



UNIVERSIDAD VERACRUZANA

INSTITUTO DE CIENCIAS MARINAS Y PESQUERÍAS

DOCTORADO EN ECOLOGÍA Y PESQUERÍAS

**ESTADO REPRODUCTIVO Y OVODINÁMICA DEL ATÚN ALETA AZUL DEL
ATLÁNTICO *Thunnus thynnus* (Linnaeus, 1758): UNA EVALUACIÓN COMPARATIVA
ENTRE EL SUR DEL GOLFO DE MÉXICO Y EL MAR MEDITERRÁNEO**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE:

DOCTOR EN ECOLOGÍA Y PESQUERÍAS

PRESENTA:

M.C. ROBERTO MARTÍN CRUZ CASTÁN

COMITÉ TUTORAL:

Dr. CÉSAR GABRIEL MEINERS MANDUJANO (**DIRECTOR**)

Dr. DAVID MACÍAS LÓPEZ (**CO-DIRECTOR**)

Dr. SERGIO CURIEL RÁMIREZ GUTIÉRREZ

Dra. GABRIELA GALINDO CORTES



Universidad Veracruzana
Dirección General de Investigaciones
Instituto de Ciencias Marinas y Pesquerías

M. en C. ROBERTO MARTIN CRUZ CASTÁN
ESTUDIANTE DEL DOCTORADO EN ECOLOGÍA Y PESQUERÍAS
UNIVERSIDAD VERACRUZANA
P R E S E N T E.

**INSTITUTO DE
CIENCIAS
MARINAS Y
PESQUERÍAS,
U.V.**

Calle Hidalgo No.
617
Colonia Río
Jamapa,
C P 94290,
Boca del Río,
Veracruz,
México

Teléfonos
(229) 956 70 70
956 72 27

Habiendo sido debidamente revisado y aceptado el trabajo escrito de su tesis denominada "Estado reproductivo y Ovodinámica del atún aleta azul del Atlántico *Thunnus Thynnus* (Linnaeus, 1758); Una evaluación comparativa entre el Sur del Golfo de México y el Mar Mediterráneo" y habiendo conseguido los votos necesarios por parte de su jurado coincidiendo en cuanto a que tanto el contenido, como el formato de este trabajo es satisfactorio como prueba escrita para sustentar su examen final de posgrado de DOCTOR EN ECOLOGÍA Y PESQUERÍAS se le autoriza a usted presentar la versión electrónica final de su trabajo.

Sin otro particular, me es grato reiterarle la seguridad de mi más distinguida consideración.

**COORDINACION
DE POSGRADO EN
ECOLOGIA Y
PESQUERIAS, U.V.**

Mar Mediterráneo
No. 314
Fracc. Costa Verde
CP 94294
Boca del Río,
Veracruz,
México

Teléfono
(229) 202 28 28

ATENTAMENTE
"LIS DE VERACRUZ: ARTE, CIENCIA, LUZ"
Boca del Río, Ver. Noviembre 6 del 2020

Dr. Javier Bello Pineda
Director
Instituto de Ciencias Marinas y Pesquerías
Universidad Veracruzana

INSTITUTO DE
CIENCIAS MARINAS
Y PESQUERIAS
BOCA DEL RIO, VER.



UNIVERSIDAD VERACRUZANA

COORDINACION DEL
POSGRADO EN
ECOLOGIA Y PESQUERIAS

**A mi esposa e hijo por ser mi mayor motivación,
gracias por navegar siempre conmigo.**

**“Estamos aquí para reírnos del destino
y vivir tan bien nuestra vida que la muerte
tiemble al recibirnos”** *Charles Bukowski*

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca número (CVU/Becario): 408210/257994 otorgada para dedicarme exclusivamente a esta investigación.

Así mismo le agradezco al CONACYT por haberme elegido en la convocatoria de BECAS MIXTAS 2016 - MZO 2017 MOVILIDAD EN EL EXTRANJERO (291062), para participar en una estancia de investigación en el Instituto Español de Oceanografía, España, por el periodo del 01 de junio 2016 al 31 de agosto 2016.

A mi casa de estudios, la Universidad Veracruzana (UV), especialmente al Instituto de Ciencias Marinas y Pesquerías (ICIMAP) y su programa de posgrado en Ecología y Pesquerías por brindarme profesores investigadores altamente comprometidos con una formación integral, por los apoyos económicos para participación en foros y congresos, así como todos los recursos y experiencias que me permitieron disfrutar al máximo el desarrollo de este trabajo.

Al Instituto Español de Oceanografía (IEO), particularmente al Centro Oceanográfico de Málaga (COM), por autorizarme realizar una estancia de investigación en sus instalaciones, por permitirme aprender de sus investigadores técnicas y procedimientos para la evaluación de recursos marinos.

A mi director de tesis Dr. Cesar Meiners y a mi co-director Dr. David Macías les agradezco infinitamente su tiempo, su paciencia y sus enseñanzas, les admiro y les aprecio mucho.

A mis tutores Dr. Sergio Curiel y Dra Gabriela Galindo, gracias por todo lo enseñado y por sus valiosas aportaciones para la culminación de este trabajo.

Agradezco especialmente a Samar, María José (Maco), Josetxu, Salva, José Carlos por todo su apoyo y principalmente por su amistad, gracias por hacer la estancia en España como si estuviera en casa.

PRÓLOGO

En este trabajo se presentan los primeros hallazgos significativos sobre el estado y desarrollo reproductivo del atún aleta azul del Atlántico (*Thunnus thynnus*) capturado de manera incidental por la flota palangrera de superficie que opera en aguas mexicanas (sur del golfo de México), así como un análisis comparativo acerca del desarrollo ovocitario con las hembras del mar Mediterráneo a través de dos métodos estereológicos de vanguardia.

A pesar de que durante mucho tiempo se había considerado una única área de puesta en el norte del golfo de México para el atún aleta azul, Abad-Uribarren (2011) y Duron et al. (2016) postularon la idoneidad del hábitat para la reproducción también en el sur del golfo de México, sugiriendo la existencia de más áreas de puesta en esta zona, lo cual determinó e incentivó el desarrollo de esta investigación.

En este documento, a lo largo de cuatro capítulos, se expone la investigación realizada al respecto y las conclusiones resultantes; los acrónimos de la terminología técnica reproductiva y oceanográfica se presentan en inglés con la finalidad de facilitar las comparaciones con la literatura especializada en el tema, ya que la mayoría de las investigaciones que abordan la biología reproductiva de túnidos a nivel histológico se encuentran en este idioma.

En el Capítulo I, se exponen las características del atún aleta azul y se contextualiza su importancia y los retos acerca de su manejo como recurso pesquero, el estado de amenaza en el que se encuentra la especie, la disparidad que existe entre el gran número de investigaciones llevadas a cabo en el stock oriental, así como la carencia de información biológica básica para el stock occidental, particularmente en el sur del golfo de México.

En el Capítulo II, se presentan y analizan los primeros resultados histológicos que confirman directamente la existencia de actividad reproductiva del atún aleta azul en aguas mexicanas y a partir de ello se determinó al sur del golfo de México como una nueva área de puesta para el stock occidental.

En el Capítulo III, se exhibe y analiza por primera vez, información detallada acerca de la dinámica del desarrollo de los ovocitos para el atún aleta azul capturado en aguas mexicanas y se lleva a cabo una evaluación comparativa con las hembras del Mediterráneo, utilizando dos

métodos esterológicos, que a su vez representan las técnicas analíticas de vanguardia en este campo.

Finalmente en el Capítulo IV, se presentan las conclusiones integradas del trabajo, enfatizando las contribuciones esenciales y más sobresalientes de la presente investigación, así como recomendaciones para encaminar futuros trabajos que permitan reducir el déficit de información biológica de esta especie en el stock occidental, particularmente en aguas mexicanas.

