrativos el rendimiento potencial del aleta amarilla en el ARCAA.

Los modelos matemáticos que los investigadores pesqueros han usado tradicionalmente para evaluar y administrar las poblaciones de peces, pueden catalogarse en dos grupos; modelos de producción de la población y modelos de la estructura de la edad.

Los modelos de producción de la población se emplean para tratar de relacionar directamente el índice instantáneo de cambio de la biomasa de la población al nivel de la biomasa existente y la cantidad de esfuerzo de pesca que se aplica a la población en cualquier momento de tiempo. Este tipo de modelo capacita al investigador a estimar la proporción que ha sido removida de la población por una unidad individual de esfuerzo de pesca, la habilidad intrínseca de la población a aumentar y el volumen máximo que la población puede teóricamente alcanzar. Por lo consiguiente, este tipo de modelo puede emplearse para pronosticar el rendimiento teórico, máximo, que la población puede sostener en forma continua, como también el promedio de producción bajo cualquier intensidad pesquera determinada. Los modelos de producción de la población fueron primero usados en la investigación atunera por Schaefer (1954, 1957) y fueron refinados y ampliados por Pella y Tomlinson (1969) y Fox (1970). El motivo biológico de la forma logística del modelo de producción de la población es discutido por Pielou (1969). Los modelos de este tipo son relativamente fáciles de aplicar ya que lo único que se necesita en cuanto a datos es una serie cronológica de las estadísticas de captura y esfuerzo de la población que se está investigando.

Tres propiedades claves de la población, sobre la que se basa la validez del análisis de un modelo de producción son:

- 1) La población debe ser una unidad precisa autónoma.
- 2) La población debe inclinarse a tener un volumen y una distribución de edad estable a cada nivel del esfuerzo de pesca.
- 3) Cada unidad normal de esfuerzo debe capturar, en promedio, una fracción constante de la población. En otras palabras, la probabilidad de que una unidad determinada de esfuerzo encuentre una unidad determinada de población, es constante durante el tiempo. Así, a cualquier nivel fijo de la biomasa de la población, se supone que cada unidad de esfuerzo se aplica a una intensidad constante y con una distribución constante sobre la porción explotada de la estructura de edad de la población. Se supone

además que una fracción constante de la población es accesible y vulnerable a la pesca en cualquier momento.

Es interesante examinar la pesca de aleta amarilla del Pacífico oriental durante los 10 últimos años, con respecto a estas propiedades, con el fin de determinar qué tan apropiada es esta especie para el análisis del modelo de producción. Con respecto a la 1) propiedad, la pesca se ha extendido, en área, de una pesca predominantemente costera durante el principio del decenio de 1960 a la pesca actual que abarca una gran proporción del ARCAA y de las áreas al oeste del ARCAA (Fig. 2). El análisis de la estructura de la edad (sumarizado más adelante en este estudio) indica que la proporción de la población accesible a la pesca ha aumentado con la expansión del esfuerzo fuera de la costa. Por lo consiguiente existe alguna duda sobre si la población que se está explotando ahora es la misma unidad básica que la explotada en años anteriores.

Con respecto a la 2) propiedad, la talla promedio de los peces en la captura ha cambiado significativamente con relación a rendimientos similares "próximos al equilibrio". En 1966, la captura de aleta amarilla en el ARCAA fue de 182 millones de libras y el peso promedio por pez en la captura fue de 22.4 libras, mientras que en 1967 la captura fue de 179 millones de libras y el peso promedio por pez en la captura fue 19.3 libras. En 1970, la producción de aleta amarilla fue 285 millones de libras y el peso promedio por pez en la captura fue de 31.5 libras, mientras que en 1971 la captura fue de 226 millones de libras y el peso promedio por pez en la captura fue 27.7 libras. En 1967 y 1971, los dos años en los que hubo un promedio inferior de peso, se capturaron grandes cantidades de atún barrilete en el ARCAA. Durante un año de buenas capturas de barrilete, la flota se concentra más a lo largo de la línea de la costa de la América Central y del Sur donde el barrilete se concentra y donde se encuentran pequeños cardúmenes superficiales de aleta amarilla. Bajo estas condiciones, el peso promedio del aleta amarilla en la captura tiende a ser relativamente bajo. En contraste, en 1966 y 1970 la pesca se distribuyó más en la región exterior del ARCAA donde se encuentra aleta amarilla de más talla, predominantemente con cardúmenes de delfines. Bajo estas condiciones el peso promedio de aleta amarilla en la captura tiende a ser relativamente alto.

La siguiente tabla indica la fracción del número total de caladas positivas de aleta amarilla asociado con delfines en cada uno de los cuatro años.

<u>Años</u>	<u>Fracción de caladas con delfines</u>
1966	0.59
1967	0.47
1970	0.53
1971	0.44

Consecuentemente, parece que la talla promedio del aleta amarilla en la captura del ARCAA se encuentra fuertemente afectada tanto por la distribución geográfica del esfuerzo como por la moda de pesca (con delfines o sin delfines) en que se emplea predominantemente el esfuerzo.

Finalmente, respecto a la 3) propiedad, la capturabilidad o vulnerabilidad de la población disponible a la flota parece haber cambiado con el refinamiento de las técnicas cerqueras y el movimiento fuera de la costa de la flota. Si el ARCAA se divide en dos áreas (Fig. 3), siendo el área A1 el área histórica de pesca y el área A2 el área fuera de la costa que se ha explotado más recientemente en el ARCAA, entonces la siguiente tabla del porcentaje de la captura total de aleta amarilla en el ARCAA y del esfuerzo normalizado en el A2 refleja alguna luz sobre el problema antes mencionado. Las estimaciones del esfuerzo han sido ajustadas o normalizadas por cambios "aparentes" en la eficacia debida a cambios en las proporciones de las caladas positivas.

Año	Porcentaje de captura en el A2 en el ARCAA	Porcentaje del esfuerzo normalizado en el A2 en el ARCAA
1962	0	0
1963	10	4
1964	17	10
1965	31	16
1966	34	20
1967	26	19
1968	27	18
1969	55	41
1970	44	37
1971	37	21
1972	58	45

Es evidente que la fracción de toda la captura del ARCAA en el A2 aumentó más rápidamente que la fracción del esfuerzo normalizado en el ARCAA aplicado al A2. Suponiendo que existe una unidad poblacional en el ARCAA, estos datos indican que a medida que la flota se extendió al área A2 la eficacia total de la flota, en términos de capturabilidad, aumentó. Por lo consiguiente parece que las técnicas modeladores (modelos de producción) deben aplicarse con precaución a la pesca de aleta amarilla realizada en años recientes en el Pacífico oriental.

