

STOCK STRUCTURE OF BIGEYE, YELLOWFIN, AND SKIPJACK TUNAS IN THE EASTERN PACIFIC OCEAN

by

Kurt M. Schaefer

CONTENTS

1. Summary	203
2. Introduction	203
3. Stock structure	204
3.1. Bigeye tuna (<i>Thunnus obesus</i>)	204
3.2. Yellowfin tuna (<i>Thunnus albacares</i>)	205
3.3. Skipjack tuna (<i>Katsuwonus pelamis</i>)	208
Literature cited	218

1. SUMMARY

Regional fidelity has been demonstrated for bigeye, yellowfin, and skipjack tunas in the eastern Pacific Ocean (EPO), with low levels of mixing expected with the stocks in the western and central Pacific Ocean (WCPO). The scientific information available to elucidate the stock structure of these three species in the EPO is reviewed, evaluated, and compiled in this document. The evidence indicates that there are probably northern and southern sub-stocks of bigeye (with separation at about 10°N), based on tagging data; northern and southern sub-stocks of yellowfin (with separation at about 15°N), based on tagging, length-at-maturity, morphometric, and stable nitrogen isotope data; and northern and southern sub-stocks of skipjack (with separation at about 15°N), based on tagging and length-at-maturity data. The spatial extent of those stocks and the levels of mixing are not yet well defined. Stock boundaries most likely oscillate within a few degrees of latitude relative to seasonal and annual variability in oceanographic conditions. Further research is needed to elucidate the extents and interactions of the sub-stocks.

2. INTRODUCTION

Considering the fact that bigeye, yellowfin, and skipjack tunas are widely distributed throughout tropical and sub-tropical waters of the Pacific Ocean (Collette and Nauen, 1983), have the capacity to disperse fairly rapidly throughout their ranges (Hunter *et al.*, 1986), and exhibit widespread and protracted spawning (Schaefer, 2001a), it is reasonable to assume that they would exhibit little intraspecific stock structure in the eastern Pacific Ocean (EPO). However, it is critical to evaluate this assumption, as failure to detect and account for stock structure in assessments and management of these species could lead to local over-fishing and potentially severe declines (Hutchings, 2000; Pauly *et al.*, 2003) or, conversely, to unnecessary restrictions on fishing.

An important consideration in the management of tunas is understanding the distribution of the stocks of fish being exploited and the movement patterns of individuals within those stocks. Stock identification is a critical component in the realistic application of population dynamics models to bigeye, yellowfin, and skipjack tunas in the EPO. The term “stock,” as used here, does not necessarily correspond to a genetically-distinct group, but refers to individuals that can be grouped by common phenotypic and life history characteristics within a geographic region; reproductive isolation is not a criterion.

Various stock identification methodologies have been employed for marine fishes (Ihssen *et al.*, 1981; Begg and Waldman, 1999). Most inferences about population structure of tunas in the Pacific Ocean have come from fisheries statistics and from data on tagging, spawning, morphometric and/or meristic characters, parasites as biological markers, immunogenetics, allozyme variation, mitochondrial DNA (mtDNA) or nuclear DNA (nDNA), and elemental composition of otoliths. Each methodology has advantages and disadvantages, including how each character set relates differently to the delineation of stocks and their usefulness within stock assessments and fisheries management. Tagging data apparently

have the most merit in providing estimates of home range distributions and delineation of stock structure, diffusion rates, and the extent of mixing between regions. However, several investigators suggest a multi-method approach, which should include a genetic method together with tag-recapture or a phenotypic method (Begg and Waldman, 1999).

Tag release and recapture experiments, utilizing lastic dart tags, conducted for several species of tunas in various areas of the world's oceans, have provided valuable information on movements and population structure (Hunter *et al.*, 1986; Bayliff, 1993). In recent years tuna-tagging experiments utilizing geolocating archival tags(, have provided significant data toward understanding the spatial dynamics, habitat utilization, and stock structure for the species investigated (Arnold and Dewar, 2001; Gunn and Block, 2001; Block, 2005).

Other stock identification methodologies are, however, important, as they can provide complementary information toward understanding the extent and temporal stability of the stock structure of tunas. Several morphometric and meristic studies have provided results useful for identifying marine fish stocks, including tunas (Winans, 1987; Schaefer, 1992). Investigations of the geographic variation in life history characteristics, including growth and reproductive parameters, have also provided useful information regarding stock structure of tunas (Schaefer, 2001a). Genetic analyses, including mtDNA and nDNA, of tunas have mostly failed to demonstrate differences in the level of genetic heterogeneity for species within ocean basins (Ely *et al.*, 2005). The genetic differentiation of stock structure of marine fish has been particularly difficult (Ward, 2000), and for highly-mobile tunas it is more problematic, as long-range movements of a few individuals per generation can result in genetic homogeneity among stocks (Ward, 1995).

The objective of this document was to compile and evaluate the scientific information available to elucidate stock structure of bigeye, yellowfin, and skipjack tunas within the EPO.

3. STOCK STRUCTURE

3.1. Bigeye tuna (*Thunnus obesus*)

3.1.1. Catch distribution

Bigeye were caught by purse-seine vessels during 1996-2006 from about 35°N to 25°S (but mostly between about 10°N and 20°S) and from the coast of the Americas west to about 150°W (Anonymous, 2008: Figure A-3). Those catches have been dominated by fish caught in association with floating objects, with small amounts caught in sets on unassociated schools. Bigeye were caught in the EPO by longline vessels during 2000-2004 from about 35°N to 35°S, but primarily in two fairly distinct areas, a southern area between about 10°N and 20°S from coastal waters to 150°W, and a northern area between about 15°N and 35°N from 130°W to 150°W (Anonymous, 2008: Figure A-4).

3.1.2. Spawning

Spawning occurs widely across the equatorial Pacific during most months of the year, with the greatest reproductive potential in the EPO, based on apparent maturation, size-frequency, and catch-per-unit-of-effort data (Kikawa, 1966; Nishikawa *et al.* 1985; Miyabe, 1994). In a recent study of reproductive biology of bigeye in the eastern and central Pacific (Schaefer *et al.*, 2005), spawning was observed between about 15°N and 15°S from about 105°W to 175°W, and occurred during most months of the year in which the sea-surface temperatures exceeded about 24°C. However, the sampling coverage in that study was inadequate for a comprehensive description of the spatiotemporal distributions of spawning in the eastern and central Pacific.

3.1.3. Tagging

A total of 19,142 bigeye tuna was captured, tagged, and released with PDTs, and 323 with ATs, in the equatorial EPO during March to May of 2000 and 2002 through 2005, of which 8,246 (43.1%) and 163 (50.5%), respectively, were recaptured and their tags returned (Schaefer and Fuller, 2008). Times at

liberty ranged from 1.7 to 1,810.7 days ($\bar{x} = 66.5$, SE = 1.7). Linear displacements, from release to recapture positions, ranged from 0 to 3,830.1 nautical miles (nm) ($\bar{x} = 299.9$, SE = 4.1). Of the 6,562 bigeye at liberty for more than 30 days, 95% were recaptured within 1,017 nm of their release positions. The 95% and 50% utilization distributions, based on 11,585 positions for the combined 98 bigeye AT data sets, from fish at liberty for greater than 30 days, were 1,326,325 km² and 60,667 km², respectively, and were centered between about 3°N and 5°S and 90°W and 105°W. The tagging data from this study, and a previous study (Schaefer and Fuller, 2002) indicate that bigeye exhibit regional fidelity to this area of very high biological productivity, and suggests a very low level of mixing between the eastern and western Pacific bigeye stocks.

Movements of bigeye inferred from deployments and recoveries of PDTs in the western Pacific (Hampton and Gunn, 1998; Hampton and Williams, 2005; Anonymous, 2008: Figure D-3) and Hawaii (Itano and Holland, 2000), and those from ATs in the western Pacific (Clear *et al.*, 2005) also strongly suggest relatively restricted horizontal movements and regional fidelity to geographically-confined areas.

3.1.4. Morphometric and meristic characters

There have apparently been no investigations of geographic differences in morphometric or meristic characters of bigeye in the EPO.

3.1.5. Genetics

The genetic structure of bigeye has been investigated, using of muscle samples collected in selected locations across the Pacific in 1995 (Grewe and Hampton, 1998). Genetic analyses of the samples involved the assessment of mitochondrial DNA and nuclear DNA microsatellite allele frequency variation. Initially an evaluation of samples from the two most distant locations, Ecuador and the Philippines, indicated that most alleles at each of eight loci were found in samples from both areas, and there were no significant differences between the samples from those locations. Four loci were then chosen for analyses of all samples collected from each sample location. The overall results of the genetic study did not provide evidence of genetic differentiation of bigeye in the Pacific.