ÍNDICE

Prólogo	5
Capítulo I. El atún aleta azul del Atlántico: una especie en peligro, carente de información biológica en el golfo de México para su manejo	14
Introducción	15
Antecedentes	18
Golfo de México	18
Mar Mediterráneo	20
Sistemática y taxonomía	22
Anatomía externa	23
Hábitat y migraciones reproductivas	25
Pesquerías y situación actual de los stocks	27
Aspectos reproductivos	32
Hipótesis	36
Objetivos	37
Referencias	38
Capítulo II. Nueva área de puesta para el atún aleta azul del Atlántico (<i>Thunnus thynnus</i>): primera evidencia histológica de actividad reproductiva en el sur del golfo de México	51
Resumen	52
Abstract	53
Introducción	54
Materiales y métodos	55
Resultados	58
Discusión	63
Conclusiones	68
Referencias	69

Capítulo III. Dinámica ovocitaria del atún aleta azul (<i>Thunnus thynnus</i>) capturado en el sur del golfo de México: una evaluación comparativa con la fracción desovante del Mediterráneo a través de dos métodos estereológicos	73
Resumen	74
Abstract	75
Introducción	76
Materiales y métodos	79
Resultados	83
Discusión	100
Conclusiones	107
Referencias	108
Capítulo IV. Conclusión integradora y perspectiva a futuro para estudios reproductivos de atún aleta azul del Atlántico (<i>Thunnus thynnus</i>)	120

ÍNDICE DE TABLAS

Capítulo I. El atún aleta azul del Atlántico: una especie en peligro, carente de información biológica en el golfo de México para su manejo

Tabla 1. Especies del género *Thunnus* y sus principales nombres comunes 23

Tabla 2. Cuotas de capturas establecidas por la ICCAT para cada uno de los stocks de atún aleta azul del Atlántico durante el periodo 2018-2020 31

Capítulo II. Nueva área de puesta para el atún aleta azul del Atlántico (*Thunnus thynnus*): primera evidencia histológica de actividad reproductiva en el sur del golfo de México

Tabla 1. Clasificación histológica de los estados de madurez gonadal para hembras de atún aleta azul del Atlántico (*Thunnus thynnus*) 57

Tabla 2. Clasificación histológica de los estados de madurez gonadal para machos de atún aleta azul del Atlántico (*Thunnus thynnus*) 58

Tabla 3. Progresión temporal de los estados de madurez gonadal observados en los individuos de atún aleta azul del Atlántico (*Thunnus thynnus*) colectados en 2015 60

Capítulo III. Dinámica ovocitaria del atún aleta azul (*Thunnus thynnus*) capturado en el sur del golfo de México: una evaluación comparativa con la fracción desovante del Mediterráneo a través de dos métodos estereológicos

Tabla 1. Clasificación histológica de los estados de madurez gonadal para hembras de atún aleta azul del Atlántico (*Thunnus thynnus*) 81

Tabla 2. Descriptores generales de talla y peso para el atún aleta azul del Atlántico capturado en el sur del golfo de México y el mar Mediterráneo 84

Tabla 3. Progresión temporal de los estados de madurez gonadal observados en las hembras de atún aleta azul del Atlántico capturadas en el sur del golfo de México 86

Tabla 4. Progresión temporal de los estados de madurez gonadal observados en las hembras de atún aleta azul del Atlántico capturadas en el mar Mediterráneo 86

Tabla 5. Porcentaje relativo de atresias (α -Atresias con respecto a ovocitos vitelogénicos) y presencia de estados avanzados de atresia (β -Atresias) en los diferentes estados de madurez gonadal para ambos stocks de atún aleta azul del Atlántico	88
Tabla 6. Variación del diámetro promedio de los ovocitos durante su proceso de desarrollo para el atún aleta azul del Atlántico en ambos stocks	89
Tabla 7. Promedios \pm SD de ovocitos por gramo de ovario (ovocitos \cdot g ⁻¹), calculados a partir de los resultados obtenidos por los métodos de W&G y OPD, para cada uno de los diferentes estados de madurez gonadal en hembras de atún aleta azul del Atlántico capturadas en el sur del golfo de México y el mar Mediterráneo	99

ÍNDICE DE FIGURAS

Capítulo I. El atún aleta azul del Atlántico: una especie en peligro, carente de información biológica en el golfo de México para su manejo

Figura 1. Mapa del golfo de México y el mar Caribe con representación esquemática de la transferencia de agua oceánica ocasionada por las corrientes de lazo y del Caribe	18
Figura 2. Mapa de las ecorregiones marinas del golfo de México	19
Figura 3. Mapa del mar Mediterráneo con representación esquemática de la transferencia de agua oceánica a través del estrecho de Gibraltar	20
Figura 4. Mapa de las diferentes regiones geográficas del mar Mediterráneo	21
Figura 5. Fotografía de cardumen de atún aleta azul del Atlántico	24
Figura 6. Dibujo de la anatomía externa de un atún aleta azul del Atlántico	24

Capítulo II. Nueva área de puesta para el atún aleta azul del Atlántico (*Thunnus thynnus*): primera evidencia histológica de actividad reproductiva en el sur del golfo de México

Figura 1. Localización de las áreas de pesca del atún aleta azul del Atlántico capturado por mes (2015) en el sur del golfo de México	56
Figura 2. Distribución de tallas del atún aleta azul del Atlántico capturado incidentalmente por la flota palangrera mexicana del golfo de México en 2015	59
Figura 3. Estados gonadales observados en las hembras de atún aleta azul del Atlántico capturadas en el sur del golfo de México en 2015	61
Figura 4. Estados gonadales observados en los machos de atún aleta azul del Atlántico capturados en el sur del golfo de México en 2015	62
Figura 5. Variación mensual de la temperatura superficial del mar (SST) en el área de operación de la flota palangrera mexicana de atún aleta amarilla durante 2015	63
Figura 6. Progresión espacio temporal de la temperatura superficial del mar (SST) en el golfo de México y el océano Atlántico, 2015	66
Figura 7. Ubicación de las áreas de puesta conocidas actualmente para el stock occidental de atún aleta azul del Atlántico	67

Capítulo III. Dinámica ovocitaria del atún aleta azul (*Thunnus thynnus*) capturado en el sur del golfo de México: una evaluación comparativa con la fracción desovante del Mediterráneo a través de dos métodos estereológicos

Figura 1. Relación talla-peso individual para las hembras de atún aleta azul del Atlántico capturadas en el sur del golfo de México y el Mediterráneo	84
Figura 2. Distribución de tallas a través de Estimadores de Densidad por Kernel (KDE) para las hembras de atún aleta azul del Atlántico capturadas en el sur del golfo de México y el mar Mediterráneo	85
Figura 3. Estados gonadales observados en las hembras de atún aleta azul del Atlántico, capturadas en el sur del golfo de México y el mar Mediterráneo respectivamente	87
Figura 4. Fracción de volumen ocupada \pm SE de ovocitos por estadios de desarrollo en los diferentes estados de madurez gonadal para hembras de atún aleta azul del Atlántico capturadas en el sur del golfo de México y el Mediterráneo	90
Figura 5. Variación en la fracción de volumen a través del proceso de maduración de los ovocitos para los diferentes estados de madurez gonadal, en hembras de atún aleta azul del Atlántico capturadas en el sur del golfo de México y el Mediterráneo	92
Figura 6. Densidad promedio \pm SD de ovocitos por gramo de ovario (ovocitos \cdot g ⁻¹) por estadios de desarrollo en los diferentes estados de madurez gonadal, estimados por el método W&G, comparativa entre hembras de atún aleta azul del Atlántico capturadas en el sur del golfo de México y el Mediterráneo	93
Figura 7. Densidad promedio \pm SD de ovocitos por gramo de ovario (ovocitos \cdot g ⁻¹) por estadios de desarrollo en los diferentes estados de madurez gonadal, estimados por el método OPD, comparativa entre hembras de atún aleta azul del Atlántico capturadas en el sur del golfo de México y el Mediterráneo	94
Figura 8. Variación en la densidad de ovocitos, estimados por el método W&G, a través del proceso de maduración de estos, en los diferentes estados de madurez gonadal para las hembras de atún aleta azul del Atlántico capturadas en el sur del golfo de México y el Mediterráneo	95
Figura 9. Variación en la densidad de ovocitos, estimados por el	96

método OPD, a través del proceso de maduración de estos, en los diferentes estados de madurez gonadal para las hembras de atún aleta azul del Atlántico capturadas en el sur del golfo de México y el Mediterráneo

Figura 10. Relación entre la densidad de ovocitos y la longitud furcal del atún aleta azul del Atlántico, comparativa entre stocks, utilizando el método de W&G y OPD 97

Figura 11. Relación entre la densidad de ovocitos y el peso estimado del atún aleta azul del Atlántico, comparativa entre stocks, utilizando el método de W&G y OPD 98

**CAPÍTULO I. EL ATÚN ALETA AZUL DEL ATLÁNTICO: UNA ESPECIE
EN PELIGRO, CARENTE DE INFORMACIÓN BIOLÓGICA EN EL
GOLFO DE MÉXICO PARA SU MANEJO**

INTRODUCCIÓN

El atún aleta azul del atlántico, *Thunnus thynnus* (Linnaeus, 1758) es el túnido de mayor tamaño, altamente migratorio y con una distribución amplia en el océano Atlántico que va de los 70° N a los 30° S (Collette & Nauen, 1983). Al tener una distribución extensa, la Comisión Internacional para la Conservación del Atún del Atlántico (ICCAT por sus siglas en inglés) considera, para su manejo, dos stocks (oriental y occidental) separados por el meridiano 45° W. Esta “frontera” se estableció tomando en cuenta las dos zonas de puesta conocidas, el mar Mediterráneo y el golfo de México (Fromentin, 2006).