A diferencia de los modelos de producción de la población, los cuáles representan la dinámica de la biomasa como unidad individual, los modelos de la estructura de la edad usan la relación entre el crecimiento, mortalidad y reproducción de los elementos individuales que forman la población para simular la dinámica de la biomasa poblacional. La teoría matemática básica de estos modelos fue desarrollada por Baranov (1918) y refinada por Ricker (1945, 1958) y Beverton y Holt (1957) al tratar de relacionar

el rendimiento esperado de una cohorte de peces según pasa por la pesquería con la interacción del crecimiento, mortalidad y edad de entrada en la pesca. Este tipo de modelo se denomina comúnmente modelo del "rendimiento por recluta". Desafortunadamente, los modelos tradicionales del rendimiento por recluta de Ricker y Beverton y Holt no toman en consideración las variaciones en el reclutamiento con relación a una población y, por lo consiguiente, no pueden aplicarse para representar la dinámica de la producción total de una población de peces que ha sido explotada durante un período de tiempo. Se intenta con TUNPØP ampliar el modelo de la estructura de la edad con el fin de investigar la dinámica a largo plazo de la abundancia y de la estructura de la edad de una población sujeta a la explotación dependiente de la edad y del reclutamiento variable, la población de aleta amarilla del Océano Pacífico oriental. En años recientes Walters (1969), Tillman y Paulik (1971) y Fox (1973) han producido modelos similares respecto a otras especies.

MODELO DE SIMULACION

Introducción

La función principal de un simulador de población como es TUNPØP es describir acertadamente la forma en que la biomasa de la población varía durante el tiempo. Existen cinco mecanismos básicos que actúan en una población explotada de peces para producir los cambios en la biomasa: reclutamiento, crecimiento, mortalidad natural, mortalidad por pesca y graduación. En una unidad determinada de tiempo, estos mecanismos actúan en la siguiente forma en TUNPØP. Se supone que el reclutamiento la adición de peces a la generación más joven de edad representada en el simulador, ocurre en la forma del "filo de un cuchillo" a principios de la unidad de tiempo. La magnitud del reclutamiento puede calcularse ya sea como una función de la biomasa de la población durante algún período anterior de tiempo o puede especificarse como entrada al modelo. Debe observarse que el reclutamiento en el simulador puede ocurrir al principio de cualquier unidad de tiempo durante la cual se está haciendo la simulación. En los ejemplos presentados más tarde en el estudio, se simulan simultáneamente dos cohortes anuales reclutadas a intervalos de medio año. En este caso la unidad de tiempo es trimestral; y por lo consiguiente el reclutamiento ocurre a principios de cada otra unidad de tiempo. El crecimiento bruto es la biomasa bruta agregada a la población por el proceso del crecimiento individual de los peces durante la unidad de tiempo. Así que el crecimiento bruto se refiere al crecimiento total individual de aquellos peces que sobreviven hasta el fin de la unidad de tiempo y aquellos peces que se sacan de la población durante esa unidad de tiempo. Naturalmente, que para éstos últimos el crecimiento solo incluye hasta el tiempo de remoción. El crecimiento individual de los peces está representado por las funciones empíricas de crecimiento utilizadas como entrada al modelo. Las funciones separadas de crecimiento pueden utilizarse en los

estudios de las cohortes separadas a medida que pasan a través de la pesquería. Así que en los ejemplos empleados más tarde, se usan las funciones separadas de crecimiento de los dos grupos de reclutamiento anual o cohortes cuyas dinámicas han sido simuladas juntas. La mortalidad natural se refiere a las pérdidas debidas a todas las causas que no sean por pesca y graduación de la generación más vieja de edad. Los índices de mortalidad natural aparecen como entrada en el modelo. La mortalidad de pesca se refiere a las pérdidas por pesca. La habilidad en la obtención de peces depende de la interacción entre la disponibilidad de la población a la pesca y la vulnerabilidad, o a la efectividad del esfuerzo en capturar la población disponible. Si un pez determinado no es disponible a la pesca a principios de la unidad de tiempo, permanece así durante toda la unidad. Así que se define la disponibilidad en el sentido de Ricker (1958) y Yamanaka (1961). Durante cualquier unidad de tiempo los peces que se encuentran presentes a principios del período pueden dividirse en dos grupos: no disponibles y disponibles, siendo los primeros afectados durante el período solo por la mortalidad natural y los últimos tanto por la mortalidad natural y por pesca. La vulnerabilidad, cuando se multiplica por la intensidad de pesca o esfuerzo, produce el índice de la mortalidad por pesca; se refiere a la probabilidad que una unidad de esfuerzo encuentre una unidad disponible de la población en una unidad de tiempo. Se refiere comúnmente como coeficiente de capturabilidad. Finalmente, se supone que la graduación, la pérdida de peces del grupo más viejo de edad representado en la simulación, ocurre en la forma del "filo de un cuchillo" a fines del período. Una vez que el pez se gradúa de una población simulada no es por más tiempo disponible a la pesca y no se considera más al determinar los niveles futuros de reclutamiento.

La población de aleta amarilla se divide en 18 generaciones trimestrales de edad. El primer grupo de edad se determina por la edad más joven en la que aparecen en cantidades significativas los peces en la pesca de aleta amarilla del Pacífico oriental. El reclutamiento en la pesca simulada ocurre cuando los peces entran a este grupo de edad a principios de su segundo año de vida. Se supone que un recluta promedio debe pesar 3 libras y tener una longitud de horquilla de 40 cm. El último grupo de edad incluye los peces más viejos que aparecen en la pesca en cantidades significativas y para los cuales se puede determinar la edad mediante el análisis de las progresiones modales. Así que la graduación de la pesca simulada ocurre cuando los animales dejan este grupo de edad a mediados de su sexto año de vida. Se supone que un graduado promedio debe pesar 135 libras y tener una longitud de horquilla de 145 cm.

