

**COMISIÓN INTERAMERICANA DEL ATÚN TROPICAL**

**COMITÉ CIENTÍFICO ASESOR**

**SEXTA REUNIÓN**

**La Jolla, California (EE.UU.)**

**11-15 de mayo de 2015**

**DOCUMENTO SAC-06-10c**

**REVISIÓN DE LAS INVESTIGACIONES EN EL  
LABORATORIO DE ACHOTINES**

**Daniel Margulies, Vernon P. Scholey, Jeanne B. Wexler, Maria S. Stein**

1.	Introducción.....	1
2.	Investigación del ciclo vital temprano de los atunes .....	1
3.	El Laboratorio de Achotines y el programa de la CIAT del ciclo vital temprano.....	2
4.	Investigación de los escómbridos tropicales costeros.....	3
5.	Investigación del atún aleta amarilla .....	4
6.	Vínculos prometedores entre la investigación de la vida temprana del aleta amarilla y la evaluación de poblaciones .....	7

**1. INTRODUCCIÓN**

Las etapas de huevo, larval, y juvenil de los peces marinos son caracterizadas por tasas altas de mortalidad y crecimiento. La mayoría de los peces marinos, particularmente las especies pelágicas, son muy fértiles, producen huevos y larvas pequeños, y se alimentan y crecen en ecosistemas acuáticos complejos. La identificación los factores ambientales o biológicos más importantes en el control de la supervivencia durante las etapas tempranas de vida de los peces marinos es una herramienta potencialmente potente en la evaluación de las poblaciones.

Ya que las tasas vitales (mortalidad y crecimiento) durante las etapas tempranas de vida de los peces marinos son altas y variables, cambios pequeños en esas tasas pueden ejercer efectos importantes sobre las propiedades de los supervivientes y el potencial de reclutamiento (Houde 1989). Comprender y predecir los factores que más afectan la supervivencia antes del reclutamiento son objetivos clave de los programas de investigación pesquera.

**2. INVESTIGACIÓN DEL CICLO VITAL TEMPRANO DE LOS ATUNES**

La Convención de Antigua dicta que la Comisión desempeñará las siguientes funciones, dando prioridad a los atunes y especies afines:

- (a) promover, llevar a cabo y coordinar investigaciones científicas sobre la abundancia, biología y biometría en el Área de la Convención de las poblaciones de peces abarcadas por esta Convención y, según sea necesario, de las especies asociadas o dependientes, y sobre los efectos de los factores naturales y de las actividades humanas sobre las existencias de esas poblaciones y especies;

Aunque décadas de investigación han producido información considerable sobre las poblaciones de atunes adultos, se sabe relativamente poco acerca de las etapas del ciclo vital temprano y los factores que afectan la supervivencia antes del reclutamiento. Los atunes constituyen una de las poblaciones de peces marinos de mayor valor comercial del mundo (FAO 2014), y la variabilidad del reclutamiento es uno de

los factores más importantes que afectan las fluctuaciones de las poblaciones (CIAT 2004).

Las poblaciones de atunes son caracterizadas por fluctuaciones de orden de magnitud del reclutamiento, pero los conocimientos de los mecanismos subyacentes que controlan la variabilidad del reclutamiento siguen pobres. El atún aleta amarilla (*Thunnus albacares*) es reclutado a la pesquería de superficie en el Océano Pacífico oriental (OPO) a una talla de 30 cm y una edad de 6 meses, aproximadamente (Aires-da-Silva y Maunder 2012). El reclutamiento del aleta amarilla en el OPO ha fluctuado por un factor de 3,2 durante los últimos 30 años (Minte-Vera *et al.* 2014). El aleta amarilla es muy fecundo (fecundidad por camada > 1.000,000 ovocitos por hembra) y desova casi a diario durante sus periodos reproductivamente activos (Schaefer 2001). Las etapas tempranas de vida de la especie son caracterizadas por tasas de mortalidad y metabólicas elevadas y crecimiento exponencial (Margulies *et al.* 2007a, Wexler *et al.* 2007). Este patrón de reproducción y ciclo vital temprano tiene un potencial fuerte para la regulación del reclutamiento durante las etapas larval o juvenil temprana, cuando el número inicial en una cohorte es grande y las tasas vitales (mortalidad y crecimiento) son altas (Houde 1987, Margulies *et al.* 2001). La mayoría de los atunes muestran patrones similares de potencial de reproducción elevado y etapas de vida antes del reclutamiento caracterizadas por crecimiento rápido y mortalidad elevada (Davis *et al.* 1991, Tanaka *et al.* 1996, Margulies *et al.* 2007a).

Antes de los años 1980, habían sido emprendidos pocos estudios para examinar los mecanismos que controlan la supervivencia de los atunes antes del reclutamiento o para estimar sus tasas vitales durante las etapas tempranas de la vida. Estas consideraciones llevaron al establecimiento por la CIAT de un laboratorio de investigación en la Bahía de Achotines en la República de Panamá, con el propósito de estudiar el ciclo vital temprano de los atunes y especies afines (escómbridos).