De acuerdo a la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (IUCN por sus siglas en inglés), el atún aleta azul se encuentra en peligro de extinción con una dramática tendencia decreciente de su población como consecuencia de la presión pesquera altamente selectiva ejercida hacia este recurso (Collette *et al.*, 2011a,b). Sin embargo, a pesar de que el stock occidental fue el primero bajo regulación a partir de 1999, el número de estudios enfocados en aspectos reproductivos es bajo comparado con aquellos llevados a cabo para el stock oriental (Susca *et al.*, 2001; Corriero *et al.*, 2003; Aranda *et al.*, 2011; MacKenzie & Mariani, 2012). Adicionalmente, los estudios para el stock occidental se han centrado principalmente en aguas canadienses y en el norte del golfo de México, en aguas de jurisdicción norteamericana (Heinisch *et al.*, 2014; Knapp *et al.*, 2014).

Para el caso particular de México, el atún aleta azul es capturado de manera incidental por la flota palangrera de superficie, la cual tiene como especie objetivo la pesca de atún aleta amarilla (*Thunnus albacares*) (Ramírez-López & Abad-Uribarren, 2013); a pesar de no ser especie objetivo principal, las capturas han declinado en los últimos años y su biomasa desovante se encuentra en un estado de baja abundancia, lo cual sugiere que el stock occidental es más pequeño que el oriental (Fromentin & Powers, 2005; Rosenberg *et al.*, 2013). Esta disminución en la población en el stock occidental, a pesar de ser captura incidental en el sur del golfo de México y estar regulada en la costa este norteamericana y canadiense, puede deberse a la conectividad que existe entre ambos stocks, consecuencia de las migraciones transatlánticas que han sido reportadas en individuos que migran del oriente al occidente y vice versa, principalmente en zonas de alimentación y desove, resultando en un stock “mixto” o

metapoblación. Tomando en cuenta que el stock oriental es más grande, las migraciones de su población tienen mayor impacto en la población occidental y por tal motivo, la recuperación del stock occidental está ligado a las tasas de supervivencia que ocurren en el stock oriental (Nemerson *et al.*, 2000; Block *et al.*, 2005; Stokesbury *et al.*, 2007; Rooker *et al.*, 2008; Taylor *et al.*, 2011; Wilson *et al.*, 2015; Richardson *et al.*, 2016). Con base en lo anterior, resulta evidente que los efectos de la sobre pesca o de un ordenamiento pesquero insuficiente por desconocimiento de información biológica en alguno de los stocks o cualquier otra actividad que los afecte, repercutirá directamente en el otro, principalmente del oriental al occidental.

A pesar de que durante mucho tiempo se tenía registro de una única área de puesta para el stock occidental, en la zona norte del golfo de México (Nemerson *et al.*, 2000; Ingram *et al.*, 2010), en el 2016, con estudios de larvas se ha confirmado otra área de puesta en un región de océano abierto al sur de Nueva Inglaterra, conocida como Slope Sea, en el noreste de los Estados Unidos (Richardson *et al.*, 2016). Para el caso del atún aleta azul en aguas mexicanas (sur del golfo de México), existe un acusado vacío de información de su estatus reproductivo (Abad-Uribarren *et al.*, 2014). En contraste, para el stock oriental se han documentado cuatro áreas de puesta en el mar Mediterráneo (Karakulak *et al.*, 2004a); la diferencia aparente de áreas de puesta entre ambos stocks, el reciente descubrimiento del área de puesta al sur de Nueva Inglaterra en 2016 y la idoneidad del hábitat para la reproducción en el sur del golfo de México (Abad-Uribarren, 2011; Duron *et al.*, 2016), sugieren la existencia de más áreas de puesta para el stock occidental.

Los procesos de reproducción juegan un papel relevante en las poblaciones de peces, determinando su capacidad para mantenerse y recuperarse de la pesca, la depredación y el estrés ambiental, por lo tanto, el conocimiento sobre biología reproductiva es una cuestión central para la evaluación, el manejo y la conservación de las poblaciones (Murua & Motos 2006; Morgan *et al.*, 2009; Dhurmeea *et al.*, 2016). A propósito de la falta de información para el stock occidental del atún aleta azul, este trabajo permite conocer el estado reproductivo de la especie al momento de su arribo al sur del golfo de México, dilucidar si existe un área de puesta en esta zona, así como analizar comparativamente la dinámica de los ovocitos entre los stocks, para determinar si existen diferencias significativas en el potencial reproductivo y la capacidad de recuperación

poblacional entre componentes de stocks complementarios. La información detallada sobre la biología reproductiva de este trabajo, servirá de referencia para la construcción de escenarios para el manejo y conservación de esta especie desde la perspectiva mexicana, pero con una visión de gran ecosistema marino.

ANTECEDENTES

Golfo de México

El golfo de México es un sistema marino semi-cerrado mediterráneo de latitud media en el que la transferencia de agua oceánica es realizada por el mar Caribe en el canal de Yucatán (Fig. 1), una de sus características más sobresalientes es el ancho de su plataforma continental en Florida (Estados Unidos) y Yucatán (México), la cual tiende a disminuir hacia los estados de Texas, Louisiana, Misisipi y Alabama en Estados Unidos, mientras que para México disminuye notablemente frente a costas de Veracruz y Tamaulipas (Aguirre-Gómez, 2002; Chen, 2017).



Figura 1. Mapa del golfo de México y el mar Caribe con representación esquemática de la transferencia de agua oceánica ocasionada por las corrientes de lazo y del Caribe. Fuente: Oey & Lee (2002).

Así mismo, el golfo de México es el noveno cuerpo de agua más grande del mundo, económica y ecológicamente uno de los más importantes en términos energéticos, pesqueros y comerciales (Tunnell, 2009; Yoskowitz *et al.*, 2013; Ward & Tunnell, 2017) y es considerado uno de los 64 grandes ecosistemas marinos por la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA por sus siglas en inglés) (Kumpf *et al.*, 1999). En cuanto a su extensión, ocupa un área de

más de 1.5 millones de km², sus ejes mayores son de 1573 km de Este a Oeste y de 900 km de Norte a Sur (Tunnell, 2009; Fautin *et al.*, 2010); a gran escala, puede ser clasificado en dos ecorregiones: norte del golfo de México y sur del golfo de México (Fig. 2).

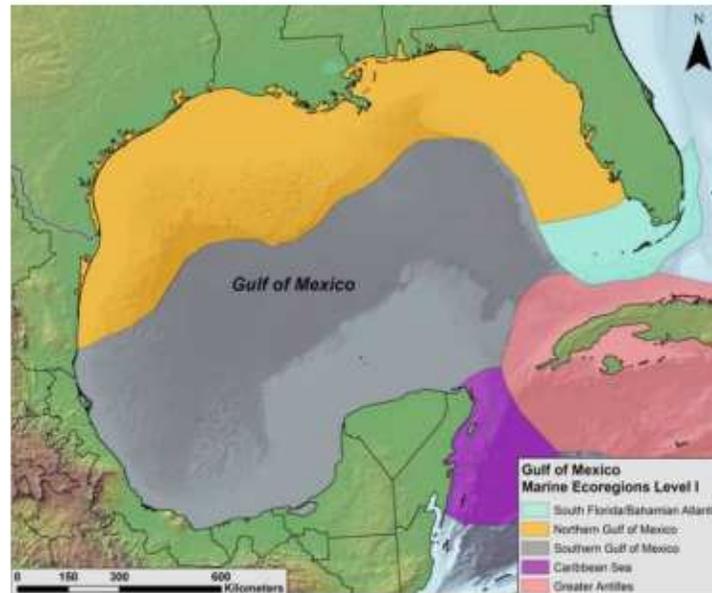


Figura 2. Mapa de las ecorregiones marinas del golfo de México, en color gris se observa el sur del golfo de México. *Fuente:* Ward & Tunnell (2017).