3.1.6. Biological markers

There have apparently been no investigations of potential geographic differences in naturally-occurring biological markers of bigeye in the EPO.

3.1.7. Conclusions

The results of bigeye tagging studies in the eastern and western Pacific Ocean (Anonymous, 2008: Figure D3) demonstrate restricted movements, with very limited mixing of fish between areas separated by distances greater than about 1,000 miles. In the EPO, there appears to be a discontinuity at about 10°N in the distribution of longline catches. The bigeye tagging studies recently undertaken in the equatorial EPO demonstrate that movements are restricted primarily to the equatorial region, and no movement from the southern to the northern region of the longline catch distribution was observed. Bigeye within those two regions of the EPO, separated at about 10°N, potentially represent spatially-segregated northern and southern sub-stocks, with little mixing between them.

3.2. Yellowfin tuna (*Thunnus albacares*)

3.2.1. Catch distribution

Yellowfin were caught by purse-seine vessels during 1996-2006 from about 30°N to 20°S and from the coast of the Americas west to about 150°W (Anonymous, 2008: Figure A-1). Those catches have been dominated by fish caught in association with dolphins, followed by unassociated fish, with much smaller amounts of fish caught in association with floating objects. Yellowfin were caught by longline vessels during 2000-2004 from about 30°N to 45°S, but primarily in the southeastern Pacific between about 10°S and 30°S and from the coast of South America to about 150°W (Anonymous, 2008: Figure A-4).

3.2.2. Spawning

Yellowfin spawning occurs over vast areas of the Pacific Ocean and throughout the year in the warm northern equatorial waters, but in the more northern or southern regions it is restricted to periods when the sea-surface temperatures exceed 24°C (Schaefer, 2001a). In the EPO, where spawning occurs all year round between 0° and 20°N, the proportions of reproductively-active females are positively correlated with fluctuations in sea-surface temperatures (Schaefer, 1998). The expansion of suitable spawning habitat for yellowfin in the EPO with the northward and southward movements of the 24°C surface isotherms into the subtropical regions north of 20°N and south of 0° during the respective northern and southern hemisphere summer months, and the apparent movement of yellowfin into these regions and subsequent spawning, constitute possibly the mechanism which generates, in some years, two observed cohorts about 6 months apart in the length-frequency data for the yellowfin population (Schaefer, 1998).

Yellowfin mature at lesser sizes off Central America than in the northern areas off southern Baja California, the southern part of the Gulf of California, and the Revillagigedo Islands (Schaefer and Orange, 1956; Orange, 1961). Additional research has been conducted to evaluate the relationships between age, growth, and maturation of yellowfin and the potential geographic variation in those relationships (Schaefer, 1998). The growth rates for the fish from the southern area are apparently greater than those for fish from the northern area (where sea-surface temperatures are significantly lower) until the fish are just under 3 years of age, at which time they decrease. Earlier onset of maturation was observed in the southern area.

3.2.3. Tagging

Tagging studies on yellowfin throughout the EPO, utilizing PDTs, have indicated that movements of tagged fish at liberty for more than 30 days tend to be restricted to less than 1,000 miles of their release positions (Schaefer *et al.*, 1961; Fink and Bayliff, 1970; Bayliff and Rothschild, 1974; Bayliff, 1979, 1984; Anonymous, 2007). These studies indicate regional fidelity to areas of tagging, with little exchange of fish between the northern and southern regions of the EPO. Joseph *et al.*, (1964) stated that yellowfin is not a far-ranging species, and that the majority of recovered fish had been caught within 200 miles of the area of release, based upon 55,737 yellowfin tagged during 1952-1962 and a total of 6,086 recoveries. Hunter *et al.*, (1986: Figure 10) provided data on distances traveled by yellowfin released in the EPO that were at liberty for various time intervals, indicating that almost all fish free for more than 31 days had been recaptured within 750 miles of the area of release. Schaefer (1967) reported that movement patterns of yellowfin within the EPO from tag recoveries “indicate that it is not inhabited by a single rapidly-intermixing population. It appears that there may be at least two sub-populations, with an approximate boundary near 15°N latitude.” Fink and Bayliff (1970) also noted the presence of “two main groups” north and south of about 15°N, but stated that “there is considerable intermingling among the fish of the two groups.”

In a recent study of yellowfin movements and behavior, utilizing ATs implanted in fish during 2002 and 2003 and released off Baja California, the most probable movement paths for 20 of the fish at liberty for 154 or more days indicated that 19 (95%) remained within 900 miles of their release locations (Schaefer *et al.*, 2007).

The results from yellowfin tagging studies in the EPO, using both PDTs and ATs, indicate restricted movements and regional fidelity to areas of tagging and release. Similar conclusions were reached from recent evaluations of extensive data for tagging with PDTs in the WCPO (Sibert and Hampton, 2003).

3.2.4. Morphometric and meristic characters

Analyses of morphometric data from yellowfin collected from various locations in the EPO to assess geographic and temporal variation of morphometric characters indicated significant differences between fish sampled from north and south of 15°N-20°N (Schaefer, 1989). The results clearly demonstrated geographic variation in morphometric characters of yellowfin in the EPO, suggesting differences between

the life histories of the northern and southern groups.

Further research (Schaefer 1991; 1992) has shown morphometric and meristic differences among fish from the eastern, central, and western Pacific, and also latitudinal differences for fish from both the eastern and western Pacific. Although there is annual variability in the morphometric characters, the results demonstrated that the stocks examined are morphometrically distinguishable and that their phenetic relationships reflect their geographic origin (Schaefer, 1992). Geographic variation observed in morphometric characters and gill raker counts of yellowfin from northern and southern regions of the EPO results from restricted movements, limited mixing, and environmental variation (Schaefer, 1992).

3.2.5. Genetics

There have been several genetic studies across the Pacific, none of which showed statistically-significant geographic variation. A study based on mitochondrial DNA, comparing samples across the Pacific from five spatially-isolated locations and one from the Atlantic, reported considerable variation, but no differences among samples (Scoles and Graves, 1993). Further genetic analyses of yellowfin samples from the Pacific, using mitochondrial DNA, provided limited evidence of genetic heterogeneity between eastern Pacific and the central and western Pacific samples (Ward *et al.*, 1994).

Microsatellites are reportedly a powerful tool, with high resolution, for discrimination of genetic differences among fish populations (O'Connell and Wright, 1997). A recent genomic study utilizing microsatellite variation has provided some preliminary evidence of the presence of discrete northern and southern populations, separated by the equator, in the EPO (Diaz-Jaimes and Uribe-Alcocer, 2006). The authors caution, however, that the spatial differentiation observed may be due to temporal variation or non-random sampling, and their preliminary results need to be corroborated through further studies incorporating larger sample sizes and temporal replicates.

3.2.6. Biological markers

Studies of the stable nitrogen isotopes of yellowfin suggest limited movements in the EPO. The stable isotope values from the muscle tissue of a yellowfin reflect its food and nutrient sources during a previous period of time, the length of which is determined by the rates of tissue turnover. Furthermore, the isotope values are a function of not only what species of prey it ate, but also the locations at which it consumed the prey. The isotope values measured in the muscle of yellowfin in the EPO exhibited a similar geographical trend to those of copepods, a proxy for the base of the food web, increasing gradually over a south to north range of almost 35 degrees (Popp *et al.*, 2007). These observations show that spatial trends in stable nitrogen isotopes at the base of the food web are mirrored in the muscle of yellowfin, implying limited movements over the 6-8 months prior to capture.

3.2.7. Conclusions

The results from tagging experiments, along with investigations of geographic variation in length at maturity, morphometrics, and stable nitrogen isotopes of yellowfin in the EPO, demonstrate restricted movements, with fidelity to northern and southern regions of the EPO. Yellowfin within those two regions of the EPO, separated at about 15°N, probably represent spatially-segregated northern and southern sub-stocks with limited mixing between them. Furthermore, the results of tagging studies, utilizing PDTs and/or ATs, indicate very limited mixing between areas separated by distances greater than about 1,000 miles.

3.3. Skipjack tuna (*Katsuwonus pelamis*)

3.3.1. Catch distribution

Skipjack were caught by purse-seine vessels during 1996-2006 from about 35°N to 25°S and from the coast of the Americas west to about 150°W (Anonymous, 2008: Figure A-2). Those catches have been dominated by sets on unassociated fish and fish caught in association with floating objects, with much smaller amounts caught in association with dolphins. The catches of unassociated fish occurred mostly

between about 5°N and 5°S and from the coast to about 95°W. The catches of fish associated with floating objects takes place primarily between 5°N and 15°S and from the coast to about 115°W. Small amounts of skipjack are caught with longline gear (Anonymous, 2008).