### **3. EL LABORATORIO DE ACHOTINES Y EL PROGRAMA DE LA CIAT DEL CICLO VITAL TEMPRANO**

La Bahía de Achotines está situada en la punta sur de la Península de Azuero en la Provincia de Los Santos, República de Panamá (Figura 1), en la porción noroeste del Golfo de Panamá. La plataforma continental es bastante estrecha en este lugar: el contorno de 200 metros se encuentra a entre solamente 6 y 10 km del litoral. Esto brinda a los científicos del laboratorio acceso fácil a aguas oceánicas donde ocurre desove de atunes en cada mes del año. La temperatura superficial del mar fluctúa entre 21° y 29°C.

El programa de investigación del ciclo vital temprano abarca estudios de laboratorio y de campo de los escómbridos tropicales ideados para obtener un mayor conocimiento de los procesos de reclutamiento y de los factores que lo afectan. Investigaciones anteriores del reclutamiento de los peces de otros tipos sugieren que factores abióticos, tales como temperatura, luz, patrones de corrientes, y condiciones de viento, y biológicos, tales como alimentación, crecimiento, y depredación, pueden afectar el reclutamiento (Houde 1997). Ya que la supervivencia de los peces antes del reclutamiento es controlada probablemente por una combinación de estos factores, el programa de investigación de la CIAT toma en cuenta la interacción entre el sistema biológico y el ambiente físico (Lauth y Olson 1996, Owen 1997).

La investigación de los escómbridos tropicales en el Laboratorio de Achotines ha consistido de dos fases distintas. La primera fue dirigida predominantemente a los escómbridos tropicales costeros, principalmente el barrilete negro (*Euthynnus lineatus*), las melvas (*Auxis* spp.), sierras/carite (*Scomberomorus sierra*), y el bonito (*Sarda orientalis*), durante el período de 1984 a 1995. Desde 1996, el enfoque de la investigación cambió a la biología reproductora y el ciclo vital temprano del atún aleta amarilla, utilizando huevos puestos por aletas amarillas reproductores cautivos.

En el presente informe, se resumen las investigaciones de la biología reproductora y el ciclo vital temprano de los atunes tropicales realizadas en el Laboratorio de Achotines. Se resumen asimismo los resultados más importantes de la investigación, y se presentan breves síntesis de las cuatro áreas de investigación muy prometedoras para vincular con la investigación de la evaluación de poblaciones.

## 4. INVESTIGACIÓN DE LOS ESCÓMBRIDOS TROPICALES COSTEROS

### 4.1. Los primeros estudios experimentales y en el mar

Durante 1986-1994 se iniciaron los estudios de escómbridos costeros en el Golfo de Panamá. Se elaboraron métodos para la captura de grandes números de escómbridos juveniles tempranos vivos en el mar. Los peces fueron capturados con salabardo después de ser atraídos a una luz submarina (24 V DC, 300 W) y transportados vivos a los tanques en el laboratorio, donde fueron alimentados con zooplancton silvestre clasificado por tamaño entre 333 y 1000  $\mu\text{m}$  de ancho de cuerpo, predominantemente cladoceros copepoditos y copépodos adultos. La colección y mantenimiento de escómbridos en el laboratorio formó la base para numerosos experimentos que examinaron el crecimiento, nutrición, y desarrollo de larvas y juveniles tempranos. Ya que cambios pequeños en las tasas de crecimiento y mortalidad pueden ejercer impactos importantes sobre la variabilidad del reclutamiento (Houde 1989), se dirigió una gran parte de la investigación hacia la caracterización del crecimiento durante las etapas tempranas de vida de varias especies de atunes. Se examinaron varios factores fisiológicos y biológicos que podrían potencialmente afectar la supervivencia y crecimiento, usando aplicaciones de laboratorio y de campo.

Antes de la década de 1980, se sabía poco acerca de la distribución y abundancia de las larvas de escómbridos en relación con la variabilidad estacional o anual en el ambiente físico. Durante 1989-1993, se realizó una serie de estudios de campo en el noroeste del Golfo de Panamá diseñada para investigar los patrones de distribución espacial y temporal de los escómbridos larvales en relación con las condiciones locales oceanográficas y de producción secundaria de la región. Se realizó un muestreo repetitivo a escala espacial pequeña durante varios años, desde un barco tipo *Boston Whaler* de 7,6 m, dotado de un mástil, tangón, y cabrestante hidráulico. En cada estación de muestreo se realizaron arrastres de ictioplancton y lances de CTPO (conductividad, temperatura, profundidad, y oxígeno). Se realizaron arrastres con red de bongo (profundidades integradas) y también con red de Tucker (profundidades separadas).