Con respecto a la composición de la ictiofauna, esta varía de manera espacio temporal debido que el golfo de México está en una zona de transición biogeográfica, lo que genera una dinámica de movimientos migratorios, diferentes historias de vida, así como diversas condiciones ambientales (temperatura, salinidad, turbidez, etc) que contribuyen a la distribución y abundancia de las especies (Chen, 2017).

El golfo de México cuenta con aproximadamente el 10% de las especies de peces marinos conocidas en el mundo (Nelson, 2006). Se han documentado 1443 especies de peces en 700 géneros, 223 familias y 45 órdenes en esta área (Hoese & Moore, 1998; McEachran & Feckhelm, 2005), 200 especies y 54 géneros más con respecto a las registradas en el océano Atlántico oriental entre el Ártico y la costa sur de Marruecos, incluido el Mediterráneo (Chen, 2017). De las 1443 especies de peces, son endémicas 66, lo que representa el 4.6 % (McEachran &

Fechhelm, 2005).

Mar Mediterráneo

El mar Mediterráneo al igual que el golfo México es un sistema marino semi-cerrado de latitud media; la transferencia de masas de agua y energía, se da través del estrecho de Gibraltar con el océano Atlántico a través del golfo de Cádiz y en menor medida por el canal de Suez hacia el mar Rojo (Fig. 3), el cual desempeña un papel importante en la distribución termohalina global. Una de las características principales del mar Mediterráneo consiste en que el nivel de evaporación excede al de las precipitaciones y escurrimientos de ríos, como resultado el agua de origen Atlántico entra al mar Mediterráneo por el Estrecho de Gibraltar y al tener menor densidad que el agua mediterránea se sitúa por encima de esta (Robinson *et al.*, 2001; Dubois-Dauphin *et al.*, 2017).

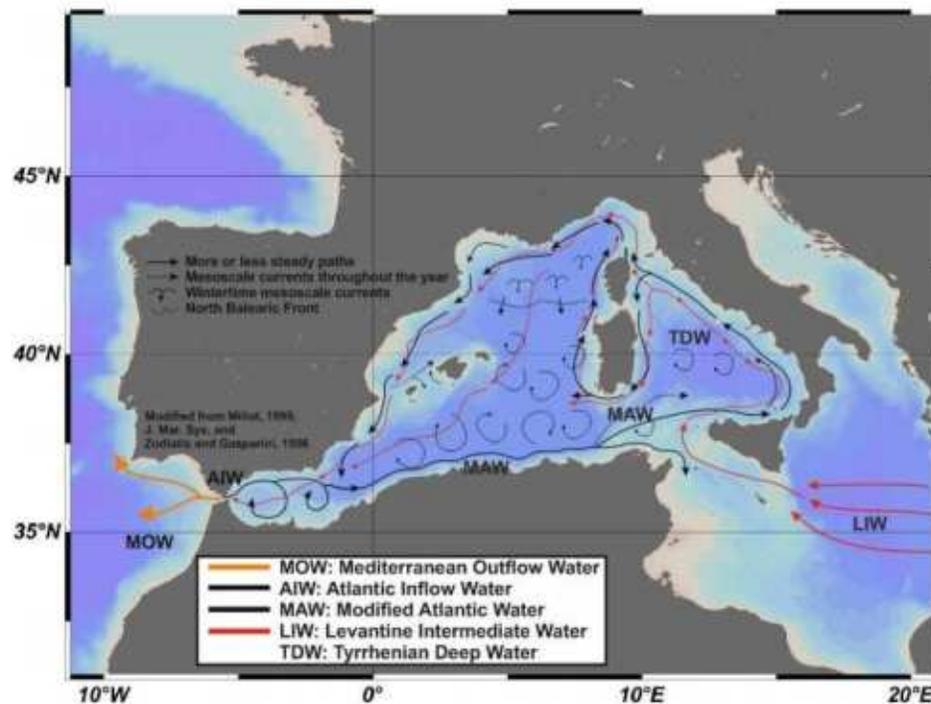


Figura 3. Mapa del mar Mediterráneo con representación esquemática de la transferencia de agua oceánica a través del estrecho de Gibraltar. Fuente: Buffett et al. (2013).

En cuanto a sus dimensiones, el mar Mediterráneo ocupa un área de 2.5 millones de km², su extensión de Oeste a Este que va desde el estrecho de Gibraltar entre España y Marruecos hasta las costas del suroeste de Turquía, es de aproximadamente 4000 km, mientras que su extensión de Norte a Sur de Croacia a Libia, es de 800 km (Boxer & Salah, 2018). De acuerdo con la Comisión General de Pesca para el Mediterráneo (GFCM, por sus siglas en inglés) perteneciente a la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, por sus siglas en inglés), el Mediterráneo puede ser clasificado en tres regiones (Fig. 4): Mediterráneo occidental, Mediterráneo central y Mediterráneo oriental (FAO, 2018).

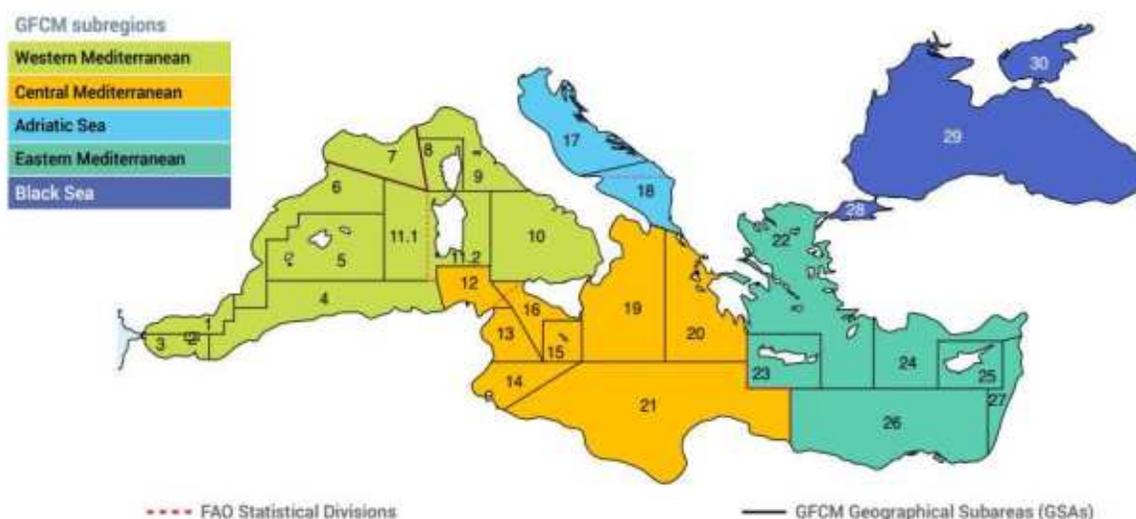


Figura 4. Mapa de las diferentes regiones geográficas del mar Mediterráneo. *Fuente:* FAO (2018).

La alternancia de estaciones cálidas y frías en conjunto con las características hidrológicas de la cuenca del Mediterráneo determinan en esta región dos tipos de biotas, es decir, especies con afinidad tropical en verano y especies con afinidad boreal en invierno; al igual que en el golfo de México, ocurren migraciones periódicas de varias especies entre el Atlántico y el Mediterráneo (UNEP-MAP RAC/SPA, 2010).

En el Mediterráneo el número de especies de peces reportadas es de 638, una cantidad menor a la del golfo de México; sin embargo, la proporción de especies endémicas es mayor (117

especies), lo que representa un 18% (Boudouresque, 2004).

Sistemática y taxonomía

De acuerdo con el Sistema Integrado de Información Taxonómica (ITIS, por sus siglas en inglés), la jerarquía taxonómica del atún aleta azul del Atlántico es la siguiente (ITIS, 2019):

- » Reino Animalia
- » Subreino Bilateria
- » Infrareino Deuterostomia
- » Phylum Chordata
- » Subphylum Vertebrata
- » Infraphylum Gnathostomata
- » Superclase Actinopterygii
- » Clase Teleostei
- » Superorden Acanthopterygii
- » Orden Perciformes
- » Suborden Scombroidei
- » Familia Scombridae
- » Subfamilia Scombrinae
- » Tribu Thunnini
- » Género *Thunnus*
- » Subgénero *Thunnus (Thunnus)*
- » Especie *Thunnus thynnus*

El género *Thunnus* está compuesto por ocho especies conocidas comúnmente como atunes, las cuales se describen en la Tabla 1; la mayoría de estas especies se comercializan de manera amplia a nivel internacional debido a la gran demanda que existe en diversos mercados, entre estas especies con gran valor comercial destaca el atún aleta azul (*Thunnus thynnus*) (Chow & Kishino, 1995; Viñas & Tudela, 2009).