3.3.2. Spawning

Spawning of skipjack in the Pacific Ocean occurs throughout the year in tropical waters, and seasonally in subtropical waters (Schaefer, 2001a). Early research on the reproductive biology of skipjack in the EPO indicated spawning off Central America, off Baja California, and near the Revillagigedo Islands (Schaefer and Orange, 1956; Orange, 1961). It was concluded from these studies that skipjack spawning in the EPO occurs mainly offshore. It was later assumed, however, that skipjack did not reproduce in the EPO, but migrated to the central Pacific to spawn (Rothschild, 1965). This hypothesis has been recently tested, and the results indicate that significant spawning of skipjack 50 cm or greater in length occurs in areas of the EPO where sea-surface temperatures are 24°C or greater, but appears to be more concentrated offshore, west of 95°W (Schaefer, 2001b). The extensive compilation of data on larval scombrids by Nishikawa *et al.* (1985) also indicates that there is widespread spawning of skipjack east of 150°W between 10°S and 10°N, mostly west of 110°W.

Skipjack were found to mature at lesser sizes off Central America than in the northern areas off southern Baja California (Schaefer and Orange, 1956; Orange, 1961), indicating geographic variation, most likely from limited mixing and environmental variation.

3.3.3. Tagging

There is a large volume of information on skipjack movements in the WCPO (Kearney, 1983). Although there were numerous long-distance movements of individual tagged skipjack observed, the overall percentage of recoveries with displacements of more than 200 miles was only 17%, and there are few probable migration routes revealed from the recovery of tagged skipjack (Wild and Hampton, 1994). Furthermore, when considering skipjack on a Pacific-wide basis, particularly the areas of tagging operations in the WCPO, it was concluded that skipjack did not appear to migrate toward specific areas for feeding or spawning but appeared to move in more or less random directions within broad limits (Hunter *et al.*, 1986). There have been no recoveries in the EPO from skipjack tagged in the WCPO. The assumed eastward migration routes of juveniles described in the skipjack migration model (Rothschild, 1965) lack validation, and the hypothesis about the energetic advantages of migration to the EPO using the North Equatorial Countercurrent and the Equatorial Undercurrent (Williams, 1972) is unsubstantiated.

Numerous tagging studies have also been conducted in the EPO to investigate movements of skipjack tuna (Schaefer *et al.*, 1961; Fink and Bayliff, 1970; Bayliff, 1984). It appears from these studies that skipjack show some consistency of directed movement in the near-shore regions off Central America and northern South America. In the northern region around the Revillagigedo Islands and the west coast of Baja California, there is a northern and then a southern movement of the fish between 20°N and 30°N in response to the seasonal movements of the 20°C surface isotherm between about May and December. Hunter *et al.*, (1986: Figure 10) provided data on distances traveled by skipjack liberated in the EPO that were at liberty for various time intervals, indicating that almost all fish free 31 to 180 days had been caught within 250 miles of the points of release. A considerable portion of those at liberty for more than 180 days, however, had moved more than 250 miles from the points of release. Although limited, there was some movement of fish reported between the northern and southern areas of the fisheries in the EPO. However, from well over 100,000 skipjack tagged in the EPO and several thousand returns, only 27 skipjack have been recovered in the central or western Pacific, and 21 of those were recaptured around the Hawaiian Islands (Bayliff, 1988: Appendix 2). Of those fish recovered, 19 were tagged off Baja California, four off the Revillagigedo Islands, two off Clipperton Island, and one well offshore at about 4°N and 119°W. Only one skipjack tagged in the near-shore waters off Central America, within the area of the primary fishery, has been recaptured in the central Pacific around Hawaii. Before the recapture of this tagged skipjack, there was no evidence from tagging that fish of the southern group move to the

central Pacific.

Recent tagging of skipjack with PDTs in the equatorial EPO, concurrently with bigeye and yellowfin tagging described above, provides useful comparative information on linear displacements of the tagged fish, determined from release and recapture positions. The overall distributions of the recaptures for the skipjack, bigeye, and yellowfin tunas tagged in similar locations show similar latitudinal and longitudinal ranges of dispersion (Anonymous, 2007). After 30 days at liberty, 95% of the recaptured skipjack were within 1,350 miles of their release positions, and 93% were recaptured within 1,000 miles of those positions.

Too much emphasis has been placed on long-range movements of a few tagged skipjack. The tagging data for skipjack in the EPO support only offshore-onshore movements and north-south movements. Similar conclusions were reached from recent evaluations of extensive skipjack data from tagging with dart tags in the WCPO (Sibert and Hampton, 2003).

3.3.4. Morphometric and meristic characters

A morphometric study has shown significant differences between skipjack from the EPO and the central Pacific (Hawaii and French Polynesia) (Hennemuth, 1959). These differences could indicate a low level of mixing of skipjack between the central Pacific and the EPO.

3.3.5. Genetics

Genetic studies of skipjack samples across the Pacific, using isozymes have demonstrated an east-west cline in a serum esterase allele (Fujino, 1976; Richardson, 1983; Fujino, 1996). Differences were also demonstrated in esterase allele frequencies in samples from the Atlantic, Indian, and Pacific Oceans by Fujino (1981). However, the results of mtDNA analyses of small numbers of skipjack samples from the Pacific and Atlantic appeared nearly identical (Graves *et al.*, 1984). Also, no genetic differentiation was observed between reasonable sample sizes of Atlantic and Pacific skipjack or between skipjack samples from the eastern and western Pacific Ocean using DNA isolation, mtDNA D-loop region amplification, and nucleotide sequence analyses methodologies (Ely *et al.*, 2005).

3.3.6. Biological markers

The chemical composition of skipjack otoliths collected from the EPO and Hawaii was analyzed using electron-beam microprobes (Ianneli, 1993). The results of chemical analyses of the early growth zones on those otoliths were found to be similar.

3.3.7. Conclusions

The results from tagging experiments, along with investigations of geographic variation in length at maturity of skipjack in the EPO, demonstrate restricted movements, with fidelity to northern and southern regions of the EPO. The results of tagging studies indicate low levels of mixing between areas separated by distances greater than about 1,000 miles. Skipjack within two regions of the EPO, separated at about 15°N, probably represent spatially-segregated northern and southern sub-stocks with limited mixing between them.

ESTRUCTURA DE LAS POBLACIONES DE LOS ATUNES PATUDO, ALETA AMARILLA, Y BARRILETE EN EL OCÉANO PACÍFICO ORIENTAL

by

Kurt M. Schaefer

ÍNDICE

1. Resumen.....	210
2. Introducción.....	210
3. Estructura de las poblaciones.....	211
3.1 Atún patudo.....	211
3.2 Atún aleta amarilla.....	213
3.3 Atún barrilete.....	215
Literatura citada.....	218

1. RESUMEN

Ha sido demostrada la fidelidad regional de los atunes patudo, aleta amarilla, y barrilete en el Océano Pacífico oriental (OPO), con niveles bajos de mezcla esperados con las poblaciones en el Océano Pacífico central y occidental. En el presente documento se revisa, evalúa y compila la información científica disponible para elucidar la estructura de las poblaciones de estas tres especies en el OPO. La evidencia indica que existen probablemente subpoblaciones del norte y del sur de patudo (con separación en aproximadamente 10°N), a partir de datos de marcado; subpoblaciones del norte y del sur de aleta amarilla (con separación en aproximadamente 15°N), a partir de datos de marcado, talla de madurez, morfométricos, y de isótopos estables de nitrógeno; y subpoblaciones del norte y del sur de barrilete (con separación en aproximadamente 15°N), a partir de datos de marcado y talla de madurez. Todavía no quedan bien definidos el alcance espacial de esas poblaciones y los grados de mezcla. Lo más probable es que los límites de las poblaciones oscilen dentro de unos pocos grados de latitud relativos a la variabilidad estacional y anual de las condiciones oceanográficas. Es necesaria una mayor investigación para elucidar la distribución geográfica y las interacciones de las subpoblaciones.