Todos los parámetros se mantienen constantes durante una unidad de tiempo, ese intervalo de tiempo que cualquier animal individual pasa en un grupo de edad. Así que en este ejemplo los parámetros del modelo solo pueden variarse con base trimestral. Sin embargo, en una unidad de tiempo, se hacen los cálculos con base continua de tiempo. Por lo con-

siguiente, para mejorar la resolución de tiempo del modelo, habría que dividir la población en más grupos de edad, reduciendo la unidad de tiempo. El programa TUNPØP se ha escrito para que la persona que lo emplee pueda variar el lapso y/o el número de períodos sin cambiar el programa. Sin embargo, el lapso de tiempo que un animal pasa en un grupo de edad debe coincidir con una unidad de tiempo del simulador.

Ecuaciones

Como la unidad estructural básica de la población simulada es el grupo de edad, las manipulaciones algebraicas que hacen funcionar el modelo pueden comprenderse mejor si se revelan los cálculos realizados para avanzar un grupo de peces a través de la unidad de tiempo (en este caso un trimestre del año) que pasa en un grupo determinado de edad. Así que

$\{t, t + 1\}$ = unidad de tiempo que comienza a tiempo t (un entero) y termina a tiempo $t + 1$ durante el cuál se supone que una cohorte determinada de peces sea de edad i .

Si se suponen índices constantes de crecimiento, mortalidad natural, capturabilidad y disponibilidad como también la aplicación constante de esfuerzo durante la unidad de tiempo, se calculan las variables de la etapa en la forma siguiente:

$$(1) \quad N_{i+1}(t+1) = \text{número de peces que entra al grupo de edad } i+1 \text{ a tiempo } t+1 \\ = \rho_i(t) N_i(t) e^{-Z_i(t)} + [1 - \rho_i(t)] N_i(t) e^{-M_i}$$

donde

$$Z_i(t) = \text{índice instantáneo de mortalidad total por unidad de tiempo en el grupo de edad } i \text{ durante } \{t, t+1\} \\ = F_i(t) + M_i,$$

$$F_i(t) = \text{índice instantáneo de mortalidad total por pesca, por unidad de tiempo en el grupo de edad } i \text{ durante } \{t, t+1\} \\ = q_i(t) f(t),$$

$$q_i(t) = \text{coeficiente de capturabilidad en el grupo de edad } i \text{ durante } \{t, t+1\} \text{ (ENTRADA),}$$

$$f(t) = \text{número de días normales de esfuerzo durante } \{t, t+1\} \text{ (ENTRADA),}$$

$$M_i = \text{índice instantáneo de mortalidad natural por unidad de tiempo en el grupo de edad } i \text{ (ENTRADA),}$$

$$\rho_i(t) = \text{fracción de } N_i(t) \text{ disponible a la pesca durante } \{t, t+1\} \text{ (ENTRADA).}$$

$$(2) \quad B_i(t) = \text{biomasa que entra al grupo de edad } i \text{ a tiempo } t \\ = N_i(t) w_i(t)$$

donde

$w_i(t)$ = peso promedio de un individuo a la entrada en el grupo i de edad a tiempo t (ENTRADA).

$$(3) \quad \begin{aligned} YN_i(t) &= \text{captura (en cantidad) del grupo de edad } i \text{ durante } \{t, t+1\} \\ &= \int_t^{t+1} \rho_i(t) F_i(t) N_i(x) dx \\ &= \frac{\rho_i(t) N_i(t) F_i(t)}{F_i(t) + M_i} \left[1 - e^{-(F_i(t) + M_i)} \right] \end{aligned}$$

$$(4) \quad \begin{aligned} YW_i(t) &= \text{captura (en peso) de grupo de edad } i \text{ durante } \{t, t+1\} \\ &= \int_t^{t+1} \rho_i(t) F_i(t) B_i(x) dx \\ &= \frac{\rho_i(t) F_i(t) B_i(t)}{G_i(t) - F_i(t) - M_i} \left[e^{(G_i(t) - F_i(t) - M_i)} - 1 \right] \end{aligned}$$

donde

$$\begin{aligned} G_i(t) &= \text{índice instantáneo de crecimiento del grupo de edad } i \text{ durante } \{t, t+1\} \\ &= \ln \left[\frac{w_{i+1}(t+1)}{w_i(t)} \right]. \end{aligned}$$

Además observen que

$$R(t) = N_1(t) = \text{número reclutado de peces en el grupo de edad 1 a tiempo } t.$$

Se calculan además otras dos variables de interés en cada grupo de edad por cada unidad del período de tiempo.

$$(5) \quad \begin{aligned} \bar{B}_i(t) &= \text{promedio de la biomasa en el grupo de edad } i \text{ durante } \{t, t+1\} \\ &= \int_t^{t+1} B_i(x) dx \\ &= \frac{\rho_i(t) B_i(t)}{G_i(t) - F_i(t) - M_i} \left[e^{(G_i(t) - F_i(t) - M_i)} - 1 \right] \\ &\quad + \frac{(1 - \rho_i(t)) B_i(t)}{G_i(t) - M_i} \left[e^{(G_i(t) - M_i)} - 1 \right] \end{aligned}$$

$$(6) \quad \begin{aligned} GG_i(t) &= \text{crecimiento bruto del grupo de edad } i \text{ durante } \{t, t+1\} \\ &= GG1_i(t) + GG2_i(t) \end{aligned}$$

donde

$GG1_i(t)$ = biomasa total agregada al grupo de edad i por peces sobrevivientes de $\{t, t + 1\}$

$$= N_{i+1}(t + 1) [w_{i+1}(t + 1) - w_i(t)]$$

$$= N_{i+1}(t + 1) w_i(t) [e^{G_i(t)} - 1] \text{ y}$$

$GG2_i(t)$ = biomasa total agregada al grupo de edad i por peces que murieron durante $\{t, t + 1\}$