Tabla 1. Especies del género *Thunnus* y sus principales nombres comunes.

Especie	Principales nombres comunes
<i>Thunnus alalunga</i>	Albacore, albacora, atún blanco, bonito del norte
<i>Thunnus albacares</i>	Yellowfin tuna, atún aleta amarilla, rabil
<i>Thunnus atlanticus</i>	Blackfin tuna, atún aleta negra
<i>Thunnus maccoyii</i>	Southern bluefin tuna, atún del sur, atún rojo del sur
<i>Thunnus obesus</i>	Bigeye tuna, atún ojo grande, patudo
<i>Thunnus thynnus orientalis</i>	Pacific bluefin tuna, atún aleta azul del pacífico, atún cimarrón
<i>Thunnus t. thynnus</i>	Bluefin tuna, atún aleta azul, atún rojo, atún rojo del atlántico
<i>Thunnus tonggol</i>	Longtail tuna, atún tongol, bonito oriental

Anatomía externa

El atún aleta azul posee un cuerpo fusiforme (forma de torpedo), su parte frontal es más robusta (Fig. 5 y 6), es el túnido de mayor tamaño, con una longitud promedio de 2 m; sin embargo, se han documentado tallas de poco más de 4 m cuyos pesos superan los 700 kg. Son nadadores perpetuos vigorosos y veloces con aletas amarillas de bordes negros que van desde las aletas dorsal y anal curvadas hasta una aleta caudal (cola) creciente, posee un color azul oscuro metalizado dorsalmente, que se desvanecen hacia blanco plateado ventralmente, con barras y puntos débiles en sus lados (Mather *et al.*, 1995; Fromentin, 2006; Gardieff, 2019).

De acuerdo con Fromentin (2006), el atún aleta azul posee 39 vértebras, 12 a 14 espinas en la aleta dorsal y de 13 a 16 radios en la aleta anal. La primera aleta dorsal es de color amarillo o azulado característico, la segunda aleta dorsal que tiene mayor altura posee un tono marrón-rojizo. La aleta caudal y las pínulas son de color amarillo-gris con contornos en negro y la quilla caudal mediana es negra en los adultos; sumado a estas características, posee vejiga natatoria y aletas pectorales cortas, inferiores al 80% de la longitud de la cabeza.



Figura 5. Fotografía de cardumen de atún aleta azul del Atlántico. *Fuente:* Sitio web Arkive <http://sarkive.com/fish/thunnus-thynnus/>

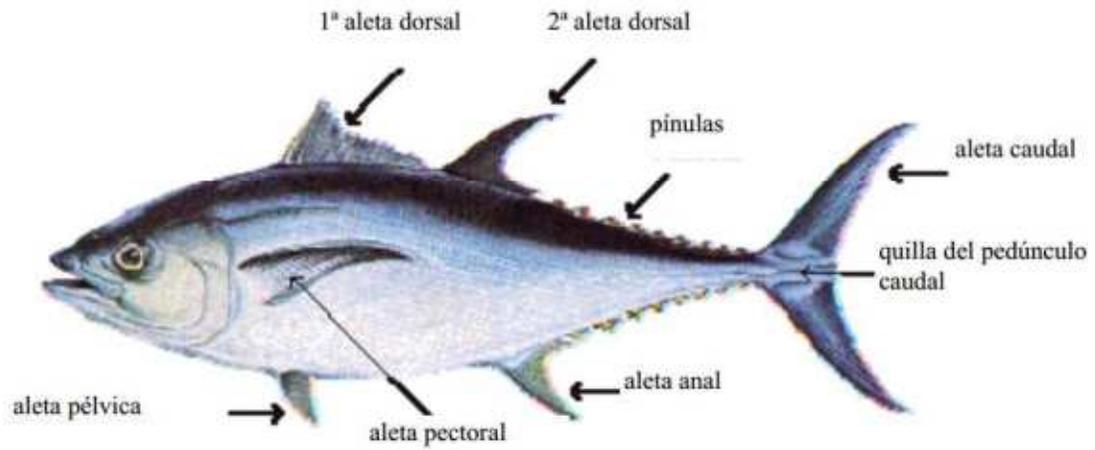


Figura 6. Dibujo de la anatomía externa de un atún aleta azul del Atlántico. *Fuente:* Fromentin (2006).

Hábitat y migraciones reproductivas

Como se ha mencionado, el atún aleta azul es una especie altamente migratoria, presente en el ecosistema pelágico del océano Atlántico (Collette & Nauen, 1983); posee la mayor distribución geográfica de todas las especies de tunidos, esta amplia distribución se debe principalmente a la *rete mirabile*, que consiste en una red compleja de vasos sanguíneos que conservan el calor metabólico, por lo que puede tolerar temperaturas ambientales que oscilan entre 2.8 y 31.0 °C (Carey & Lawson, 1973; Carey & Gibson, 1983; Block *et al.*, 2001) manteniendo una temperatura corporal constante (Carey & Teal, 1969; Block *et al.*, 2001; Blank *et al.*, 2004). Puede desplazarse a profundidades mayores a los 1000 m (Walli *et al.*, 2009), y esta capacidad le permite ser la especie de la familia Scombridae con el nicho térmico de mayor amplitud (Block *et al.*, 1998).

El atún aleta azul se alimenta generalmente en aguas frías con alta productividad y en efecto, existe evidencia de que ambos stocks llegan a converger en las zonas de alimentación (Walli *et al.*, 2009); sin embargo, el desove de esta especie ocurre en las masas de agua cálidas (Block *et al.*, 1993, 2001; Mather *et al.*, 1995). La temperatura juega un papel determinante para inducir el desove de la especie, la ventana térmica óptima calculada para la puesta es de los 22.6 °C a los 27.5 °C para el norte del golfo de México y de los 22.5 °C a los 25.5 °C para el Mediterráneo (Karakulak *et al.*, 2004a, 2004b; Garcia *et al.*, 2005; Teo *et al.*, 2007; Rooker *et al.*, 2007).

Durante la época reproductiva los organismos adultos migran para concentrarse en sus áreas de desove; los individuos del stock oriental migran mayoritariamente hacia el Mediterráneo en donde han sido registradas cuatro áreas de puesta: 1) Las aguas de las islas Baleares, 2) las aguas alrededor de Malta y las costas de Sicilia, 3) el mar Tirreno y 4) el mar Levantino (Karakulak *et al.*, 2004a).

De acuerdo con Medina *et al.* (2002), durante su entrada por el estrecho de Gibraltar, de abril a principios de junio y donde la temperatura es de aproximadamente 18 °C, los organismos no presentan evidencia de actividad reproductiva; sin embargo, esta ocurre cuando se encuentran en las Baleares, aproximadamente en la segunda semana de junio cuando la temperatura del mar alcanza, en esta y las demás zonas de puesta, valores adecuados para la reproducción. Por otra

parte, en el mar Levantino la puesta se produce en la tercera semana de mayo (Karakulak *et al.*, 2004a). En conclusión, para el stock oriental existe un gradiente termo-temporal reproductivo sobre un eje longitudinal en el desove, el cual ocurre de junio a julio en el Mediterráneo Occidental y central, y de mayo a junio en el mar de Levante (Susca *et al.*, 2001; Medina *et al.*, 2002; Corriero *et al.*, 2003; Karakulak *et al.*, 2004a; Oray & Karakulak, 2005; Alemany *et al.*, 2010).

En el caso de los individuos del stock occidental, durante años se había reportado y asumido que el atún aleta azul solamente migraba y se reproducía en una única área de puesta en el golfo de México, en la zona norte, que es en donde se han desarrollado la mayoría de las investigaciones; sin embargo, como ya se explicó previamente, esta concepción del proceso cambió a partir de que en el 2016, con estudios de larvas, se confirmó otra área de puesta en el noreste de los Estados Unidos en una región de océano abierto al sur de Nueva Inglaterra conocida como Slope Sea (Nemerson *et al.*, 2000; Ingram *et al.*, 2010; Richardson *et al.*, 2016).