2. INTRODUCCIÓN

Considerando que los atunes patudo, aleta amarilla, y barrilete se encuentran ampliamente distribuidos por todas las aguas tropicales y subtropicales del Océano Pacífico (Collette y Nauen, 1983), son capaces de dispersarse bastante rápidamente por toda su zona de distribución (Hunter *et al.*, 1986), y demuestran un desove extenso en área y tiempo (Schaefer, 2001a), es razonable suponer que demostrarían poca estructura de población intraespecífica en el Océano Pacífico oriental (OPO). No obstante, es crítico que se evalúe este supuesto, ya que no detectar y tomar en cuenta la estructura de las poblaciones en las evaluaciones y la ordenación de estas especies podría conducir a una sobrepesca local y disminuciones potencialmente graves (Hutchings, 2000; Pauly *et al.*, 2003) o, a la inversa, a restricciones innecesarias de la pesca.

Una consideración importante en la ordenación de los atunes es comprender la distribución de las poblaciones de peces que son explotadas y los patrones de desplazamiento de los individuos dentro de esas poblaciones. La identificación de las poblaciones es un componente crítico en la aplicación realista de los modelos de dinámica poblacional a los atunes patudo, aleta amarilla, y barrilete atunes en el OPO. El término “población,” tal como se usa en la presente, no corresponde necesariamente a un grupo genéticamente separado, sino que se refiere a individuos que pueden ser agrupados por sus características comunes fenotípicas y de ciclo vital dentro de una región geográfica; el aislamiento reproductor no es un criterio.

Se han usado varias metodologías de identificación de poblaciones para los peces marinos (Ihssen *et al.*, 1981; Begg y Waldman, 1999). La mayoría de las inferencias sobre la estructura de las poblaciones de

atunes en el Océano Pacífico provienen de estadísticas de pesca y de datos de marcado, desove, características morfométricas y/o merísticas, parásitos como marcadores biológicos, inmunogenética, variación de alozimas, ADN mitocondrial (mtADN) o nuclear (nADN), y composición elemental de los otolitos. Cada metodología tiene ventajas y desventajas, incluyendo diferencias en la forma en que cada conjunto de características contribuye a la delineación de las poblaciones, y la utilidad de estos conjuntos en las evaluaciones de las poblaciones y la ordenación de las pesquerías. Los datos de marcado tienen aparentemente el mayor mérito como base para las estimaciones de la distribución de las zonas base y la delineación de la estructura de la población, tasas de difusión, y el grado de mezcla entre regiones. No obstante, varios investigadores sugieren el uso de múltiples métodos, que deberían incluir un método genético junto con un método de marcado y recaptura o fenotípico (Begg y Waldman, 1999).

Los experimentos de liberación y recaptura de marcas, usando marcas de dardo plásticas, realizados con varias especies de atunes en distintas áreas de los océanos del mundo, han producido información valiosa sobre los desplazamientos y la estructura de las poblaciones (Hunter *et al.*, 1986; Bayliff, 1993). En años recientes, experimentos de marcado de atunes con marcas archivadoras geolocalizadoras han producido datos importantes para entender la dinámica espacial, utilización de hábitat, y estructura de población de las especies investigadas (Arnold y Dewar, 2001; Gunn y Block, 2001; Block, 2005).

Otras metodologías de identificación de poblaciones son también importantes, ya que pueden brindar información complementaria útil para comprender el alcance y la estabilidad temporal de la estructura de las poblaciones de atunes. Varios estudios morfométricos y merísticos han producido resultados útiles para identificar poblaciones de peces marinos, incluyendo los atunes (Winans, 1987; Schaefer, 1992). Investigaciones de la variación geográfica de las características del ciclo vital, incluyendo los parámetros de crecimiento y reproducción, han asimismo producido información útil sobre la estructura de las poblaciones de atunes (Schaefer, 2001a). Los análisis genéticos, incluyendo mtADN y nADN, de los atunes generalmente no han podido demostrar diferencias en el grado de heterogeneidad genética de especies dentro de cuencas oceánicas (Ely *et al.*, 2005). La diferenciación genética de la estructura de poblaciones de peces marinos ha sido particularmente difícil (Ward, 2000), y es más problemática para los atunes, altamente móviles, ya que desplazamientos grandes por unos pocos individuos por generación puede resultar en homogeneidad genética entre poblaciones (Ward, 1995).

La meta del presente documento fue compilar y evaluar la información científica disponible para elucidar la estructura de las poblaciones de los atunes patudo, aleta amarilla, y barrilete en el OPO.

3. ESTRUCTURA DE LAS POBLACIONES

3.1. Atún patudo (*Thunnus obesus*)

3.1.1. Distribución de las capturas

Durante 1996-2006 los buques de cerco capturaron patudo desde aproximadamente 35°N hasta 25°S (pero principalmente entre aproximadamente 10°N y 20°S) y desde el litoral del continente americano al oeste hasta aproximadamente 150°O (Anónimo, 2008: Figura A-3). Esas capturas han sido dominadas por peces capturados en asociación con objetos flotantes, con pequeñas cantidades capturadas en lances sobre atunes no asociados. Durante 2000-2004 los buques de palangre capturaron patudo desde aproximadamente 35°N hasta 35°S, pero principalmente en dos áreas bastante separadas, una en el sur, entre aproximadamente 10°N y 20°S desde las aguas costeras hasta 150°O, y otra en el norte, entre aproximadamente 15°N y 35°N desde 130° hasta 150°O (Anónimo, 2008: Figura A-4).

3.1.2. Desove

El desove tiene lugar en zonas extensas del Pacífico ecuatorial durante la mayoría de los meses del año, con el mayor potencial de reproducción en el OPO, a partir de datos de maduración aparente, frecuencia de talla, y captura por unidad de esfuerzo (Kikawa, 1966; Nishikawa *et al.* 1985; Miyabe, 1994). En un estudio reciente de la biología reproductora del patudo en el Pacífico oriental y central (Schaefer *et al.*,

2005), se observó desove entre aproximadamente 15°N y 15°S desde aproximadamente 105°O hasta 175°O, y tuvo lugar durante la mayoría de los meses del año en los que la temperatura superficial del mar superó los 24°C, aproximadamente. No obstante, la cobertura de muestreo en ese estudio fue insuficiente para una descripción integral de la distribución espaciotemporal del desove en el Pacífico oriental y central.

3.1.3. Marcado

Un total de 19.142 atunes patudo fueron capturados, marcados, y liberados con marcas de dardo, y 323 con marcas archivadoras, en el OPO ecuatorial entre marzo y mayo de 2000 y 2002-2005, de los cuales 8.246 (43,1%) y 163 (50,5%), respectivamente, fueron recapturados y sus marcas devueltas (Schaefer y Fuller, 2008). Los períodos en libertad variaron entre 1,7 y 1.810,7 días ($\bar{x} = 66,5$, EE = 1,7). Los desplazamientos lineales entre la liberación y la posición de recaptura variaron entre 0 y 3.830,1 millas náuticas (mn) ($\bar{x} = 299,9$, EE = 4,1). De los 6.562 patudos en libertad más de 30 días, el 95% fue recapturado a menos de 1.017 mn de su posición de liberación. Las distribuciones de utilización de 95% y 50% de peces más de 30 días en libertad, basadas en 11.585 posiciones en los conjuntos de datos combinados correspondientes a 98 patudos con marcas archivadoras, fueron 1.326.325 km² y 60.667 km², respectivamente, y estuvieron centradas entre aproximadamente 3°N y 5°S y 90°O y 105°O. Los datos de marcado del presente estudio, y un estudio previo (Schaefer y Fuller, 2002) indican que el patudo muestra fidelidad regional a esta área de muy alta productividad biológica, y sugiere un nivel de mezcla muy bajo entre las poblaciones de patudo del Pacífico oriental y occidental.

Los desplazamientos de patudos inferidos de la aplicación y recuperación de marcas de dardo en el Pacífico occidental (Hampton y Gunn, 1998; Hampton y Williams, 2005; Anónimo, 2008: Figura D-3) y Hawai (Itano y Holland, 2000), y de marcas archivadoras en el Pacífico occidental (Clear *et al.*, 2005) asimismo sugieren claramente desplazamientos horizontales relativamente restringidos y fidelidad regional a zonas geográficamente confinadas.

3.1.4. Características morfométricas y merísticas

Aparentemente no se han realizado investigaciones de diferencias geográficas de las características morfométricas o merísticas del patudo en el OPO.

3.1.5. Genética

La estructura genética del patudo ha sido investigada, usando muestras de músculo tomadas en puntos seleccionados en el Pacífico en 1995 (Grewe y Hampton, 1998). Los análisis genéticos de las muestras implicaron la evaluación de la variación de la frecuencia de los alelos microsatelitales de ADN mitocondrial y ADN nuclear. Inicialmente, una evaluación de muestras de los dos puntos más distantes, Ecuador y Filipinas, indicó que la mayoría de los alelos en cada uno de ocho loci fueron encontrados en muestras de ambas áreas, y que no hubo diferencias significativas entre las muestras de esos lugares. Se seleccionaron cuatro loci para análisis de todas las muestras tomadas de cada lugar de muestreo. Los resultados generales del estudio genético no brindaron pruebas de diferenciación genética del patudo en el Pacífico.