$$= \int_t^{t+1} [\rho_i(t)F_i(t) + M_i] N_i(x)w_i(t) [e^{G_i(t)(x-t)} - 1] dx$$

$$= \left\{ \begin{array}{l} [\rho_i(t)F_i(t) + M_i] N_i(t) W_i(t) \left\{ \rho_i(t) \left[\frac{1 + e^{-Z_i(t)}}{Z_i(t)} - \frac{1}{Z_i(t)} \right] \right. \\ \left. + (1 - \rho_i(t)) \left[\frac{e^{G_i(t)-M_i}}{G_i(t) - M_i} + \frac{e^{-M_i}}{M_i} - \frac{1}{G_i(t) - M_i} - \frac{1}{M_i} \right] \right\} \\ \text{si } G_i(t) = Z_i(t). \\ \\ [\rho_i(t)F_i(t) + M_i] N_i(t) w_i(t) \left\{ \rho_i(t) \left[\frac{e^{G_i(t)-Z_i(t)}}{G_i(t) - Z_i(t)} + \frac{e^{-Z_i(t)}}{Z_i(t)} - \right. \right. \\ \left. \left. \frac{1}{G_i(t) - Z_i(t)} - \frac{1}{Z_i(t)} \right] + (1 - \rho_i(t)) \left[1 + \frac{e^{-M_i}}{M_i} - \frac{1}{M_i} \right] \right\} \\ \text{si } G_i(t) = M_i. \\ 0 \\ \text{si } Z_i(t) = 0. \\ \\ [\rho_i(t)F_i(t)] N_i(t)w_i(t) \left\{ \rho_i(t) \left[\frac{e^{G_i(t)-Z_i(t)}}{G_i(t) - Z_i(t)} + \frac{e^{-Z_i(t)}}{Z_i(t)} - \right. \right. \\ \left. \left. \frac{1}{G_i(t) - Z_i(t)} - \frac{1}{Z_i(t)} \right] + (1 - \rho_i(t)) \left[\frac{e^{G_i(t)}}{G_i(t)} + 1 - \frac{1}{G_i(t)} \right] \right\} \\ \text{si } M_i = 0, F_i(t) \neq 0. \\ \\ [\rho_i(t)F_i(t) + M_i] N_i(t)w_i(t) \left\{ \rho_i(t) \left[\frac{e^{G_i(t)-Z_i(t)}}{G_i(t) - Z_i(t)} + \frac{e^{-Z_i(t)}}{Z_i(t)} \right. \right. \\ \left. \left. - \frac{1}{G_i(t) - Z_i(t)} - \frac{1}{Z_i(t)} \right] + (1 - \rho_i(t)) \left[\frac{e^{G_i(t)-M_i}}{G_i(t) - M_i} + \frac{e^{-M_i}}{M_i} - \frac{1}{G_i(t) - M_i} - \frac{1}{M_i} \right] \right\} \\ \text{de lo contrario.} \end{array} \right.$$

Por lo tanto, el crecimiento bruto de la población es sencillamente la suma del crecimiento bruto a edad específica durante ese intervalo de tiempo. La razón para calcular el crecimiento bruto es doble. Primero, es interese-

sante observar la proporción de toda la biomasa agregada a la población con relación a la biomasa total removida de la población tanto a causa de la mortalidad natural como de pesca. Segundo, como eventualmente TUNPØP puede utilizarse como un simulador en la ciencia de energía de las poblaciones, debe realizarse un cálculo del crecimiento bruto con el fin de calcular luego la cantidad total de energía usada por una población en el curso de una unidad de tiempo.

Estructura del programa de cómputo

La Figura 5 es un organigrama del procedimiento que une las entradas al modelo y los cálculos de edad específica para producir los resultados de salida deseados en el modelo. La entrada al modelo incluye los parámetros básicos de tiempo, los parámetros de pesca y las variables (la disponibilidad y vulnerabilidad a edad y tiempo específico y el esfuerzo de pesca a tiempo específico), los parámetros de la población natural (mortalidad natural a edad específica, el reclutamiento a tiempo específico y la talla (peso) a edad y tiempo específicos de entrada en cada grupo de edad). Los valores iniciales de las variables en las etapas deben especificarse para activar el modelo. Los resultados de salida del modelo incluyen los datos a edad específica de la cantidad, biomasa, crecimiento y producción en cada intervalo de unidad de tiempo en la que se realiza una simulación. Además, se presenta para cada unidad de intervalo de tiempo, el peso promedio de un pez en la captura y la razón del crecimiento bruto con respecto a la pérdida en peso debido a causas naturales y por pesca. Finalmente, el modelo produce estadísticas anuales de captura a edad específica en cantidades y peso.

EJEMPLOS DE LOS RESULTADOS

Se hicieron dos pasadas como ejemplo del modelo para tratar de imitar una historia de seis años (1966-1971) de las estadísticas de la captura trimestral a edad específica del aleta amarilla en el ARCAA. En la 1 pasada se toman en cuenta las variaciones trimestrales en el nivel del esfuerzo de pesca al determinar los índices de la mortalidad por pesca a edad específica, mientras que en la 2 pasada estos índices a edad específica permanecen constantes durante toda la simulación.

En ambas pasadas los parámetros de entrada del modelo fueron estimados utilizando estadísticas trimestrales de captura, esfuerzo y talla del pez en la captura (datos frecuencia-talla) de 1966 a 1971. En cada trimestre desde 1966 hasta 1971, se agrupó la captura total de aleta amarilla en el ARCAA a intervalos de longitud, basándose en los datos de las muestras frecuencia-talla. Para los fines de este análisis, se supuso que cada año entraron en la pesca dos grupos de reclutamiento. Los grupos

modales de las muestras frecuencia-talla fueron asignados a una o dos categorías, denominadas X e Y, basados en las fechas de su reclutamiento en la pesquería. Se define que el reclutamiento ocurre cuando un pez alcanza la longitud de 40 cm (approx. 1 año de edad). Utilizando cálculos anteriores mediante las curvas de crecimiento, los peces que se estimaron que habían sido reclutados durante los primeros seis meses de un año fueron asignados al grupo X y los peces que se estimaron que habían sido reclutados durante los otros seis meses del año fueron asignados al grupo Y. Así que cada captura trimestral se divide en distribuciones tanto de edad X como de Y. El concepto de los grupos de X e Y fue presentado por Hennemuth (1961), aunque en ese estudio los peces fueron asignados a los grupos de una manera ligeramente diferente. La relación talla-edad (una ligera diferencia entre los grupos X e Y) usada para transformar las muestras frecuencia-talla a muestras frecuencia-edad (grupos anuales X e Y) fue estimada por Tomlinson (comunicación personal). Se hicieron luego las estimaciones de las capturas trimestrales edad-(cohorte)-específica de los años de interés al combinar las muestras edad-frecuencia con las estadísticas trimestrales de captura. La técnica de Murphy (Tomlinson, 1970) se empleó luego con estos datos de captura a edad específica para estimar los índices trimestrales de la mortalidad por pesca a edad específica ($F_i(t)$) y la abundancia de la clase anual ($N_i(t)$). Los coeficientes trimestrales de capturabilidad a edad específica ($q_i(t)$) fueron luego computados al dividir los índices de la mortalidad de pesca por las estimaciones trimestrales del esfuerzo normalizado de pesca ($f(t)$). Los análisis de Murphy se hicieron separadamente respecto a los grupos X e Y bajo la suposición de que el índice instantáneo de mortalidad natural (M) con base anual para ambos grupos era constante a 0.8.