El periodo reproductivo en el norte del golfo de México se ha registrado de mediados de abril a junio (Richards, 1976; Stokesbury *et al.*, 2004). Los individuos adultos se encuentran en aguas de 24 a 27 °C (Block *et al.*, 2005; Teo *et al.*, 2007; Muhling *et al.*, 2011) y de hecho, no existen registros de individuos adultos de atún aleta azul en temperaturas superiores a los 30 °C (Muhling *et al.*, 2010). De acuerdo con Blank *et al.* (2004) las temperaturas superiores a los 30 °C pueden llevar al límite la capacidad cardíaca de esta especie. Por otra parte, las larvas de atún aleta azul en la zona norte del golfo de México son más recurrentes a partir de finales de abril a finales de mayo cuando la temperatura superficial de mar va de los 23.5 °C a los 28 °C, y son menos frecuentes cuando la temperatura excede los 29 °C (Muhling *et al.*, 2011).

Para la nueva área de puesta conocida como Slope Sea, se encontraron larvas a finales de junio y principios de agosto, con fuerte evidencia que sugiere que el 40% de las larvas proceden de periodos de actividad reproductiva en julio; además, es importante destacar que en este mes los organismos adultos de atún aleta azul no están presentes en el golfo de México (Richardson *et al.*, 2016).

Las larvas de atún aleta azul probablemente se encuentren en la misma masa de agua en la que ocurrió el desove, generalmente las larvas de atún aleta azul están presentes en zonas

externas de la plataforma, caracterizadas por profundidades mayores a 120 m (Muhling *et al.*, 2010; Koched *et al.*, 2013) y aguas costeras no productivas, donde las larvas pueden ser favorecidas para sobrevivir por la escasez de depredadores y la competencia (Bakun & Broad, 2003; Alemany *et al.*, 2010).

Pesquerías y situación actual de los stocks

Actualmente, las pesquerías de atún aleta azul para el caso del stock oriental son sumamente diversas, en cuanto las artes de pesca utilizadas las más frecuentes son el curricán, caña con cebo, palangre, almadrabas y red de cerco (ICCAT, 2009). Las almadrabas fueron el principal arte de pesca hasta la década de los setenta, han sido utilizadas desde la edad media y el siglo XIX en Italia, Portugal, Túnez, Marruecos y España; al ser un arte pasivo solamente operan durante el periodo de migración reproductiva (abril a septiembre), a diferencia del palangre o métodos manuales que pueden operar todo el año (Ravier & Fromentin, 2004; Mylonas *et al.*, 2010).

Posteriormente, las redes de cerco se convirtieron en el método de pesca más frecuente, las cuales representan entre 70% y 86% de las capturas y están restringidas durante la época reproductiva para peces mayores de 130 cm (organismos sexualmente maduros); actualmente la pesquería por redes de cerco abastece a la industria de engorde (engrase) de atún, la cual consiste en capturar a los organismos de mayor tamaño cuando se reúnen en las zonas de desove para posteriormente trasladarlos a jaulas flotantes donde serán alimentados con pelágicos menores para aumentar su contenido graso y con ello su precio en el mercado (Miyake *et al.*, 2003; Ottolenghi, 2008; Mylonas *et al.*, 2010).

Las tallas de captura del atún aleta azul varían en función del arte de pesca utilizado, para el caso particular del stock oriental, los peces pequeños (30-145 cm L_F) son capturados principalmente por cebo, redes de enmalle, redes de cerco y caña, mientras que los peces considerados como grandes (150-300 cm L_F) son capturados generalmente por almadrabas, palangre y curricán (Justel-Rubio & Oritz, 2013).

Los análisis de distribución de frecuencia de tallas del atún aleta azul para las almadrabas españolas muestran que la longitud media de los individuos capturados va de los 200 a 230 cm

L_F , lo que corresponde a edades comprendidas de los 10 a 13 años, lo que indica de manera general que las almadrabas seleccionan organismos mayores a 10 años (Cort, 1991; Fromentin *et al.*, 2007; Ortiz de Urbina *et al.*, 2007; Restrepo *et al.*, 2007; Ortiz de Urbina *et al.*, 2013).

El palangre en el mar Mediterráneo está dirigido y adaptado a diversas especies como pez espada (*Xiphias gladius*), atún blanco (*Thunnus alalunga*) y atún aleta azul (*Thunnus thynnus*), a este último se dedica el palangre más “robusto”, equipado con 1000 a 1200 anzuelos tipo “J” de tamaño 0 o 1, una línea principal de 5 mm de diámetro con líneas secundarias de 45 m de longitud, se utiliza como carnada escómbridos congelados como *Scomber scombrus* o *Scomber japonicus*, así como calamares (*Illex sp.* o *Loligo sp.*) (Megalofonou *et al.*, 2005). Las capturas realizadas por la flota de palangre del Mediterráneo se componen de individuos con tallas que van desde los 111 a 271 cm L_F , tallas típicas de los ~190 a ~220 cm L_F (Justel-Rubio & Ortiz, 2013; Lombardo *et al.*, 2016; Lombardo *et al.*, 2017).

Por el contrario, la pesquería de atún aleta azul para el stock occidental en el golfo de México y particularmente en aguas mexicanas, es completamente diferente, ya que no existe una pesquería dirigida hacia esta especie, las capturas son incidentales (bycatch) y provienen de la flota de palangre que dirige sus esfuerzos a la captura de atún aleta amarilla (*Thunnus albacares*) (Noguez-Fuentes *et al.*, 2007); el palangre mexicano cuenta en promedio con 617 anzuelos/lance tipo “garra de aguila” del número 16/0, la línea principal tiene una longitud media de 63 km y cuenta con reinales que se extienden a ~35 brazas, la carnada puede ser ojón (*Selar crumenophthalmus*), Jiníguaro (*Anisotremus surinamensis*), sardina (*Sardinella spp.*) y calamar (*Loligo sp.*) (Solana-Sansores & Ramírez-López, 2006). Debido a que la especie objetivo de la flota es el atún aleta amarilla, el número de individuos capturados de atún aleta azul por la flota mexicana podría considerarse marginal, ya que se registran en promedio 60 individuos al año, lo que representa una captura incidental inferior a 25 t anuales, con intervalo de tallas de los 120 a 380 cm L_F y un promedio de 250 cm L_F (Ramírez-López & Abad-Uribarren, 2013; Abad-Uribarren *et al.*, 2014).

El motivo por el que no existe una pesquería masiva dirigida de atún aleta azul en el golfo de México, se debe a la sobreexplotación de la década de los sesenta del stock occidental, cuando los desembarques alcanzaron un máximo de casi 20000 t y posteriormente en los años setenta, los

desembarques declinaron en un promedio de 5000 t; de acuerdo con la ICCAT la pesca sin restricciones durante estas décadas dio lugar a una fuerte disminución de la abundancia, principalmente de peces jóvenes que no llegaron a incorporarse a la fracción reproductora, provocando que la biomasa desovante disminuyera de manera dramática. Por tal motivo, a partir de 1982 la ICCAT estableció una captura total permitida de 1160 t para el stock occidental, la cual ha oscilado entre 1995 a 2660 t (Sissenwine *et al.*, 1998; Rooker *et al.*, 2007).

A pesar de los años de estrictas regulaciones sobre pesquerías para el atún aleta azul y las limitaciones en la captura sobre el stock occidental, las estimaciones poblacionales indican que esta aún continúa por debajo de los niveles de referencia. Además ha existido una fuerte controversia sobre la estructura de los stocks, principalmente con respecto al stock occidental, el cual se cree que tiene una biomasa reproductora más pequeña y todavía se encuentra en un estado de abundancia muy reducida (Comité Permanente de Investigación y Estadísticas (SCRS), 2003, 2006; Rooker *et al.*, 2007).

El hecho de que no se vea una marcada recuperación del stock occidental se ha atribuido entre otros factores a las diferencias en las tallas de primera madurez sexual (L_{50}); mientras que el 50% de los individuos del stock oriental son reproductivamente activos a los 3 años (~ 103 cm L_{FC}) y el 100% a los 4 y 5 años que corresponden a tallas de 115 a 121 cm L_{FC} (Rodríguez-Roda, 1967; Corriero *et al.*, 2005), en el stock occidental las tallas de madurez estimadas difieren considerablemente, en este caso, se ha reportado que los individuos son sexualmente activos después de los 8 años, fijándose la edad de primera madurez entre los 11 y 12 años, es decir, cuando alcanzan una talla promedio de ~ 230 cm L_{FC} (Baglin, 1982; Magnuson *et al.*, 1994; Nemerson *et al.*, 2000; Diaz & Turner, 2006).