### 4.2. Resultados clave de la investigación del ciclo vital temprano de los escómbridos costeros

Los estudios del ciclo vital temprano y la biología reproductora de los escómbridos tropicales costeros durante la primera década de operación del Laboratorio de Achotines resultaron en nuevos e importantes descubrimientos acerca de la biología de los escómbridos tropicales. Los resultados más importantes fueron los siguientes:

1. Describimos, por primera vez, la dinámica de crecimiento de los escómbridos tropicales larvales y juveniles en el Océano Pacífico, y se aprendió que el barrilete negro larval tardío se alimenta competentemente y es capaz de un crecimiento rápido aun durante la temporada de lluvias, cuando la producción secundaria es más baja. Se aprendió que el barrilete negro, melvas, y carite juveniles son capaces de un crecimiento extremadamente rápido en el laboratorio (1-5 mm día<sup>-1</sup>) y poseen un gran potencial de crecimiento.
2. Desarrollamos métodos para la colección y cría de escómbridos larvales tardíos y juveniles tempranos. Estos probaron ser de enorme valor al realizar experimentos de laboratorio para examinar la dinámica de crecimiento, nutrición, y fisiología de los escómbridos tropicales.
3. Durante 1991, se completó el ciclo vital del barrilete negro en cautiverio al criar larvas capturadas en el mar hasta la madurez reproductora durante un período de un año. Esta fue la primera vez que una especie de atún fue criada desde la etapa larval hasta un tamaño de reproducción. En 1993 se desarrolló, asimismo por primera vez, una población reproductora cautiva de barrilete negro.
4. Elaboramos las primeras estimaciones de la incidencia de inanición en los escómbridos larvales y juveniles en aguas tropicales. Las larvas en etapa de primera alimentación de barrilete negro, melvas, y carite mostraron un alto potencial de inanición durante la temporada de lluvias en el Golfo de Panamá. Se concluyó que la mortalidad por inanición de las larvas de atún en primera alimentación por sí sola fue casi 45% día<sup>-1</sup>. Los juveniles tempranos, en cambio, mostraron una incidencia muy baja de

desnutrición.

5. Se obtuvieron conocimientos importantes de la distribución temporal y espacial de los escómbridos larvales en el Golfo de Panamá. Parece que el barrilete negro y las melvas desovan durante todo el año en el área del estudio, y el Golfo de Panamá parece ser una zona de desove importante para estas especies. Las larvas de aleta amarilla y/o patudo (*Thunnus* spp.) fueron infrecuentes en las colectas, y parece que desovan en aguas más lejanas de la costa (al sur y/o oeste del área del estudio). Descripciones de la distribución diaria y vertical, el crecimiento, las tasas de inanición, y la dieta de las larvas, basadas en los estudios con red de Tucker durante 1990-1993, aguardan análisis de las muestras archivadas.
6. Se validaron los incrementos diarios en los otolitos de barriletes negros y melvas larvales y juveniles tempranos para determinar la edad y estimar tasas de crecimiento *in situ* basadas en datos de talla por edad. Antes de estos estudios, los incrementos diarios no habían sido validados en los otolitos de la mayoría de las larvas de escómbridos.
7. Se describió, por primera vez, el desarrollo del sistema visual de los escómbridos larvales y juveniles tempranos. El sistema visual es avanzado, y contribuye indudablemente a los avances rápidos de la capacidad de búsqueda de alimento y el inicio temprano de la piscivoría. Se apoyaron también los primeros estudios para describir la talla mínima de endotermia en los atunes (Dickson 1994).

## **5. INVESTIGACIÓN DEL ATÚN ALETA AMARILLA**

### **5.1. Antecedentes del desarrollo de la investigación del aleta amarilla en el Laboratorio de Achotines**

Durante 1992 y 1993, el grupo de ciclo vital temprano de la CIAT y la Japan Sea Farming Association (JASFA) realizaron en Japón estudios conjuntos del desove en cautiverio y el ciclo vital temprano del aleta amarilla. Con base en el éxito de esos estudios, y los resultados positivos de la investigación del barrilete negro larval y adulto en el Laboratorio de Achotines, en diciembre de 1993 la CIAT, la Overseas Fishery Cooperation Foundation (OFCF) de Japón, y el gobierno de la República de Panamá acordaron emprender en el Laboratorio de Achotines un estudio conjunto de mayor alcance, financiado principalmente por la OFCF y la CIAT, del atún aleta amarilla. En general, el proyecto de aleta amarilla fue diseñado para obtener nuevos conocimientos de la biología reproductora y el ciclo vital temprano de la especie, mediante el mantenimiento de una población reproductora de adultos y el estudio de las etapas de huevo, larval, y juvenil en el laboratorio. El proyecto duró desde 1993 hasta marzo de 2001, desde cuando el grupo de la CIAT ha continuado el programa de investigación de aleta amarilla.

Fue necesario ampliar y mejorar la infraestructura del Laboratorio de Achotines para poder llevar a cabo los objetivos del proyecto conjunto de aleta amarilla. En 1994 se inició una ampliación importante del Laboratorio, financiada principalmente por la OFCF. Para criar los aletas amarillas reproductores, se construyeron, entre fines de 1994 y principios de 1996, nuevos tanques de reproductores y de cría y un nuevo sistema de agua de mar, y siguieron obras menores hasta 1999 (Wexler *et al.* 2003). Los tanques de reproductores y de cría estuvieron en operación a principios de 1996. Se diseñó el tanque de reproductores principal (Tanque 1) para que fuese lo suficientemente grande como para minimizar el estrés de cautiverio y mejorar la probabilidad del desove (Margulies *et al.* 2007b).