3.1.6. Marcadores biológicos

Aparentemente no se han realizado investigaciones de diferencias geográficas potenciales en los marcadores biológicos que ocurren naturalmente en el patudo en el OPO.

3.1.7. Conclusiones

Los resultados de los estudios de marcado de patudo en el Océano Pacífico oriental y occidental (Anónimo, 2008: Figura D3) demuestran desplazamientos limitados, con una mezcla muy limitada de peces entre áreas separadas por distancias de más de unas 1.000 millas náuticas. En el OPO, parece ocurrir una discontinuidad en aproximadamente 10°N en la distribución de las capturas de palangre. Los

estudios de marcado de patudo realizados recientemente en el OPO ecuatorial demuestran que los desplazamientos están limitados principalmente a la región ecuatorial, y no se observó desplazamiento de la distribución de las capturas de palangre de la región del sur a la del norte. El patudo dentro de esas dos regiones del OPO, separadas en aproximadamente 10°N, representa potencialmente subpoblaciones del norte y del sur espacialmente segregadas, con poca mezcla entre las dos.

3.2. Atún aleta amarilla (*Thunnus albacares*)

3.2.1. Distribución de las capturas

El aleta amarilla fue capturado con red de cerco durante 1996-2006 desde aproximadamente 30°N hasta 20°S y desde el litoral americano al oeste hasta aproximadamente 150°O (Anónimo, 2008: Figura A-1). Esas capturas han sido dominadas por peces capturados en asociación con delfines, seguidos por peces no asociados, con cantidades mucho menores de peces capturados en asociación con objetos flotantes. El aleta amarilla fue capturado con palangre durante 2000-2004 desde aproximadamente 30°N hasta 45°S, pero principalmente en el Pacífico sudeste entre aproximadamente 10°S y 30°S y desde la costa de América del Sur hasta aproximadamente 150°O (Anónimo, 2008: Figura A-4).

3.2.2. Desove

El desove del aleta amarilla ocurre en áreas vastas del Océano Pacífico y durante todo el año en las aguas ecuatoriales norteñas cálidas, pero en las regiones más al norte y al sur está limitado a los períodos en los que la temperatura de superficie del mar supera los 24°C (Schaefer, 2001a). En el OPO, dónde el desove ocurre durante todo el año entre 0° y 20°N, la proporción de hembras reproductivamente activas está positivamente correlacionada con fluctuaciones de la temperatura de superficie del mar (Schaefer, 1998). La expansión del hábitat adecuado para el aleta amarilla en el OPO con los desplazamientos hacia norte y sur de los isoterms superficiales de 24°C a las regiones subtropicales al norte de 20°N y al sur de 0° durante los meses de verano respectivos de los hemisferios norte y sur, y el desplazamiento aparente del aleta amarilla a estas regiones y el desove subsiguiente, constituyen posiblemente el mecanismo que genera, en algunos años, dos cohortes observadas a aproximadamente unos seis meses uno del otro en los datos de frecuencia de talla de la población de aleta amarilla (Schaefer, 1998).

El aleta amarilla madura a edades menores frente a Centroamérica que en las zonas del norte frente al sur de Baja California, la parte sur del Golfo de California, y las islas Revillagigedo (Schaefer y Orange, 1956; Orange, 1961). Se han realizado investigaciones adicionales para evaluar las relaciones entre la edad, el crecimiento, y la maduración del aleta amarilla y la variación geográfica potencial en estas relaciones (Schaefer, 1998). Las tasas de crecimiento de los peces de la zona sur son aparentemente mayores que aquéllas de los peces de la zona norte (donde la temperatura superficial del mar es significativamente menor) hasta que los peces alcancen casi los 3 años de edad, en cual momento disminuyen. En la zona sur se observó un inicio más temprano de la maduración.

3.2.3. Mercado

Los estudios de marcado de aleta amarilla por todo el OPO, usando marcas de dardo, indican los desplazamientos de peces marcados más de 30 días en libertad suelen estar limitados a menos de 1.000 millas de su punto de liberación (Schaefer *et al.*, 1961; Fink y Bayliff, 1970; Bayliff y Rothschild, 1974; Bayliff, 1979, 1984; Anónimo, 2007). Estos estudios indican fidelidad regional a las áreas de marcado, con poco intercambio de peces entre las regiones norte y sur del OPO. Con base en 55.737 aletas amarillas marcadas entre 1952 y 1962 y un total de 6.086 recuperaciones, Joseph *et al.*, (1964) manifestaron que el aleta amarilla no es una especie que viaja largas distancias, y que la mayoría de los peces recuperados fueron capturados a menos de 200 millas del área de liberación. Hunter *et al.*, (1986: Figura 10) proveyeron datos sobre las distancias cubiertas por aletas amarillas liberados en el OPO que estuvieron en libertad durante varios períodos, indicando que casi todos los peces que estuvieron en libertad más de 31 días fueron recapturados a menos de 750 millas náuticas del área de liberación. Schaefer (1967) reportó que los patrones de desplazamiento del aleta amarilla dentro del OPO basados en

recuperaciones de marcas “indican que no está habitado por una sola población que se entremezcla rápidamente. Parece que puedan existir al menos dos subpoblaciones, separados en aproximadamente latitud 15°N.” Fink y Bayliff (1970) también señalaron la presencia de “dos grupos principales” al norte y al sur de aproximadamente 15°N, pero manifestaron que “existe una entremezcla considerable entre los peces de los dos grupos.”

En un estudio reciente de los desplazamientos y comportamiento del aleta amarilla, usando marcas archivadoras implantadas en peces durante 2002 y 2003 y liberados frente a Baja California, las rutas de desplazamiento más probables de 20 de los peces en libertad 154 días o más indicaron que 19 (95%) permanecieron a menos de 900 millas de su punto de liberación (Schaefer *et al.*, 2007).

Los resultados de los estudios de marcado del aleta amarilla en el OPO, usando tanto marcas de dardo como marcas archivadoras, señalan desplazamientos limitados y fidelidad regional a las zonas de marcado y liberación. Se llegó a conclusiones similares en evaluaciones recientes de extensos datos de marcado con marcas de dardo en el Océano Pacífico occidental y central (Sibert y Hampton, 2003).

3.2.4. Características morfométricas y merísticas

Análisis de datos morfométricos de aletas amarillas obtenidos de varios puntos en el OPO para evaluar la variación geográfica y temporal las características morfométricas señalaron diferencias significativas entre peces al norte y al sur de 15°N-20°N (Schaefer, 1989). Los resultados demostraron claramente una variación geográfica en las características morfométricas del aleta amarilla en el OPO, lo que sugiere diferencias entre el ciclo vital del grupo del norte y de aquél del sur.

Investigaciones posteriores (Schaefer 1991; 1992) han demostrado diferencias morfométricas y merísticas entre los peces del Pacífico oriental, central, y occidental, así como diferencias latitudinales entre peces de Pacífico oriental y del Pacífico occidental. Aunque existe variabilidad anual en las características morfométricas, los resultados demostraron que las poblaciones estudiadas son morfométricamente distinguibles y que sus relaciones fenéticas reflejan su origen geográfico (Schaefer, 1992). La variación geográfica observada en las características morfométricas y los conteos de branquiespinas de aletas amarillas de las regiones norte y sur del OPO resulta de desplazamientos limitados, mezcla limitada, y variación ambiental (Schaefer, 1992).

3.2.5. Genética

Se han realizado varios estudios genéticos en el Pacífico, ninguno de los cuales demostró una variación geográfica estadísticamente significativa. Un estudio basado en ADN mitocondrial, que comparó muestras de cinco lugares espacialmente aislados en el Pacífico y una en el Atlántico, reportó una variación considerable, pero ninguna diferencias entre las muestras (Scoles y Graves, 1993). Análisis genéticos posteriores de muestras de aleta amarilla del Pacífico, usando ADN mitocondrial, brindaron pruebas limitadas de heterogeneidad genética entre las muestras del Pacífico oriental y el Pacífico central y occidental (Ward *et al.*, 1994).