Las simulaciones se hicieron sobre un lapso de tiempo de 24 trimestres (6 años) (1966-1971). Las estimaciones del reclutamiento en la pesca, en millones de peces, derivados del análisis de Murphy anteriormente mencionado, son:

<u>Año</u>	<u>Grupo X</u>	<u>Grupo Y</u>
1966	33.3	17.2
1967	19.1	24.3
1968	13.7	17.6
1969	19.5	20.3
1970	20.0	19.7
1971	21.4	17.5
Promedio total	21.2	20.6

Estos valores son de entrada directa a las simulaciones. Las estimaciones del esfuerzo trimestral de pesca se obtuvieron de la media de las estimaciones de captura por unidad de esfuerzo de aquellos cuadrados de

5° en el ARCAA donde se capturó predominantemente aleta amarilla. Estos valores de la CPUE se dividieron en las estadísticas correspondientes de la captura total trimestral del aleta amarilla en el ARCAA para obtener las estimaciones del esfuerzo total efectivo normalizado del aleta amarilla (Tabla 1). Por lo tanto, cuando se emplean todas estas estimaciones sin modificar en la simulación, los resultados de salida consisten en las capturas exactas obtenidas por el análisis de las estadísticas de la captura frecuencia-talla, ya que el simulador es estructuralmente similar al modelo básico de Murphy.

En la primera pasada del modelo, los valores medios de la capturabilidad a edad específica ($\bar{q}_i; i = 1, \dots, 18$) estimados por el modelo de Murphy fueron empleados en los grupos X e Y (Tabla 2). Estos valores fueron luego combinados con las estimaciones trimestrales del esfuerzo del aleta amarilla para producir índices trimestrales de la mortalidad por pesca a edad específica. En la segunda pasada del modelo, los valores medios de los índices de mortalidad por pesca a edad específica ($\bar{F}_i; i = 1, \dots, 18$) estimados por el modelo de Murphy fueron calculados y empleados directamente, usando nuevamente las medias separadas de los grupos X e Y (Tabla 2). En ambas pasadas todos los índices de la disponibilidad se igualaron a la unidad.

Los ejemplos de las tres categorías básicas de los resultados de salida del modelo se dan en el Apéndice I. Estas tres son 1) una lista de todos los parámetros y variables de entrada, 2) los resultados de salida de una simulación de una unidad de tiempo, 3) los resultados de salida de una simulación anual. Todos los resultados de salida se suman por los grupos X e Y y también por la combinación de los dos. La tabla final de los resultados de salida de la unidad de tiempo presenta la razón entre la biomasa removida de la población debida a la mortalidad natural y de pesca y la combinación del crecimiento bruto además del reclutamiento del grupo a edad 1 menos la emigración del grupo a edad 18. La tabla final de la sección de los resultados anuales de salida presenta los cambios brutos anuales en la biomasa de la población debidos a cinco fuentes: aumentos debidos al reclutamiento y crecimiento y reducciones debidas a la pesca, muerte natural y graduación. Además se da el cambio anual neto de la biomasa de la población.

Los gráficos de la captura trimestral en cantidad y peso, y peso promedio en la captura se presentan en las Figuras 6, 7 y 8. Al usar el criterio de la bondad del ajuste de las sumas de desviaciones cuadradas, se obtuvieron los siguientes resultados:

- a) La suma de las desviaciones cuadradas de la captura trimestral a edad específica según fue observada y la misma captura según la simulación, fue en la 2 pasada 55 por ciento inferior a la 1, en términos de la cantidad de peces.

- b) La suma de las desviaciones cuadradas entre la captura trimestral a edad específica según fue observada, y la misma captura según la simulación, fue en la 2 pasada 54 por ciento inferior a la 1, en términos del peso de los peces.
- c) La suma de las desviaciones cuadradas entre el peso promedio trimestral de la captura según fue observada y según la simulación, fue en la 2 pasada 74 por ciento superior a la 1.

Según una regresión lineal de la forma $Z = a + bW$ entre la cantidad (Z) de la captura simulada a edad específica y la cantidad (W) de la captura observada a edad específica que se hizo para probar el sesgo del modelo, parece que existe en la 1 pasada un sesgo que no es constante (es decir, " b " es significativamente diferente a uno) en toda la distribución de las capturas observadas a edad específica, mientras que en la 2 pasada se obtiene una sobreestimación constante de la captura observada, basándose en la captura simulada (*e.d.* " b " no es significativamente diferente a uno y " a " es significativamente superior a cero). Por lo tanto parece según este caso que mientras la magnitud de la captura en esas clases de edad que contribuyen más fuertemente en cantidad y peso a la captura total, puede simularse adecuadamente al aplicar índices constantes de la mortalidad por pesca a edad específica (*e.d.* no tomando en consideración las fluctuaciones de un año a otro del esfuerzo trimestral), la variación en las contribuciones relativas de los varios grupos de edad respecto a la captura pueden describirse más adecuadamente al considerar la interacción entre la vulnerabilidad (capturabilidad) constante a edad específica y el esfuerzo variable para producir una serie variable de tiempo de los índices de la mortalidad por pesca a edad específica. La Figura 9 presenta separadamente para los grupos X e Y la suma trimestral de las desviaciones cuadradas entre la captura según se observa y la captura según la simulación en términos de la cantidad de peces de los años de 1966 a 1971. Esta figura indica alguna variabilidad en los años y entre los años en la exactitud de las dos simulaciones. Es interesante observar que en la 1 pasada del grupo X tanto como del grupo Y, la captura simulada tiende a desviarse más notoriamente de la captura observada en épocas cuando se reduce la talla promedio de los peces en la captura (Fig. 8). Naturalmente, éstas son épocas en las que se captura las mayores cantidades de peces y por lo tanto se esperaría que la desviación en cantidad de la captura fuera relativamente alta. Sin embargo, puede también indicar que el modelo, según ha sido construido, sea relativamente insensible a las fluctuaciones anuales y estacionales de la abundancia de pequeños peces y/o accesibilidad. Según los resultados de estas pasadas parece que para mejorar la exactitud del modelo bajo coeficientes constantes de capturabilidad a edad específica 1) deben obtenerse mejores estimaciones del esfuerzo hacia el atún aleta amarilla, y 2) deben emplearse en el modelo factores de accesibilidad a edad específica y relacionados con el tiempo.