Durante este período se mejoraron las instalaciones del laboratorio "húmedo" con tanques experimentales adicionales, dotados de pequeños calentadores y enfriadores para controlar la temperatura del agua, luces para regular el fotoperíodo, y sistemas de aeración. Se construyó también un edificio dedicado al almacenaje y preparación del alimento de los reproductores y la cría de organismos de alimento para las larvas que resultan del desove de los peces reproductores. Se construyó además un edificio con una nueva oficina y un laboratorio "seco", con más equipo analítico y microscopios. Se compraron dos embarcaciones nuevas tipo panga, de 7,3 y 8,2 m de eslora, con tanques de transporte, para la captura y traslado de los peces, y en 1999 se añadió un muelle de hormigón y una rampa para facilitar las operaciones con las em-

barcaciones. Todas las mejoras de la infraestructura del laboratorio fueron financiadas por la OFCF.

## **5.2. Investigaciones de la biología reproductora y el ciclo vital temprano del aleta amarilla**

Desde 1996 hasta el presente, la CIAT ha realizado investigaciones de la biología reproductora en cautiverio y el ciclo vital temprano del aleta amarilla. El objetivo de las investigaciones es desarrollar conocimientos más completo de los procesos diarios de mortalidad que ocurren durante las etapas de vida antes del reclutamiento (etapas larval y juvenil temprano) y cómo la mortalidad es afectada por factores ambientales y biológicos clave. La meta final del programa experimental sobre el ciclo vital temprano es la contribución de nuevos conocimientos de la variabilidad del reclutamiento. La capacidad de pronosticar el reclutamiento del aleta amarilla, antes de la edad de ingreso a la pesquería (seis meses), -sería una herramienta poderosa para la evaluación de poblaciones.

La investigación del aleta amarilla en el Laboratorio de Achotines se ha enfocado en aspectos importantes del crecimiento adulto, dinámica de desove, genética de los desovadores, desarrollo en las primeras etapas de vida, dinámica de crecimiento de larvas y juveniles tempranos (en el laboratorio e *in situ*), y los efectos de importantes factores físicos sobre la supervivencia y crecimiento de los prereclutas. Se resumen los resultados de esta investigación en una [serie de publicaciones disponibles en el portal de internet de la CIAT](#).

## **5.3. Resultados de investigación clave de los estudios del atún aleta amarilla**

Los estudios de la biología reproductora y el ciclo vital temprano del atún aleta amarilla realizados desde 1996 en el Laboratorio de Achotines han contribuido de forma significativa a los conocimientos de la biología del aleta amarilla y los factores que afectan la supervivencia antes del reclutamiento. Los resultados clave del programa de investigación del aleta amarilla son los siguientes.

1. Se estableció una población desovadora de aleta amarilla, representa la primera ocasión en todo el mundo de desove sostenido de aleta amarilla en instalaciones terrestres. La dinámica del desove, el crecimiento, la genética, fisiología, y ciclo vital temprano del aleta amarilla fueron estudiados durante múltiples años.
2. Se elaboraron métodos para la captura, traslado, y cría del aleta amarilla. Una dieta de 50% calamar y 50% peces, como machuelos o anchoveta, parece brindar una nutrición adecuada para los aletas amarillos reproductores y sostiene un desove casi continuo. Las estimaciones del crecimiento en talla de los peces cautivos disminuyeron a medida que aumentó la talla de los peces, y variaron de 18 a 37 cm año<sup>-1</sup> durante 1996-2001 y de 11 a 62 cm año<sup>-1</sup> durante 1999-2014 (Figura 2). Se estimó el crecimiento en peso en 11 a 26 kg año<sup>-1</sup> durante 1996-2001 y 4 a 36 kg año<sup>-1</sup> durante 1999-2014, y estas estimaciones asimismo disminuyen a medida que aumenta el peso de los peces. El ambiente estable de los tanques en tierra parece fomentar buena salud y desove sostenido en el aleta amarilla.
3. Se describieron los patrones de desove del aleta amarilla en relación con factores físicos y biológicos. Los peces reproductores siguieron desovando mientras recibieron raciones diarias adecuadas de alimento y la temperatura del agua fue >23,3° C. La temperatura del agua parece ser el principal factor exógeno que controla la ocurrencia y hora del desove del aleta amarilla (Figura 3) Los comportamientos de cortejo y desove son ritualizados, y el aleta amarilla parece poseer la capacidad de ajustar la hora y los procesos finales de maduración del desove con base en cambios diminutos de la temperatura del agua. Por ejemplo, ajusta la hora del desove en relación con la temperatura del agua, resultando en un rango estrecho para la hora de eclosión. Este patrón parece ser adaptativo como forma de maximizar la supervivencia de las larvas de saco vitelino al mantener la hora de desove durante períodos de luz baja u oscuridad (fines de la tarde o principios del atardecer).
4. Se estimó la edad de primer desove de las aletas amarillas hembras en cautiverio en entre 1,3 y 2,8 años, con un promedio ligeramente inferior a los 2,0 años. Durante períodos de tiempo cortos (<1 mes), las hembras desovadoras incrementaron su producción de huevos entre 30 y 234% en reacción

a aumentos a corto plazo de la ración diaria de entre 9 y 33%. La capacidad de incrementar la producción de huevos en reacción a una mayor abundancia de alimento posee significado adaptativo, y permitiría al aleta amarilla aprovechar recursos alimenticios distribuidos irregularmente y aumentos periódicos de producción en el océano.