Sin embargo, recientemente Richardson *et al.* (2016) reportaron que además del golfo de México existe otra área de desove en el Slope Sea (costa este de Estados Unidos) a la que arriban para la reproducción, organismos de menor tamaño en comparación con el golfo de México; a partir de lo cual ha sido posible recalcular la talla/edad de madurez sexual y se determinó que había sido sobrestimada y que la talla de primera madurez para el stock occidental es de 120 a 140 cm L_F (4 a 5 años), similar a lo reportado por Heinisch *et al.* (2014); concluyendo que la mayoría de desoves del atún aleta azul en el occidente se dan en esta área. Esta investigación

pone de manifiesto la falta de información biológica que existe para el stock occidental y el alto grado de incertidumbre asociado a los datos biológicos que se tiene de esta especie.

En cuanto al stock oriental, este parece más estable y es significativamente más grande, al grado de que las migraciones de sus individuos tienen una gran influencia en la población occidental y por consecuencia en la recuperación de este stock (Nemerson *et al.*, 2000; Block *et al.*, 2005; Stokesbury *et al.*, 2007; Rooker *et al.*, 2008; Taylor *et al.*, 2011; Wilson *et al.*, 2015; Richardson *et al.*, 2016), sin embargo, persiste la incertidumbre principal acerca de las estadísticas de desembarques en el Mediterráneo, los índices de CPUE y la biomasa del stock en desove (SCRS, 2003; Fromentin & Powers, 2005; Rooker *et al.*, 2007), lo que genera dudas entre todos los actores involucrados en la pesquería de este recurso. En este sentido, los pescadores comerciales creen que después de todos los años de sacrificio acatando las cuotas de captura ya deberían haber sido recompensados con mayores cuotas (Sissenwine *et al.*, 1998).

Actualmente la ICCAT (2017a, 2017b) ha asignado para el stock oriental una captura máxima permisible de 28200 t para el 2018, 32240 t para el 2019 y 36000 t para el 2020. Por otra parte, para el stock occidental las capturas permitidas serán de 2350 t por año durante el mismo periodo. Para tener una mejor perspectiva de las diferencias en el manejo pesquero y tasas de captura que existen entre ambos stocks, en la Tabla 2 se detallan las capturas permisibles de atún aleta azul del 2018 al 2020 por país.

Tabla 2. Cuotas de capturas establecidas por la ICCAT para cada uno de los stocks de atún aleta azul del Atlántico durante el periodo 2018-2020.

Stock	País	2018 (t)	2019 (t)	2020 (t)
Oriental	Albania	100	130	140
	Argelia	1260	1398	1600
	China	79	89	100
	Egipto	181	240	300
	Unión Europea	15850	17536	19360
	Islandia	84	112	140
	Japón	2279	2528	2801
	Corea	160	167	180
	Libia	1846	2021	2210
	Marruecos	2578	2892	3219
	Noruega	104	152	200
	Siria	66	73	80
	Túnez	2115	2344	2590
	Turquía	1414	1824	2240
	China Taipéi	79	84	90
Reservas no asignadas	5	650	750	
Occidental	Estados Unidos	1247.86	1247.86	1247.86
	Canadá	515.59	515.59	515.59
	Japón	407.48	407.48	407.48
	Reino Unido (Bermudas)	5.31	5.31	5.31
	Francia (San Pedro y Miquelón)	5.31	5.31	5.31
	México	128.44	128.44	128.44

Aspectos reproductivos

Como se observó en el apartado anterior, para una correcta evaluación y gestión de las pesquerías, es fundamental conocer a detalle la biología y ecología de las especies, sus cambios al alcanzar la madurez sexual y particularmente contar con información detallada sobre los aspectos reproductivos, por tal motivo, resulta indispensable obtener datos y parámetros que hayan sido estimados de forma adecuada, exacta y precisa, ya que el equilibrio o recuperación de las poblaciones está fuertemente ligado al éxito reproductivo (Rocha *et al.*, 2008; Tsikliras *et al.*, 2013; Domínguez-Petit *et al.*, 2017).

Para estudiar y determinar los ciclos reproductivos se suele utilizar el índice gonadosomático, el cual representa la variación en el peso de la gónada a través del tiempo respecto al peso del individuo expresado en porcentaje o bien, la observación y descripción a nivel macroscópico en la gónada para determinar los cambios en el grado de madurez en diferentes periodos de tiempo, como estudios previos han demostrado (Introzzi & De Introzzi, 1986; Bezerra *et al.*, 2013; Cruz-Castán *et al.*, 2019); si bien estos métodos son convenientemente precisos para determinar las épocas de desove y el ciclo reproductivo de forma agrupada, no es posible determinar los aspectos de fecundidad y la dinámica intraovárica de la reproducción, el efecto de la talla, etc., los cuales son datos de suma importancia para el manejo pesquero de especies en peligro.

A su vez, la fecundidad puede ser estimada por: 1) métodos gravimétricos o volumétricos y 2) métodos esterológicos (Ganias *et al.*, 2014). En el primero se submuestra sucesivamente el ovario de masa conocida, se separan y contabilizan los ovocitos de las submuestras; para estimar la fecundidad potencial se toman en cuenta los ovocitos más avanzados a partir de la vitelogénesis, mientras que para la estimación de la fecundidad realizada o real se toman en cuenta solamente ovocitos hidratados, adicionalmente, es necesario una descripción histológica de las gónadas, ya que si se encuentran folículos post-ovulatorios en los ovarios, tienen que eliminarse del análisis puesto que su ocurrencia indica que la puesta ha comenzado y en consecuencia el número de ovocitos presentes ha disminuido; otra desventaja de este método radica en que la falta de tinción de los ovocitos puede dificultar su clasificación (Hunter *et al.*, 1985; Murua *et al.*, 2003; Bezerra *et al.*, 2013).

En el caso de los métodos estereológicos, estos se basan en proporcionar información cuantitativa de estructuras 3D a partir de descripciones y análisis de mediciones en imágenes 2D procesadas por técnicas histológicas (Ganias *et al.*, 2014); en general, los métodos estereológicos se basan en el “Principio de Delesse”, el cual establece que la fracción de volumen de un componente dentro de un tejido es proporcional a su área de sección transversal fraccional (Delesse, 1847). Hasta ahora, los procedimientos estereológicos más utilizados para estimar el número de ovocitos es el propuesto por Weibel & Gomez (1962) con su fórmula adicional modificada en Weibel *et al.* (1966), el método de disector descrito por Sterio (1984), que permite el conteo de folículos post-ovulatorios para la estimación de la fecundidad realizada o real y, más recientemente el método de “oocyte packing density” propuesto por Kurita & Kjesbu (2009).

Las ventajas principales de los métodos estereológicos se fundamentan en que los criterios de clasificación de los ovocitos se realizan con mayor precisión de acuerdo al tamaño, forma, características celulares e incluso por la coloración adquirida por la tinción histológica, lo que ayuda considerablemente a minimizar el sesgo en la clasificación; adicionalmente, se puede realizar un análisis cuantitativo de todos los componentes presentes en la gónada como atresia, folículos post-ovulatorios, tejido conectivo, espacios libres y cualquier tipo de ovocito sin importar su estado, lo que contribuye a definir y entender mejor la dinámica del ovario y las características de los ovocitos (Murua *et al.*, 2003; Saber *et al.*, 2016).

Abascal & Medina (2005) han detallado previamente la variación en el tamaño de los diferentes estadios de ovocitos en atún aleta azul durante su desarrollo, encontrando que el tamaño de los ovocitos en crecimiento primario oscila entre ~20 y 120 μm de diámetro, aumentando de ~120 a 250 μm para la fases de estados lipídicos, los ovocitos en estado de vitelogénesis pueden tener un diámetro entre ~250 y 500 μm y finalmente los ovocitos maduros pueden alcanzar entre ~500 y 1000 μm de diámetro.

Los estudios de fecundidad en el atún aleta azul se han focalizado principalmente para el stock oriental. Uno de los primeros estudios de fecundidad del atún aleta azul a través de estereología fue el realizado por Medina *et al.* (2002), en el que se reportó una fecundidad parcial relativa de $93 \text{ huevos} \cdot \text{g}^{-1}$; sin embargo, en este estudio no se consideró el grado de contracción de la gónada después de haberla sometido a diferentes procesos histológicos por lo que este valor

estaría sobrestimado. Posteriormente Medina et al. (2007) reportaron una fecundidad parcial relativa de $82 \text{ huevos} \cdot \text{g}^{-1}$ equivalente a una fecundidad parcial de 9 millones de huevos; sin embargo, al tomar en cuenta los cambios en la reducción de la gónada se obtendría una fecundidad relativa más baja correspondiendo a $59 \text{ huevos} \cdot \text{g}^{-1}$ lo que corresponde a una fecundidad parcial de 6.5 millones de huevos, es decir, el equivalente a una fecundidad promedio anual (total) de alrededor de 77 millones de huevos por individuo y una fecundidad anual relativa de $702.1 \text{ huevos} \cdot \text{g}^{-1}$.