ANALISIS DE SENSIBILIDAD

Se realizó un análisis para examinar la sensibilidad de los resultados de salida del modelo con respecto a los cambios sistemáticos de los parámetros y de las variables independientes de entrada. Se utilizaron tres variables de salida: la captura anual en términos de la cantidad de peces, la captura anual en peso y el peso promedio anual de peces en la captura.

Permitamos que

x = variable o parámetro de entrada con respecto al cuál se realiza el análisis de sensibilidad

$y(x)$ = variable de salida que ha de medir la sensibilidad del modelo con respecto a los cambios en x , y

Δx = el cambio en x que ha de simularse

Luego

$$\begin{aligned} S(x, y, \Delta x) &= \text{sensibilidad neta de } y \text{ a un cambio, } \Delta, \text{ en } X \\ &= \frac{y(x + \Delta x) - y(x)}{y(x)} \end{aligned}$$

Variamos las variables y los parámetros de entrada sistemáticamente según los valores usados en la 2 pasada de la sección anterior. Se utilizaron reclutamientos anuales constantes del grupo X e Y (21.2 millones y 20.6 millones de peces anuales en los grupos X e Y, respectivamente) para calcular así todos los valores de producción bajo condiciones de equilibrio. Permitiendo por lo tanto

$y_1(x)$ = captura anual equilibrada en cantidades

x = índice instantáneo de mortalidad natural

Δx = 0.10x

entonces

$S(x, y_1, \Delta x)$ = cambio fraccionado en las cantidades de la captura anual equilibrada en respuesta a un 10% de aumento en la mortalidad natural.

La sensibilidad de la captura anual equilibrada en cantidades de peces, la captura en peso y el peso promedio de los peces en la captura fue probada con respecto a

- 1) los coeficientes anuales de capturabilidad a edad específica
- 2) esfuerzo de pesca (mortalidad por pesca)
- 3) reclutamiento
- 4) mortalidad natural
- 5) accesibilidad

Los resultados del análisis se presentan en la Tabla 3. En la región general de los valores de las variables y los parámetros de entrada al modelo utilizados en la 2 pasada, los resultados de salida de la pesca, especialmente el rendimiento en peso, parecen ser mucho más sensibles a los cambios en el reclutamiento y mortalidad natural que a los cambios de una magnitud similar en disponibilidad, capturabilidad a edad específica o intensidad de pesca (esfuerzo).

Es interesante observar que un 10 por ciento de reducción en la disponibilidad produce un 17 por ciento más de reducción en el peso de la captura equilibrada, de lo que causa el 10 por ciento de reducción en el esfuerzo de pesca. Además un 10 por ciento de cambio en la mortalidad natural produce un cambio mayor al 10 por ciento en el rendimiento de equilibrio del peso. Por último, parece que en la proximidad de los valores del modelo, los valores de entrada y los parámetros usados en la 2 pasada, los resultados equilibrados de salida de la pesca son mucho más sensibles a los cambios en la capturabilidad de los peces de 3 años que en cualquier otro grupo anual de edad.

SUMARIO Y CONCLUSION

El propósito de este manuscrito fue suministrar un documento básico de referencia para TUNPØP, un modelo computador de simulación de la población del atún aleta amarilla y de la pesca epipelágica en el Océano Pacífico oriental. Además, se presentan ejemplos de las pasadas del modelo y los resultados de un análisis limitado de sensibilidad. Se espera que este modelo sea útil en revelar la estructura básica de la población del atún aleta amarilla en el Pacífico oriental y su reacción en años recientes a la explotación de la pesca epipelágica.

RECONOCIMIENTO

El autor agradece al Dr. William H. Bayliff de la Comisión Interamericana del Atún Tropical, al Sr. Joseph Greenough del National Marine Fisheries Service y al Dr. Robin Allen del Fisheries Research Division, Ministerio de Agricultura y Pesca de Nueva Zelandia, por la crítica constructiva recibida sobre el manuscrito.

LITERATURE CITED — BIBLIOGRAFIA CITADA

- Baranov, F. I. 1918. On the question of the biological foundations of fishes. Nauchn. Issled, Ikhhol Inst., Izv., **1**(1): 81-128 (Translated from Russian by I. F. C., Min. Ag. and Fish. 1938).
- Beverton, R. J. H. and S. J. Holt. 1957. On the dynamics of exploited fish populations. Min. Agr., Fish and Food (U. K.), Fish. Investig., Ser. II, 19: 533 pp.
- Fox, W. W. 1970. An exponential surplus-yield model for optimizing exploited fish populations. Trans. Am. Fish Soc. **99**(1): 80-88.
- _____. 1973. A general life history exploited population simulator with pandalid shrimp as an example. Fishery Bulletin **71**(4): 1019-1028.
- Hennemuth, R. C. 1961. Year class abundance, mortality and yield-per-recruit of yellowfin tuna in the eastern Pacific Ocean (in English and Spanish). Bull. Inter-Amer. Trop. Tuna Comm. **6**(1): 1-54.
- Joseph, J. 1970. Management of tropical tunas in the eastern Pacific Ocean. Trans. Am. Fish. Soc. **99**(3): 629-648.
- Pella, J. J. and P. K. Tomlinson. 1969. A generalized stock production model (in English and Spanish). Bull. Inter-Amer. Trop. Tuna Comm. **13**(3): 421-496.
- Pielou, E. C. 1969. An Introduction to Mathematical Ecology. John Wiley & Sons, New York. 286 pp.
- Ricker, W. E. 1945. A method of estimating minimum size limits for obtaining maximum yield. Copeia, 2: 84-94.
- _____. 1958. Handbook of computations for biological statistics of fish populations. Bull. Fish. Res. Bd. Canada, 119: 300 pp.
- Schaefer, M. B. 1954. Some aspects of the dynamics of populations important to the management of the commercial marine fisheries (in English and Spanish). Bull. Inter-Amer. Trop. Tuna Comm. **1**(2): 27-56.
- _____. 1957. A study of the dynamics of the fishery for yellowfin tuna in the eastern tropical Pacific Ocean (in English and Spanish). Bull. Inter-Amer. Trop. Tuna Comm. **11**(6): 247-285.