5. Se realizó un seguimiento genético de los aletas amarillas reproductores mediante una comparación de la variación del mtADN de las hembras desovadoras con aquella de sus huevos y larvas. El análisis identificó hembras desovadoras individuales y brindó estimaciones de la periodicidad de su desove. Las hembras son capaces de desovar a diario durante períodos extendidos, siempre que permanezcan en el rango adecuado de temperatura del agua ( $>23,3^{\circ}\text{C}$ ) y tengan suficiente alimento. La variación genética de la región *D-loop* del mtADN del aleta amarilla parece ser tan alta que es probablemente útil no solamente para la identificación de peces individuales, sino también para las investigaciones de la estructura de las poblaciones en el mar.
6. La temperatura del agua está relacionada de forma inversa y significativa con el tamaño de los huevos, la duración de la etapa de huevo, el tamaño de las larvas en el momento de eclosión, y la duración de la etapa larval de saco vitelino del aleta amarilla. En promedio, los huevos fertilizados del aleta amarilla tienen un diámetro de 1,0 mm y un peso seco de 43  $\mu\text{g}$ . Las larvas eclosionadas miden en promedio 2,5 mm TE y pesan 30  $\mu\text{g}$ , y las larvas en primera alimentación 3,3 mm TE y 22  $\mu\text{g}$ . El potencial de crecimiento desde la etapa de larva temprana al tamaño de reclutamiento (30 cm, 6 meses de edad) es muy alto, cercano a  $10^6$  a  $10^7$  veces.
7. Se describió el desarrollo de la sensibilidad visual en los aletas amarillas larvales, juveniles, y adultos. Los adultos tienen al menos tres pigmentos visuales en la retina, y quizá puedan distinguir colores (es decir, no son daltónicos). Las larvas tienen no sólo mezclas de los pigmentos de cono adultos (sensibles a violeta y azul), sino también un tercer pigmento sensible a verde. La sensibilidad juvenil suele convergir en la condición adulta. La sensibilidad espectral del aleta amarilla adulto es probablemente adaptativa a la luz azulada ambiental característica del mar abierto, mientras que la sensibilidad larval sobre un rango espectral extendido es probablemente adaptativo para la etapa planctofaga en los hábitats de la capa de mezcla.
8. Se estimaron en pruebas de laboratorio los límites letales de temperatura del agua y oxígeno disuelto para los huevos y larvas de aleta amarilla. Los resultados indican que la distribución vertical, y en cierto grado la distribución horizontal, de las larvas de aleta amarilla de saco vitelino y en primera alimentación larvas es determinada por las limitaciones físicas de temperatura del agua y oxígeno disuelto. En el Golfo de Panamá, la profundidad crítica para la supervivencia de las larvas de aleta amarilla ocurriría a menos de 30 m durante la temporada de afloramiento (cuando la profundidad de la capa de mezcla es menor), y a menos de 50 m durante la temporada de afloramiento reducido, a partir de la temperatura del agua solamente. Es poco probable que ocurran déficits de oxígeno a profundidades de menos de 50 m.
9. Se realizaron pruebas en el Laboratorio de Achotines para investigar la factibilidad de desarrollar aparatos para reducir la captura incidental, tales como rejillas clasificadoras y cortinas de burbujas, que permitirían a los peces pequeños escapar de la red de cerco pero retendrían a los peces grandes. Los resultados de las pruebas indican que los aletas amarillos nadan a través de las rejillas clasificadoras, y se muestran reacios a pasar por las cortinas de burbujas. Estas dos técnicas merecen ser sometidas a pruebas más extensas en el mar, para probar su eficacia como métodos de clasificación para reducir la mortalidad de peces sin valor comercial.
10. Se realizaron pruebas en el Laboratorio de Achotines para examinar el uso de marcas archivadoras implantadas para la detección de eventos de alimentación y desove en el aleta amarilla. Los resultados preliminares señalan que las marcas pueden detectar cambios en la temperatura peritoneal que corresponden con señales de alimentación y desove. Esta tecnología es muy prometedora para la detección de señales de alimentación y desove en peces silvestres

## 6. VÍNCULOS PROMETEDORES ENTRE LA INVESTIGACIÓN DE LA VIDA TEMPRANA DEL ALETA AMARILLA Y LA EVALUACIÓN DE POBLACIONES

### 6.1. Crecimiento del aleta amarilla larval y juvenil en el laboratorio e *in situ*

En las etapas de vida antes del reclutamiento, no es solamente la tasa de mortalidad ( $M$ ) que determina la supervivencia por etapa, sino también la tasa de mortalidad/crecimiento ( $M/G$ ), la tasa de mortalidad por etapa o 'fisiológica' (o sea, la mortalidad por unidad de crecimiento) (Houde 1997). Una pequeña variabilidad en la mortalidad instantánea o las tasas de crecimiento por etapa puede generar grandes cambios en el nivel de la población en etapas dadas. La variabilidad del crecimiento por sí sola tiene el potencial de afectar la duración de las etapas y la mortalidad acumulativa durante las etapas larval y juvenil de vida (Houde 1989). Se enfocó gran parte de los esfuerzos experimentales con el aleta amarilla en investigaciones de la dinámica de crecimiento durante las etapas larval y juvenil temprana.