Según se informa, los microsatélites son una herramienta potente, con alta resolución, para la discriminación de diferencias genéticas entre poblaciones de peces (O’Connell y Wright, 1997). Un estudio genómico reciente que utilizó variación microsatelital brindó pruebas preliminares de la presencia de poblaciones del norte y del sur, separadas por la línea ecuatorial, (Díaz-Jaimes y Uribe-Alcocer, 2006), pero los autores advierten que la diferenciación espacial observada podría deberse a una variación temporal o a un muestreo no aleatorio, y sus resultados preliminares necesitan ser corroborados mediante estudios que incorporen muestras de mayor tamaño y réplicas temporales.

3.2.6. Marcadores biológicos

Estudios de los isótopos estables de nitrógeno en el aleta amarilla sugieren desplazamientos limitados en el OPO. Los valores de los isótopos estables del tejido muscular del aleta amarilla reflejan su alimento y fuentes de nutrientes durante un período previo de tiempo, cuya duración es determinada por las tasas de

cambio de tejido. Además, los valores de los isótopos son una función de no solamente la especie de la presa consumida, sino también del lugar donde la consumió. Los valores de los isótopos medidos en los músculos del aleta amarilla en el OPO mostraron una tendencia geográfica similar a aquéllos de los copépodos, un sustituto por la base de la red de alimentación, aumentado paulatinamente en una zona de distribución que cubre casi 35 grados de norte a sur (Popp *et al.*, 2007). Estas observaciones demuestran que las tendencias espaciales en los isótopos estables de nitrógeno en la base de la red de alimentación quedan reflejadas en los músculos del aleta amarilla, lo cual implica desplazamientos limitados durante los 6 a 8 meses antes de su captura.

3.2.7. Conclusiones

Los resultados de los experimentos de marcado, junto con las investigaciones de variación geográfica en la talla de madurez, morfométrica, y los isótopos estables de nitrógeno del aleta amarilla en el OPO, demuestran desplazamientos limitados, con fidelidad a las regiones norte y sur del OPO. Los aletas amarillas en estas dos regiones del OPO, separados en aproximadamente 15°N, representan probablemente subpoblaciones del norte y del sur espacialmente segregadas, con poca mezcla entre las dos. Además, los resultados de los estudios de marcados, usando marcas de dardo y/o marcas archivadoras, indican una mezcla muy limitada entre áreas separadas por distancias de más de unas 1.000 millas.

3.3. Atún barrilete (*Katsuwonus pelamis*)

3.3.1. Distribución de las capturas

El barrilete fue capturado con red de cerco durante 1996-2006 desde aproximadamente 35°N hasta 25°S, y desde el litoral americano al oeste hasta aproximadamente 150°O (Anónimo, 2008: Figura A-2). Esas capturas han sido dominadas por peces capturados en lances no asociados y asociados con objetos flotantes, con cantidades mucho menores capturadas en asociación con delfines. Las capturas de peces no asociados tuvieron lugar principalmente entre aproximadamente 5°N y 5°S y desde la costa de América del Sur hasta aproximadamente 95°O, y las capturas de peces asociados con objetos flotantes principalmente entre 5°N y 15°S y desde la costa hasta aproximadamente 115°O. Pequeñas cantidades de barrilete son capturadas con palangre (Anónimo, 2008).

3.3.2. Desove

El desove de barrilete en el Océano Pacífico tiene lugar durante todo el año en aguas tropicales, y en ciertas temporadas del año en aguas subtropicales, (Schaefer, 2001a). Las primeras investigaciones de la biología reproductora del barrilete en el OPO indicaron desove frente a Centroamérica, frente a Baja California, y cerca de las islas Revillagigedo (Schaefer y Orange, 1956; Orange, 1961). A partir de estos estudios, se concluyó que el desove del barrilete en el OPO tiene lugar principalmente en alta mar. No obstante, se supuso luego que el barrilete no se reproduce en el OPO, sino que migra al Pacífico central para desovar (Rothschild, 1965). Esta hipótesis ha sido sometida a prueba recientemente, y los resultados indican que un desove importante de barrilete de 50 cm o más de talla tiene lugar en las zonas del OPO en las que la temperatura superficial del mar es de 24°C o más, pero parece estar más concentrado en el mar, al oeste de 95°O (Schaefer, 2001b). La extensa compilación de datos sobre escómbridos larvales de Nishikawa *et al.* (1985) asimismo señala que existe desove de barrilete ampliamente distribuido al este de 150°O entre 10°S y 10°N, principalmente al oeste de 110°O.

Se descubrió que el barrilete madura a tallas menores frente a Centroamérica que en las áreas más al norte frente al sur de Baja California (Schaefer y Orange, 1956; Orange, 1961), lo cual indica una variación geográfica, debida muy probablemente a una mezcla limitada y variación ambiental.

3.3.3. Mercado

Existe una gran cantidad de información sobre los desplazamientos del barrilete en el Océano Pacífico occidental y central (Kearney, 1983). Aunque fueron observados numerosos desplazamientos de larga

distancia por barriletes individuales, el porcentaje general de recuperaciones con desplazamientos de más de 200 millas fue solamente 17%, y las recuperaciones de barriletes marcados señalan pocas rutas de migración probables (Wild y Hampton, 1994). Además, al considerar al barrilete a escala del Pacífico entero, particularmente las zonas de operaciones de marcado en el Pacífico occidental y central, se concluyó que no parece que el barrilete migre hacia zonas específicas para alimentarse o para desovar, sino que se desplace en direcciones más o menos aleatorias dentro de amplios límites (Hunter *et al.*, 1986). No se ha recuperado en el OPO ningún barrilete marcado en el Pacífico occidental y central. Las rutas supuestas de migración de juveniles hacia el este descritas en el modelo de migración del barrilete (Rothschild, 1965) carecen de validación, y queda por corroborar la hipótesis sobre las ventajas energéticas de una migración al OPO que aprovecha la Contracorriente Ecuatorial del Norte y la Subcorriente Ecuatorial (Williams, 1972).

Han sido realizados en el OPO también numerosos estudios de marcado para investigar los desplazamientos del barrilete (Schaefer *et al.*, 1961; Fink y Bayliff, 1970; Bayliff, 1984). A partir de estos estudios, parece que el barrilete demuestra cierta consistencia de desplazamiento dirigido en las regiones costeras frente a Centroamérica y el norte de América del Sur. En la región norte alrededor de las islas Revillagigedo y la costa occidental de Baja California, tiene lugar un desplazamiento de los peces hacia el norte y luego hacia el sur entre 20°N y 30°N, en reacción a los desplazamientos estacionales del isoterma de superficie de 20°C entre aproximadamente mayo y diciembre. Hunter *et al.*, (1986: Figura 10) presentó datos sobre las distancias recorridas por barriletes liberados en el OPO que estuvieron en libertad durante varios intervalos de tiempo, que indican que casi todos los peces en libertad entre 31 y 180 días fueron capturados a menos de 250 mn de su punto de liberación, pero una porción considerable de aquéllos en libertad más de 180 días se desplazaron más de 250 mn de dicho punto. Fue reportado cierto desplazamiento, aunque limitado, de peces entre las zonas del norte y del sur de las pesquerías en el OPO. No obstante, de los más de 100.000 barriletes marcados en el OPO y los varios miles de devoluciones, solamente 27 barriletes han sido recuperados en el Pacífico central u occidental, y 21 de esos fueron recapturados cerca de las islas de Hawai (Bayliff, 1988: Anexo 2). De esos peces recuperados, 19 fueron marcados frente a Baja California, cuatro frente a las islas Revillagigedo, dos frente a la isla Clipperton, y uno en alta mar en aproximadamente 4°N y 119°O. Solamente un barrilete marcado en aguas costeras frente a Centroamérica, dentro de la zona de la pesquería principal, ha sido recapturado en el Pacífico central cerca de Hawai. Antes de ser recuperado este barrilete marcado, no había ninguna prueba del marcado que los peces de grupo del sur se desplazaran al Pacífico central.

El marcado reciente de barriletes con marcas de dardo en el OPO ecuatorial, simultáneo con el el marcado de patudo y aleta amarilla antes descrito, arroja información comparativa útil sobre los desplazamientos lineales de los peces marcados, determinados a partir de las posiciones de liberación y recaptura. Las distribuciones generales de las recapturas de los atunes barrilete, patudo, y aleta amarilla marcados en lugares similares muestran dispersiones latitudinales y longitudinales similares (Anónimo, 2007). Al cabo de 30 días en libertad, el 95% de los barriletes recapturados se encontraban a menos de 1.350 millas de su posición de liberación, y el 93% fue recapturado a menos de 1.000 millas de dicha posición.