- Shimada, B. M. and M. B. Schaefer. 1956. A study of changes in fishing effort, abundance, and yield for yellowfin and skipjack tuna in the eastern tropical Pacific Ocean (in English and Spanish). *Bull. Inter-Amer. Trop. Tuna Comm.* **1**(7): 351-469.
- Tillman, M. F. and G. J. Paulik. 1971. Biological analysis of the northern anchovy fishery system. Center for Quantitative Science in Forestry, Fisheries and Wildlife. Quant. Sc. Paper No. 28. University of Washington, Seattle: 65 pp.
- Walters, C. J. 1969. A generalized computer simulation model for fish population studies. *Trans. Am. Fish. Soc.* **98**(3): 505-512.
- Yamanaka, I. 1961. Mathematical model of the fish population considering the change of the availability. *Bull. of the Japan Sea Regional Fish. Res. Lab.* **8**.

APPENDIX TABLE I. A sample of the TUNPØP computer output. X-group = first quarter recruitment group, Y-group = third quarter recruitment group, number of age classes = 18, number of unit time periods = 24.

TABLA I DEL APENDICE. Una muestra de los resultados del modelo TUNPØP. Grupo X = grupo de reclutas del primer trimestre, grupo-Y = grupo de reclutas del tercer trimestre, número de generaciones = 18, número de unidades de tiempo = 24.

Q = COEFF. CATCH. (COEFICIENTE DE CAPTURABILIDAD)

.167000E-07	0.	.563330E-05	0.	.192667E-04	0.	.365333E-04	0.
.448000E-04	0.	.454333E-04	0.	.381333E-04	0.	.241000E-04	0.
0.	0.						
0.	.290000E-05	0.	.421667E-04	0.	.282000E-04	0.	.316833E-04
0.	.579000E-04	0.	.335500E-04	0.	.360500E-04	0.	.184167E-04
0.	0.						
.216700E-06	0.	.206167E-04	0.	.447500E-04	0.	.190500E-04	0.
.199167E-04	0.	.147667E-04	0.	.813330E-05	0.	.745000E-05	0.
.158330E-05	0.						
0.	.783300E-06	0.	.276667E-04	0.	.377000E-04	0.	.986670E-05
0.	.180000E-04	0.	.148667E-04	0.	.102167E-04	0.	.358330E-05
0.	0.						

F = EFFORT (ESFUERZO)

.799200E+04	.649300E+04	.621400E+04	.423100E+04	.700800E+04	.561600E+04	.280700E+04	.554000E+03
.589100E+04	.941400E+04	.312800E+04	.803000E+03	.128670E+05	.661900E+04	.741000E+03	.723000E+03
.137860E+05	.810900E+04	.167600E+04	.140500E+04	.179710E+05	.103510E+05	.580600E+04	.123730E+05

FREC = AVAILABILITY (DISPONIBILIDAD)

.100000E+01	.100000E+01	.100000E+01	.100000E+01	.100000E+01	.100000E+01	.100000E+01	.100000E+01
.100000E+01	.100000E+01	.100000E+01	.100000E+01	.100000E+01	.100000E+01	.100000E+01	.100000E+01
.100000E+01	.100000E+01						

M = INST. NAT. MORT. (MORTALIDAD NATURAL INSTANTANEA)

.200000E+00	.200000E+00	.200000E+00	.200000E+00	.200000E+00	.200000E+00	.200000E+00	.200000E+00
.200000E+00	.200000E+00	.200000E+00	.200000E+00	.200000E+00	.200000E+00	.200000E+00	.200000E+00
.200000E+00	.200000E+00						

REC = RECRUITMENT NUMBERS (CANTIDAD DE RECLUTAS)

.332920E+08	0.	.172360E+08	0.	.190810E+08	0.	.243670E+08	0.
.137160E+08	0.	.176270E+08	0.	.194750E+08	0.	.203010E+08	0.
.199270E+08	0.	.197220E+08	0.	.214030E+08	0.	.175470E+08	0.

APPENDIX TABLE I. (Continued)

TABLA I DEL APENDICE. (Continuación)

WX(I) = AVG. WT. AT ENTRY INTO AGE CLASS I-X GROUP

(PESO PROMEDIO AL ENTRAR EN LA I GENERACION DE EDAD — GRUPO X)

.300000E+01	.500000E+01	.700000E+01	.100000E+02	.140000E+02	.180000E+02	.230000E+02	.310000E+02
.410000E+02	.510000E+02	.610000E+02	.720000E+02	.900000E+02	.106000E+03	.118000E+03	.127000E+03
.132000E+03	.135000E+03	.137000E+03					

WY(I) = AVG. WT. AT ENTRY INTO AGE CLASS I-Y GROUP

(PESO PROMEDIO AL ENTRAR EN LA I GENERACION DE EDAD — GRUPO Y)

.300000E+01	.500000E+01	.700000E+01	.900000E+01	.120000E+02	.170000E+02	.240000E+02	.320000E+02
.390000E+02	.480000E+02	.630000E+02	.780000E+02	.900000E+03	.118000E+03	.118000E+03	.127000E+03
.131000E+03	.133000E+03	.134000E+03					

GX(I) = INST. EXP. GROWTH RATE IN AGE CLASS I-X GROUP

(INDICE EXPONENCIAL DEL CRECIMIENTO EN LA I GENERACION DE EDAD — GRUPO X)

.510826E+00	.336472E+00	.356675E+00	.336472E+00	.251314E+00	.245122E+00	.298493E+00	.279585E+00
.218254E+00	.179048E+00	.165792E+00	.223144E+00	.163629E+00	.107246E+00	.735025E-01	.386148E-01
.224729E+01	.147061E+01						

GY(I) = INST. EXP. GROWTH RATE IN AGE CLASS I-Y GROUP

(INDICE EXPONENCIAL DEL CRECIMIENTO EN LA I GENERACION DE EDAD — GRUPO Y)

.510826E+00	.336472E+00	.251314E+00	.287682E+00	.348307E+00	.344840E+00	.287682E+00	.197826E+00
.207639E+00	.271934E+00	.213574E+00	.143101E+00	.144581E+00	.126294E+00	.735025E-01	.310102E-01
.151518E-01	.749067E-02						

APPENDIX TABLE II. A sample of the TUNPØP computer output, showing unit time period output where the time period = 8. X-group = first quarter recruitment group, Y-group = third quarter recruitment.