Desde 1997, se ha estudiado el crecimiento en el laboratorio de las larvas y juveniles de aleta amarilla criados de huevos de los aletas amarillas reproductores. Se han investigado los efectos de la disponibilidad de alimento, la temperatura del agua, y otros factores físicos sobre la supervivencia y crecimiento de las larvas y juveniles hasta 100 días después de la eclosión. El crecimiento de las larvas tempranas (las dos primeras semanas) es exponencial en talla y peso ( $<0,35$  mm día<sup>-1</sup> de talla y 20 a 35% de peso del cuerpo día<sup>-1</sup>), pero el crecimiento aumenta significativamente durante las etapas larval tardía y juvenil temprana ( $>0,6$  mm día<sup>-1</sup> y aprox. 30-50% de peso de cuerpo día<sup>-1</sup>) (Figuras 4 y 5). Las larvas se vuelven piscívoras alrededor de los 6,5 mm TE, y cuándo comienza la piscivoría probablemente determina, en parte, el potencial de crecimiento del individuo. Las cohortes de laboratorio que son piscívoros tempranos (aprox. 6,0-7,0 mm TE) crecen más rápidamente, y los individuos que siguen zooplantofagos crecen más lentamente y/o son comidos por los otros. Las cohortes de laboratorio que más rápidamente crecen parecen ser influenciados por altos niveles de alimento, temperatura de agua alta y/o densidad poblacional menor (ver Sección 5.10), y las que más lentamente crecen parecen ser afectadas más por niveles de alimento más bajos, densidades más altas, y/o temperaturas bajas. En comparación con las tasas de crecimiento de aletas amarillas capturados en el mar, las mejores tasas de crecimiento en el laboratorio hasta la fecha han sido un 17% inferiores a las del peor grupo en el mar, pero la talla a edad de los peces de laboratorio es cercana a aquella de los peces capturados en el mar poco después de ser introducida una dieta piscívora (Figura 6).

La variabilidad de las tasas de crecimiento en las etapas larval y juvenil de los peces marinos es sustancial, y tiene un gran potencial de afectar la tasa  $M/G$  durante las etapas de vida antes del reclutamiento (Houde 1997). La regulación del crecimiento que depende de la densidad ha sido identificada como un factor potencialmente importante en el control de la supervivencia antes del reclutamiento (Shepherd y Cushing 1980, Rothschild 1986). En el caso del aleta amarilla, una mortalidad que depende de la densidad podría debilitar cualquier relación entre la producción de huevos y un reclutamiento consistente con la evaluación de la CIAT de la población de aleta amarilla (Minte-Vera *et al.* 2014). Es posible que la tasa relativa de crecimiento o una dependencia de la densidad en el éxito de alimentación y crecimiento durante la etapa larval pueda contribuir a variaciones en la supervivencia del aleta amarilla antes del reclutamiento. Un crecimiento más rápido acortaría el período de mayor vulnerabilidad a mortalidad diaria por depredación. Un índice de crecimiento juvenil, quizá estimado por trimestre en el Golfo de Panamá, podría resultar útil como índice de la fuerza del reclutamiento (Margulies *et al.* 2007a). Este tipo de programa de muestreo para estimar el crecimiento juvenil *in situ* podría ser desarrollado en el Laboratorio de Achotines mediante un muestreo trimestral o estacional de juveniles capturados de noche y la determinación de la edad de los mismos. Hemos realizado análisis similares del crecimiento *in situ* durante ciertos años en el Golfo de Panamá, y descubrimos cierta correspondencia local entre altas tasas de crecimiento de larvas y las estimaciones de reclutamiento (Wexler *et al.* 2007). Nuestros resultados experimentales indicaron un comienzo temprano en el aleta amarilla de crecimiento sustancial dependiente de la densidad durante las primeras 2,5 semanas después de la eclosión. Incrementos de 2 a 4 veces en la densidad larval han resultado en déficits de crecimiento de hasta 56% durante las etapas larvales. También se observaron

indicios indirectos fuertes de crecimiento dependiente de la densidad en cohortes larvales durante ciertos años en el Golfo de Panamá (Wexler *et al.* 2007). Nuestros resultados experimentales sugieren que la dependencia de densidad en el crecimiento persiste durante las etapas juveniles tempranas del aleta amarilla. Hasta efectos sutiles de densidad sobre el crecimiento durante la etapa prerecluta relativamente larga (5 meses) podrían ejercer un efecto de “afinamiento” sobre el reclutamiento y la biomasa media de una cohorte. Esta asociación necesita ser estudiada más a fondo