Se ha asignado demasiada importancia a los desplazamientos sobre largas distancias de unos pocos barriletes marcados. Los datos de marcado del barrilete respaldan solamente desplazamientos de alta mar a la costa y de norte a sur en el OPO. Se llegó a conclusiones similares a partir de evaluaciones recientes de datos extensos de marcado con marcas de dardo en el Pacífico occidental y central (Sibert y Hampton, 2003).

3.3.4. Características morfométricas y merísticas

Un estudio morfométrico ha señalado diferencias significativas entre el barrilete del OPO y del Pacífico central (Hawai y Polinesia Francesa) (Hennemuth, 1959). Estas diferencias podrían indicar un bajo nivel de mezcla de barrilete entre el Pacífico central y el OPO.

3.3.5. Genética

Estudios genéticos con isoenzima de muestras de barrilete del Pacífico entero han demostrado una clina de este a oeste en un alelo de esterasa en suero (Fujino, 1976; Richardson, 1983; Fujino, 1996). Asimismo, Fujino (1981) demostró diferencias en las frecuencias de alelo de esterasa en muestras de los Océanos Atlántico, Índico, y Pacífico, pero los resultados de análisis de mtADN de pequeñas cantidades de muestras de barrilete del Pacífico y del Atlántico parecieron casi idénticos (Graves *et al.*, 1984). Además, no se observó diferenciación genética entre muestras de tamaño razonable de barrilete del Atlántico y del Pacífico ni entre muestras de barrilete del Océano Pacífico oriental y occidental usando aislamiento de ADN, amplificación de la región *D-loop* del mtADN, y análisis de la secuencia de nucleótidos (Ely *et al.*, 2005).

3.3.6. Marcadores biológicos

La composición química de los otolitos del obtenidos del OPO y de Hawai fue analizada con microsondas de haz de electrones (Ianneli, 1993). Los resultados de análisis químicos de las zonas de crecimiento temprano en esos otolitos fueron similares.

3.3.7. Conclusiones

Los resultados de los experimentos de marcado, junto con investigaciones de la variación geográfica de la talla de madurez del barrilete en el OPO, demuestran desplazamientos limitados, con fidelidad a las regiones norte y sur del OPO. Los resultados de los estudios de marcado indican bajos niveles de mezcla entre áreas separadas por distancias de más de aproximadamente 1.000 millas. Los barriletes dentro de dos regiones del OPO, divididas en aproximadamente 15°N, representan probablemente subpoblaciones espacialmente segregadas del norte y del sur, con mezcla limitada entre las dos.

LITERATURE CITED—LITERATURA CITADA

- Anonymous. 2008. Tunas and billfishes in the eastern Pacific Ocean in 2006. Fishery Status Report 5. Inter-Amer. Trop. Tuna Comm.: 155 p.
- Anonymous. 2007. Inter-American Tropical Tuna Commission Quarterly Report for October-December 2006 (<http://www.iattc.org/PDFFiles2/IATTCq064ENG.pdf>).
- Arnold, G., and H. Dewar. 2001. Electronic tags in marine fisheries research: a 30-year perspective. In: Sibert, J.R., Nielsen, J.L. (eds) Electronic tagging and tracking in marine fisheries. Kluwer, Dordrecht. The Netherlands, pp 7-64.
- Bayliff, W.H. 1979. Migrations of yellowfin tuna in the eastern Pacific Ocean as determined from tagging experiments initiated during 1968-1974. Inter-Amer. Trop. Tuna Comm., Bull. 17: 447-506.
- Bayliff, W.H. 1984. Migrations of yellowfin and skipjack tuna released in the central portion of the eastern Pacific Ocean, as determined by tagging experiments. Inter-Amer. Trop. Tuna Comm., Intern. Rep. 18: 107 p.
- Bayliff, W.H. 1988. Growth of skipjack, *Katsuwonus pelamis*, and yellowfin, *Thunnus albacares*, tunas in the eastern Pacific Ocean, as estimated from tagging data. Inter-Amer. Trop. Tuna Comm., Bull. 19: 307-385.
- Bayliff, W.H. 1993. An indexed bibliography of papers on tagging of tunas and billfishes. Inter-Amer. Trop. Tuna Comm., Spec. Rept. 8: 91 pp.
- Bayliff, W.H., and B.J. Rothschild. 1974. Migrations of yellowfin tuna tagged off the southern coast of Mexico in 1960 and 1969. Inter-Amer. Trop. Tuna Comm., Bull. 16: 1-64.
- Begg, G.A., and J.R. Waldman. 1999. An holistic approach to fish stock identification. Fish. Res. 43: 35-44.
- Block, B.A. 2005. Physiological ecology in the 21st century: Advancements in biologging science. Integr. Comp. Biol. 45:305-320.
- Clear, N.P., K. Evans, J.S. Gunn, S. Bestley, K. Hartmann, and T. Patterson. 2005. Movement of bigeye tuna (*Thunnus obesus*) determined from archival tag light-levels and sea surface temperatures. In: Migration and habitat preferences of bigeye tuna, *Thunnus obesus*, on the east coast of Australia. CSIRO Report FRPC 1999/109: 19-46.
- Collette, B.B. and C.E. Nauen. 1983. Scombrids of the world. An annotated and illustrated catalogue of tunas, mackerels, bonitos and related species known to date. FAO Fish. Synop. 125: 137 p.
- Diaz-Jaimes, P. and M. Uribe-Alcocer. 2006. Spatial differentiation in the eastern Pacific yellowfin tuna revealed by microsatellite variation. Fish. Sci. 72: 590-596.
- Ely, B., J. Vinas, J.R. Alvarado Bremer, D. Black, L. Lucas, K. Covelto, A.V. Labrie, and E. Thelen. 2005. Consequences of the historical demography on the global population structure of two highly migratory cosmopolitan marine fishes: the yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) and the skipjack tuna (*Katsuwonus pelamis*). Evol. Bio. 5: 19.
- Fink, B.D. and W.H. Bayliff. 1970. Migrations of yellowfin and skipjack tuna in the eastern Pacific Ocean as determined by tagging experiments, 1952-1964. Inter-Amer. Trop. Tuna Comm., Bull. 15: 1-227.
- Fujino, K. 1976. Subpopulation identification of skipjack tuna specimens from the southwestern Pacific Ocean. Bull. Jap. Soc. Sci. Fish. 42: 1229-1235.
- Fujino, K. 1981. Genetic diversity of skipjack tuna in the Atlantic, Indian, and Pacific Oceans. Bull. Jap. Soc. Sci. Fish. 47: 215-222.
- Fujino, K. 1996. Genetically distinct skipjack tuna subpopulations appeared in the central and western Pacific Ocean. Fish. Sci. 62: 189-195.
- Graves, J.E., S.D. Ferris, and A.E. Dizon. 1984. Close genetic similarity of Atlantic and Pacific skipjack