TABLA II DEL APENDICE. Una muestra de los resultados del modelo TUNPØP, en la que se indican los resultados de la unidad de tiempo donde la unidad de tiempo = 8. Grupo X = grupo de reclutas del primer trimestre, grupo Y = grupo de reclutas del tercer trimestre.

AGE EDAD	INITIAL NUMBER CANTIDAD INICIAL	INITIAL BIOMASS BIOMASA INICIAL	AVERAGE BIOMASS BIOMASA PROMEDIO	GROSS GROWTH CRECIMIENTO BRUTO	YIELD NOS. RENDIMIENTO CANTIDAD	YIELD WT. RENDIMIENTO PESO
1	0.	0.	0.	0.	0.	0.
2	.199379E+08	.996894E+08	.106788E+09	.359313E+08	.784007E+04	.463406E+05
3	0.	0.	0.	0.	0.	0.
4	.972226E+07	.972226E+08	.103357E+09	.347767E+08	.134065E+06	.158419E+07
5	0.	0.	0.	0.	0.	0.
6	.422255E+07	.717834E+08	.764220E+08	.263534E+08	.791305E+05	.159613E+07
7	0.	0.	0.	0.	0.	0.
8	.445630E+07	.138145E+09	.143394E+09	.400907E+08	.220193E+05	.783812E+06
9	0.	0.	0.	0.	0.	0.
10	.739866E+06	.355136E+08	.366369E+08	.996281E+07	.665485E+04	.365343E+06
11	0.	0.	0.	0.	0.	0.
12	.301112E+06	.216800E+08	.218424E+08	.487400E+07	.223882E+04	.179898E+06
13	0.	0.	0.	0.	0.	0.
14	.167248E+06	.173937E+08	.167214E+08	.211181E+07	.855632E+03	.946441E+05
15	0.	0.	0.	0.	0.	0.
16	.316632E+05	.402123E+07	.370994E+07	.143259E+06	.569149E+02	.736477E+04
17	0.	0.	0.	0.	0.	0.
18	.270449E+05	.359697E+07	.327193E+07	.245090E+05	0.	0.
TOTX	.145113E+08	.261069E+09	.272303E+09	.798847E+08	.158380E+06	.255526E+07
TOTY	.250946E+08	.227977E+09	.239841E+09	.743839E+08	.944811E+05	.210246E+07
TOT	.396059E+08	.489046E+09	.512144E+09	.154269E+09	.252861E+06	.465772E+07

AVG. WT. IN CATCH (PESO PROMEDIO EN LA CAPTURA)

X-GROUP = 16.13373
Y-GROUP = 22.25274
TOTAL = 18.42009

RATIO OF BIOMASS REMOVED TO GROSS GROWTH (PROPORCION ENTRE LA BIOMASA REMOVIDA Y EL CRECIMIENTO BRUTO)			RATIO OF BIOMASS REMOVED TO GROSS GROWTH + RECRUITMENT-EMIGRATION (. . . + RECLUTAMIENTO-EMIGRACION)			
	FISHING-PESCA	NATURAL	TOTAL	FISHING-PESCA	NATURAL	TOTAL
X-GROUP	0.03199	0.68174	0.71373	X-GROUP	0.03199	0.68174
Y-GROUP	0.02827	0.64487	0.67314	Y-GROUP	0.02827	0.64487
TOTAL	0.03019	0.66396	0.69416	TOTAL	0.03019	0.66396

APPENDIX TABLE III. A sample of the TUNPØP computer output, showing yearly output—year 2. X-group = first quarter recruitment group, Y-group = third quarter recruitment group.

TABLA III DEL APENDICE. Una muestra de los resultados del modelo TUNPØP, en la que se indican los resultados anuales—año 2. Grupo X = grupo de reclutas del primer trimestre, grupo Y = grupo de reclutas del tercer trimestre.

AGE EDAD	YIELD NOS. RENDIMIENTO (CANTIDAD)	YIELD WT. RENDIMIENTO (PESO)	
1	.154537E+05	.599916E+05	
2	.236609E+06	.139793E+07	
3	.104557E+07	.855421E+07	
4	.187060E+07	.195047E+08	
5	.194483E+07	.297446E+08	
6	.117277E+07	.237416E+08	
7	.723582E+06	.196663E+08	
8	.228652E+06	.805007E+07	
9	.313156E+06	.141095E+08	
10	.170605E+06	.945082E+07	
11	.142708E+06	.988212E+07	
12	.503586E+05	.419646E+07	
13	.243950E+05	.236775E+07	
14	.106991E+05	.119211E+07	
15	.992064E+04	.121208E+07	
16	.406620E+04	.524116E+06	
17	.133365E+03	.175993E+05	
18	0.	0.	
TOTX	.418853E+07	.847071E+08	
TOTY	.377557E+07	.689648E+08	
TOT	.796410E+07	.153672E+09	
AVG. WT. IN CATCH (PESO PROMEDIO EN LA CAPTURA)			
	X-GROUP = 20.22358		
	Y-GROUP = 18.26609		
	TOTAL = 19.29558		
ANNUAL CHANGES IN POPULATION BIOMASS (CAMBIOS ANUALES EN LA BIOMASA POBLACIONAL)			
	RECRUITMENT RECLUTAMIENTO	GROSS GROWTH CRECIMIENTO BRUTO	YIELD WT. RENDIMIENTO-PESO
X-GROUP	.572430E+08	.307857E+09	.847071E+08
Y-GROUP	.731010E+08	.226995E+09	.689648E+08
TOTAL	.130344E+09	.534853E+09	.153672E+09
	NATURAL MORTALITY MORTALIDAD NATURAL	EMIGRATION EMIGRACION	NET NETO
X-GROUP	.211544E+09	.312424E+07	.195098E+09
Y-GROUP	.152422E+09	.301068E+07	.976894E+08
TOTAL	.363966E+09	.613492E+07	.292787E+09