## **6.2. Efectos de turbulencia inducida por el viento sobre la supervivencia de aletas amarillas larvales**

El éxito de alimentación de las larvas de peces marinos puede ser afectado por los niveles de turbulencia a microescala inducida por el viento en el ambiente de alimentación (Rothschild y Osborn 1988, Cury y Roy 1989). Es posible que la probabilidad de encontrar presas y de éxito de alimentación de las larvas aumente con incrementos de la turbulencia a microescala inducida por el viento hasta un nivel asintótico de viento y turbulencia y luego disminuye a niveles mayores de turbulencia (MacKenzie *et al.* 1994). Nuestros estudios de alimentación de larvas de aleta amarilla en Japón en 1992 indicaron un fuerte potencial de influencia de turbulencia a microescala sobre el éxito de alimentación de las larvas de aleta amarilla. Se ampliaron estas investigaciones durante 1997-2000 en una serie de experimentos de laboratorio en el Laboratorio de Achotines, en los que se examinó la supervivencia de las larvas de aleta amarilla durante la primera semana de alimentación bajo condiciones de microturbulencia variable. La turbulencia en los tanques experimentales fue medida como la velocidad horizontal media de un objeto de capacidad neutra de flotación en la superficie. En 1999 y 2000, estas velocidades fueron calibradas con velocidades medidas a profundidad con un medidor de corrientes microacústico. El análisis de los datos continúa, pero Kimura *et al.* (2004) presentaron resultados preliminares.

Nuestro análisis preliminar de los datos de 1997-2000 indica que la supervivencia durante la primera semana de alimentación es hasta 2,7 veces mayor con niveles intermedios de microturbulencia (aprox.  $7.4 \times 10^{-9} \text{m}^2 \text{s}^{-3}$  a  $2.25 \times 10^{-8} \text{m}^2 \text{s}^{-3}$  como tasa de disipación de energía) que con niveles bajos o altos (Figura 7). Usando un modelo de la capa de separación que equipara los niveles de microturbulencia en la capa de mezcla con la velocidad del viento, se hicieron estimaciones preliminares de la velocidad del viento óptima para la supervivencia de las larvas de aleta amarilla, basadas en una profundidad de 5 a 20 m para la concentración máxima de larvas (estimada a partir de datos en la literatura de estudios de larvas en el mar). Las estimaciones de la velocidad óptima del viento son oscilan entre 2,6 y 4,5  $\text{m sec}^{-1}$ . Estas estimaciones son las primeras reportadas para las etapas tempranas de vida del atún aleta amarilla, y unas de las primeras de los efectos de la microturbulencia sobre la supervivencia de larvas marinas basadas en pruebas experimentales extendidas.

Se examinaron las velocidades del viento estimadas óptimas para la supervivencia de larvas para correlaciones con estimaciones históricas del reclutamiento de aleta amarilla en el OPO en áreas de  $2^\circ \times 2^\circ$ . Se obtuvieron datos del periodo de 1987-2007 de varias fuentes (*Blended Sea Winds Database, National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), National Environmental Satellite, Data, and Information Service (NESDIS), National Climatic Data Center (NCDC)*) (Zhang *et al* 2006). Se estimó el porcentaje de días con velocidades de viento en un área de  $2^\circ \times 2^\circ$  dado y se calcularon correlaciones con las estimaciones trimestrales de la CIAT del reclutamiento del aleta amarilla (con un retardo de seis meses para tomar en cuenta el desarrollo prerecluta). Se observó un patrón espacial tanto latitudinal como longitudinal para las áreas seleccionadas (Figura 8). Las áreas más cercanas a la costa, al este de  $100^\circ \text{O}$ , presentaron valores positivos de correlación, mientras que los coeficientes de correlación se volvieron negativos más lejos de la costa y al oeste de  $100^\circ \text{O}$ . Las correlaciones de las áreas al sur de la línea ecuatorial fueron todas positivas. Se realizó el análisis de correlación también para combinaciones de trimestre-año (por ejemplo, trimestres 1 y 2, trimestres 1 y 3, etcétera). En el caso de las seis áreas con correlaciones positivas en la región sudeste del área del estudio, los trimestres 1 y 2 fueron los que más contribuyeron a la correlación positiva entre velocidad óptima del viento y reclutamiento. En casi todas estas regiones, las correlaciones se volvieron significativamente positivas cuando se consideraron sola-

mente los dos primeros trimestres de cada año (el Área 11 frente a Perú fue marginalmente no significativo). Las áreas al oeste de 100°O mostraron correlaciones negativas independientemente de la combinación de trimestre-año.

El análisis de velocidad del viento-reclutamiento puede ser refinado y ampliado, pero este análisis es prometedor para la evaluación de los patrones de reclutamiento del aleta amarilla. El análisis de correlación aquí descrito incluye distintas escalas espaciales de variables (estimaciones de reclutamiento en el OPO entero pero estimaciones de velocidad del viento en áreas de 2°x2°). Una cobertura geográfica más extensa mejoraría el análisis, y el desarrollo continuo de componentes espaciales para las estimaciones de reclutamiento de la CIAT permitirían examinar los datos de velocidad del viento y reclutamiento en la misma escala espacial.