- tuna (*Katsuwonus pelamis*) demonstrated with restriction endonuclease analysis of mitochondrial DNA. *Mar. Biol.* 79: 315-319.
- Grewe, P.M. and J. Hampton. 1998. An assessment of bigeye (*Thunnus obesus*) population structure in the Pacific Ocean, based on mitochondrial DNA and DNA microsatellite analysis. University of Hawaii, Joint Institute for Marine and Atmospheric Research Contribution 98-320, 29 p.
- Gunn, J. and B. Block. 2001. Advances in acoustic, archival, and satellite tagging of tunas. In: Tuna physiology, ecology, and evolution. B.A. Block and E.D. Stevens (eds) San Diego (California): Academic Press, pp. 167-224.
- Hampton, J. and J. Gunn. 1998. Exploitation and movements of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) and bigeye tuna (*T. obesus*) tagged in the north-western Coral Sea. *Mar. Freshwater Res.*, 49: 475-489.
- Hampton, J. and P. Williams. 2005. A description of tag-recapture data for bigeye tuna (*Thunnus obesus*) in the western and central Pacific Ocean. *Inter. Comm. Conser. Atlan. Tunas, Coll. Vol. Sci. Pap.*, 57: 85-93.
- Hennemuth, R.C. 1959. Morphometric comparison of skipjack from the central and eastern tropical Pacific Ocean. *Inter-Amer. Trop. Tuna Comm., Bull.* 3: 239-304.
- Hunter, J.R., A.W. Argue, W.H. Bayliff, A.E. Dizon, A. Fonteneau, D. Goodman, and G.R. Seckel. 1986. The dynamics of tuna movements: an evaluation of past and future research. *FAO Fish. Tech. Pap.*, 277: 78 p.
- Hutchings, J.A. 2000. Collapse and recovery of marine fishes. *Nature* 406: 882-885.
- Ianelli, J.N. 1993. Studies on the population structure of skipjack tuna *Katsuwonus pelamis* in the central and eastern Pacific Ocean. Ph.D. Thesis. University of Washington, Seattle. 215 p.
- Ihssen, P.E., H.E. Booke, J.M. Casselman, J.M. McGlade, N.R. Payne, and F.M. Utter. 1981. Stock identification: materials and methods. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 38: 1838-1855.
- Itano, D.G. and K.N. Holland. 2000. Movement and vulnerability of bigeye (*Thunnus obesus*) and yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) in relation to FADs and natural aggregation points. *Aquat. Living Res.* 13: 213-223.
- Joseph, J., F.G. Alverson, B.D. Fink, and E.B. Davidoff. 1964. A review of the population structure of yellowfin tuna, *Thunnus albacares*, in the eastern Pacific Ocean. *Inter-Amer. Trop. Tuna Comm., Bull.* 9: 53-112.
- Kearney, R.E. 1983. Assessment of the skipjack and baitfish resources in the central and western tropical Pacific Ocean: a summary of the Skipjack Survey and Assessment Programme. South Pacific Commission: 37 pp.
- Kikawa, S. 1966. The distribution of maturing bigeye and yellowfin and an evaluation of their spawning potential in different areas in the tuna longline grounds in the Pacific. *Nankai Reg. Fish. Res. Lab., Rep.* 23: 131-208.
- Miyabe, N. 1994. A review of the biology and fisheries for bigeye tuna, *Thunnus obesus*, in the Pacific Ocean. *FAO Fish. Tech. Pap.* 336: 207-243.
- Nishikawa, Y., M. Honma, S. Ueyanagi, and S. Kikawa. 1985. Average distribution of larvae of oceanic species of scombroid fishes, 1956-1981. *Far Seas Fish. Res. Lab., S Ser.* 12: 99 p.
- O'Connell, M. and J.M. Wright. 1997. Microsatellite DNA in fishes. *Rev. Fish Biol. Fish.* 7: 331-363.
- Orange, C.J. 1961. Spawning of yellowfin and skipjack in the eastern tropical Pacific, as inferred from studies of gonad development. *Inter-Amer. Trop. Tuna Comm., Bull.* 5: 459-526.
- Pauly, D., J. Alder, E. Bennet, V. Christensen, P. Tyedmers, and R. Watson. 2003. The future of fisheries. *Science* 302: 1359-1361.
- Popp, B.N., B.S. Graham, R.J. Olson, C.C.S. Hannides, M.J. Lott, G.A. Lopez-Ibarra, F. Galvan-Magana, and B. Fry. 2007. Insight into the trophic ecology of yellowfin tuna, *Thunnus albacares*, from

- compound-specific nitrogen isotope analysis of proteinaceous amino acids. In Dawson, T.E., and R.T.W. Siegwolf (eds.), *Stable Isotopes as Indicators of Ecological Change*. Elsevier-Academic Press, Terrestrial Ecology Series, San Diego: 173-190.
- Richardson, B.J. 1983. Distribution of protein variation in skipjack tuna (*Katsuwonus pelamis*) from the central and south-western Pacific. *Aus. Jour. Mar. Fresh. Fish.* 34: 231-251.
- Rothschild, B.J. 1965. Hypothesis on the origin of exploited skipjack tuna (*Katsuwonus pelamis*) in the eastern and central Pacific Ocean. *U.S. Fish. Wildl. Serv., Spec. Sci. Rep. Fish.* 512: 20 p.
- Schaefer, K.M. 1989. Morphometric analysis of yellowfin tuna, *Thunnus albacares*, from the eastern Pacific Ocean. *Inter-Amer. Trop. Tuna Comm., Bull.* 19: 387-427.
- Schaefer, K.M. 1991. Geographic variation in morphometric characters and gill-raker counts of yellowfin tuna, *Thunnus albacares*, from the Pacific Ocean. *U.S. Nat. Mar. Fish. Serv., Fish. Bull.* 89: 289-297.
- Schaefer, K.M. 1992. An evaluation of geographic and annual variation in morphometric characters and gill-raker counts of yellowfin tuna, *Thunnus albacares*, from the Pacific Ocean. *Inter-Amer. Trop. Tuna Comm., Bull.* 20: 135-163.
- Schaefer, K.M. 1998. Reproductive biology of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) in the eastern Pacific Ocean. *Inter-Amer. Trop. Tuna Comm., Bull.* 21: 205-272.
- Schaefer, K.M. 2001a. Reproductive biology of tunas. In Block, B.A. and E.D. Stevens (eds.), *Tuna: Physiology, Ecology and Evolution*. Fish Physiology, Academic Press, San Diego, Vol. 19: 225-270.
- Schaefer, K.M. 2001b. Assessment of skipjack tuna (*Katsuwonus pelamis*) spawning activity in the eastern Pacific Ocean. *U.S. Nat. Mar. Fish. Serv., Fish. Bull.*, 99: 343-350.
- Schaefer, K.M. and D.W. Fuller. 2002. Movements, behavior, and habitat selection of bigeye tuna (*Thunnus obesus*) in the eastern equatorial Pacific, ascertained through archival tags. *U.S. Nat. Mar. Fish. Ser., Fish. Bull.* 100: 765-788.
- Schaefer, K.M. and D.W. Fuller. 2009. Horizontal movements of bigeye tuna (*Thunnus obesus*) in the eastern Pacific Ocean, as determined from conventional and archival tagging experiments initiated during 2000-2005. *Inter-Amer. Trop. Tuna Comm., Bull.*: in review.
- Schaefer, K.M., D.W. Fuller, and B.A. Block. 2007. Movements, behavior, and habitat utilization of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) in the northeastern Pacific Ocean, ascertained through archival tag data. *Mar. Biol.* 152: 503-525.
- Schaefer, K.M., D.W. Fuller, and N. Miyabe. 2005. Reproductive biology of bigeye tuna (*Thunnus obesus*) in the eastern and central Pacific Ocean. *Inter-Amer. Trop. Tuna Comm., Bull.* 23: 1-31.
- Schaefer, M.B. 1967. Some new trends in investigation of tunas in the Pacific Ocean. *Proc. Symp. Scombroid fishes, Part 3. Mar. Biol. Assoc. India, Symp. Ser.* 1: 1160-1172.
- Schaefer, M.B. and C.J. Orange. 1956. Studies on the sexual development and spawning of yellowfin (*Neothunnus macropterus*) and skipjack (*Katsuwonus pelamis*) in three areas of the eastern Pacific Ocean, by examination of gonads. *Inter-Amer. Trop. Tuna Comm., Bull.* 1: 281-349.
- Schaefer, M.B., B.M. Chatwin, and G.C. Broadhead. 1961. Tagging and recovery of tropical tunas, 1955-1959. *Inter-Amer. Trop. Tuna Comm., Bull.* 5: 341-455.
- Scoles, D.R. and J.E. Graves. 1993. Genetic analysis of the population structure of yellowfin tuna, *Thunnus albacares*, from the Pacific Ocean. *U.S. Nat. Mar. Fish. Ser., Fish. Bull.* 91: 690-698.
- Sibert, J. and J. Hampton. 2003. Mobility of tropical tunas and the implications for fisheries management. *Mar. Pol.* 27: 87-95.
- Ward, R.D., N.G. Elliott, P.M. Grewe, and A. Smolenski. 1994. Allozyme and mitochondrial DNA variation in yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) from the Pacific Ocean. *Mar. Biol.* 118: 531-539.
- Ward, R.D. 1995. Population genetics of tunas. *Jour. Fish. Biol.* 47: 259-280.

- Ward, R.D. 2000. Genetics in fisheries management. *Hydrobiol.* 420: 191-201.
- Wild, A. and J. Hampton. 1994. A review of the biology and fisheries for skipjack tuna, *Katsuwonus pelamis*, in the Pacific Ocean. FAO Fish. Tech. Pap. 336: 1-51.
- Williams, F. 1972. Consideration of three proposed models of the migration of young skipjack tuna (*Katsuwonus pelamis*) into the eastern Pacific Ocean. U.S. Nat. Mar. Fish. Serv., Fish. Bull. 70: 741-762.
- Winans, G.A. 1987. Using morphometrics and meristic characters for identifying stocks of fish. In H.E. Kumpf, R.N. Vaught, C.B. Grimes, A.G. Johnson, and E.L. Nakamura (editors), Proceedings of the Stock Identification Workshop. Panama City Beach, Florida, 5-7 November 1985: 25-62.