### **6.3. Estudios comparativos del ciclo vital temprano del aleta amarilla y el aleta azul del Pacífico**

En 2011, la CIAT, la Universidad Kinki (KU) de Japón, y la Autoridad de los Recursos Acuáticos de Panamá (ARAP) comenzaron un estudio comparativo, de cinco años de duración de la biología reproductora y ciclo vital temprano de los atunes aleta amarilla y aleta azul del Pacífico (*Science and Technology Research Partnership for Sustainable Desarrollo*, SATREPS). El proyecto es financiado por la *Japan International Cooperation Agency* (JICA) y la *Japan Science and Technology Agency* (JST), y se está realizando principalmente en el Laboratorio de Achotines y en los laboratorios pesqueros de la Universidad Kinki en la Prefectura de Wakayama, Japón. Los estudios son los primeros en el mundo en investigar importantes aspectos comparativos de la biología reproductora, genética, y ciclo vital temprano de los atunes aleta azul del Pacífico y aleta amarilla. Aunque el aleta azul del Pacífico es una especie templada a subtropical y el aleta amarilla es tropical a subtropical en su vida adulta, las etapas tempranas de vida de ambas especies precisan ecosistemas de agua cálida (> 24°C) como zonas de cría, presentando así antecedentes comunes para estudios comparativos. Se usarán los resultados de los experimentos para un modelado comparativo de los procesos de mortalidad que ocurren durante las etapas de vida de ambas especies antes del reclutamiento. Un objetivo adicional del Proyecto es desarrollar tecnologías para la acuicultura de aletas amarillas juveniles, incluyendo jaulas marinas.

Continúan los experimentos comparativos, pero los resultados preliminares indican que las larvas del aleta azul del Pacífico eclosionan y comienzan a comer cuando son ligeramente más grandes que el aleta amarilla. Las larvas de aleta azul, con su mayor tamaño y mayores reservas endógenas de energía, muestran una mayor resistencia a la inanición en la etapa de primera alimentación (15-25 horas más, según la temperatura) comparadas con el aleta amarilla. No obstante, su mayor tamaño no otorga ninguna ventaja aparente a las larvas de aleta azul del Pacífico en larvas en crecimiento o supervivencia cuando el alimento prevalente es microzooplancton pequeño (Figura 9). Las larvas de aleta amarilla muestran un potencial de crecimiento y supervivencia mayores al alimentarse con microzooplancton pequeño. Sin embargo, el mayor tamaño de las larvas de aleta azul del Pacífico podría otorgar ventajas de alimentación y crecimiento al alimentarse de zooplancton grande, y se está investigando esta hipótesis experimentalmente en 2015.

### **6.4. Efectos de acidificación oceánica sobre los huevos y larvas de aleta amarilla**

La evaluación del quinto Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) (Stocker *et al.* 2013) estima una disminución media global del pH superficial del océano de 0.30-0.32 antes de 2100 debido a concentraciones crecientes de dióxido de carbono disuelto (pCO<sub>2</sub>) de actividades antropogénicas. Se predice que en regiones del Océano Pacífico donde desova y crece el atún aleta amarilla, el pH medio del agua superficial disminuirá entre 0.26 y 0.49 unidades de pH antes de 2100 (Ilyina *et al.* 2013). La acidificación oceánica es motivo de preocupación por sus efectos potenciales sobre el crecimiento, desarrollo, y supervivencia de las etapas tempranas de vida de los atunes en hábitats oceánicos y sobre la extensión espacial de hábitats adecuados para los atunes.

A fin de investigar los efectos potenciales de la acidificación oceánica sobre las etapas tempranas de vida del aleta amarilla, en 2011 se realizó un estudio en el Laboratorio de Achotines. Se realizaron dos pruebas

separadas para probar el efecto de un incremento de  $p\text{CO}_2$  sobre huevos y sobre larvas en las etapas de saco vitelino y primera alimentación. Los niveles de acidificación probados variaron del nivel actual a los niveles predichos para ciertas áreas del Pacífico en los próximos 100 años (futuro cercano) a 300 años (largo plazo). Los resultados variaron entre pruebas, pero, con niveles de acidificación similares a aquellos predichos para el futuro cercano, indicaron una reducción potencial significativa de la supervivencia (Figura 10) y el tamaño de las larvas y tiempos de eclosión prolongados (Bromhead *et al.*, 2015).

Los efectos potenciales de la acidificación oceánica sobre las etapas tempranas de vida son una consideración importante en las evaluaciones futuras de los atunes en el OPO. No queda claro que, si la acidificación aumenta a los niveles predichos para el Océano Pacífico, los atunes sean capaces de adaptarse a la acidificación mediante selección para individuos más resistentes (Bromhead *et al.* 2015). Tampoco queda claro si esta resistencia individual es heredable (Munday *et al.*, 2012). Hasta la fecha, existen indicios que los niveles de acidificación oceánica de futuro cercano pueden ejercer efectos negativos significativos sobre el desarrollo, supervivencia y crecimiento de los huevos y larvas del atún aleta amarilla. Estos resultados permiten parametrizar modelos como SEAPODYM (Lehodey *et al.* 2008) para incluir los efectos de la acidificación e incorporarlos en el desarrollo de índices de hábitat de desove.