Por su parte, Aranda et al. (2013) analizaron la variación en la fecundidad con el método de disector, el cual permite el conteo de folículos post-ovulatorios (lo que representa el número real de huevos liberados en el último evento de desove) contra ovocitos maduros (huevos que apenas serán liberados), reportando una fecundidad parcial de 8.8 millones de huevos teniendo en cuenta los ovocitos maduros, lo que equivale a una fecundidad parcial relativa de $75 \text{ huevos} \cdot \text{g}^{-1}$, mientras que tomando en cuenta solo los folículos post-ovulatorios la fecundidad parcial fue de 6.23 millones de huevos, es decir $48 \text{ huevos} \cdot \text{g}^{-1}$; de acuerdo con los autores aunque existen diferencias entre ambos resultados, estas no son estadísticamente significativas.

En un estudio realizado por Aragón et al. (2010) se comparó el método de Weibel contra el método de disector para estimar la cantidad de ovocitos en cada estadio, encontrando para el caso de los ovocitos en estado lipídico, vitelogénicos y núcleo migratorio valores más bajos en el método de Weibel, pero sin diferencias significativas excepto para los ovocitos en estado vitelogénicos; por el contrario, para el caso de las atresias el método de Weibel reportó valores más altos con diferencias estadísticamente significativas respecto al método de disector. Finalmente para el caso de los folículos post-ovulatorios los valores estimados por el método de disector fueron ligeramente mayores que los estimados por el método de Weibel.

Por su parte Knapp et al. (2014) presentaron el primer estudio histológico comparativo de la reproducción entre el stock occidental capturado en la zona norte del golfo de México y el stock oriental del mar Mediterráneo, donde a pesar de haber encontrado diferencias en los valores de fecundidad, menores para las hembras del golfo de México ($28.14 \text{ huevos} \cdot \text{g}^{-1}$) con respecto a las del Mediterráneo ($45.56 \text{ huevos} \cdot \text{g}^{-1}$) estas diferencias no fueron significativas.

Considerando lo expuesto hasta ahora, surge la necesidad de conocer el estado

reproductivo de los individuos que arriban a aguas mexicanas, ya que en caso de confirmar al sur del golfo de México como una nueva área de puesta, resulta indispensable analizar las características y dinámica de los ovocitos de estas hembras, lo cual permitirá completar la información acerca de la biología reproductiva del stock occidental y así poder determinar con mayor solidez, si existen o no diferencias significativas entre este y el stock oriental.

HIPÓTESIS

Si la ocurrencia temporal del atún aleta azul del Atlántico en aguas mexicanas del golfo de México está constituida por individuos maduros y coincide el hábitat oceanográfico favorable para llevar a cabo la actividad reproductiva, entonces el sur del golfo de México puede definirse como un área de puesta no considerada hasta el momento, sumándose a las previamente documentadas para el stock occidental, y la capacidad de producción de ovocitos de los individuos que arriban al sur del golfo de México debe ser similar a la del stock oriental, lo cual puede ser verificado con información detallada de su ovodinámica a nivel histológico, sirviendo de referencia en la construcción de escenarios para el manejo y conservación de este recurso pesquero en peligro.

OBJETIVOS

Objetivo general

Determinar histológicamente por primera vez el estado reproductivo del atún aleta azul del Atlántico (*Thunnus thynnus*) que se captura incidentalmente en el sur del golfo de México y caracterizar el grado de similitud comparativa de la dinámica de los ovocitos entre esta fracción del stock occidental y el Mediterráneo, para dilucidar si existen diferencias significativas en la producción de ovocitos, y en consecuencia, en la capacidad reproductiva y de recuperación poblacional entre stocks.

Objetivos particulares

- ↪ Determinar histológicamente el estado reproductivo del atún aleta azul del Atlántico capturado incidentalmente en el sur del golfo de México, su extensión espacial y progresión temporal.
- ↪ Describir detalladamente, por primera vez, la dinámica del desarrollo de los ovocitos del atún aleta azul durante su estancia en aguas mexicanas.
- ↪ Describir comparativamente las características y dinámica de los ovocitos de las hembras capturadas en el sur del golfo de México con las del Mediterráneo.
- ↪ Determinar la producción de ovocitos por gramo de ovario de ambos stocks, a partir de dos métodos estereológicos, para minimizar la variabilidad metodológica como posible fuente de sesgo.

REFERENCIAS

- Abad-Uribarren A. 2011.** Distribución y preferencias oceanográficas del atún aleta azul *Thunnus thynnus* (Linnaeus, 1758) en el Golfo de México. Tesis de Maestría, Universidad Veracruzana.
- Abad-Uribarren, A., C. Meiners, K. Ramírez-López & S. Ortega-García. 2014.** Dinámica temporal de la captura incidental de atún aleta azul (*Thunnus thynnus*) y su relación con la variabilidad ambiental en aguas Mexicanas del Golfo de México. *Col. Vol. Sci. Pap. ICCAT*. **70(2)**:684-698.
- Abascal, F.J. & A. Medina. 2005.** Ultrastructure of oogenesis in the Bluefin tuna, *Thunnus thynnus*. *J. Morphol.* **264**:149-160.
- Aguirre-Gómez, R. 2002.** Los mares Mexicanos a través de la percepción remota. 1st ed. Instituto de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México: Plaza y Valdés, Ciudad de México, México. 95 pp.
- Aleman, F., L. Quintanilla, P. Velez-Belchí, A. García, D. Cortés, J.M. Rodríguez, M.L. Fernández de Puelles, C. González-Pola & J.L. López-Jurado. 2010.** Characterization of the spawning habitat of Atlantic bluefin tuna and related species in the Balearic Sea (western Mediterranean). *Prog. Oceanogr.* **86**:21-38.
- Aragón, L., G. Aranda, A. Santos & A. Medina. 2010.** Quantification of ovarian follicles in bluefin tuna *Thunnus thynnus* by two stereological methods. *J. Fish. Biol.* **77**:719-730. DOI 10.1111/j.1095-8649.2010.02713.x.
- Aranda, G., L. Aragón, A. Corriero, C.C. Mylonas, F. De la Gándara, A. Belmonte & A. Medina. 2011.** GnRH α -induced spawning in cage-reared Atlantic bluefin tuna: An evaluation using stereological quantification of ovarian post-ovulatory follicles. *Aquaculture*. **317**:255-259. DOI 10.1016/j.aquaculture.2011.04.030.
- Aranda, G., A. Medina, A. Santos, F.J. Abascal & T. Galaz. 2013.** Evaluation of Atlantic bluefin tuna reproductive potential in the western Mediterranean Sea. *J. Sea. Res.* **76**:154-160.
- Arkive. 2019.** Atlantic bluefin tuna videos, photos and facts. <http://sarkive.com/fish/thunnus-thynnus/> (consultado el 21 de noviembre de 2019).

Baglin, R.E. 1982. Reproductive biology of western Atlantic bluefin tuna. *Fish. Bull.* **80**:121-134.

Bakun, A. & K. Broad. 2003. Environmental 'loopholes' and fish population dynamics: comparative pattern recognition with focus on El Niño effects in the Pacific. *Fish. Oceanogr.* **12** (4-5):458-473.

Bezerra, N.P.A., C.A.F. Fernandes, F.V. Albuquerque, V. Pedrosa, F. Hazin & P. Travassos. 2013. Reproduction of Blackfin tuna *Thunnus atlanticus* (Perciformes: Scombridae) in Saint Peter and Saint Paul Archipelago, Equatorial Atlantic, Brazil. *Rev. Biol. Trop.* **61**(3):1327-1339.

Blank, J.M., J.M. Morrisette, A.M. Landeira-Fernandez, S.B. Blackwell, T.D. Williams & B.A. Block. 2004. *In situ* cardiac performance of Pacific bluefin tuna hearts in response to acute temperature change. *J. Exp. Biol.* **207**:881-890.

Block, B.A., H. Dewar, S.B. Blackwell, T.D. Williams, E.D. Prince, C.J. Farwell, A. Boustany, S.L.H. Teo, A. Seitz, A. Walli & D. Fudge. 2001. Migratory movements, depth preferences, and thermal biology of Atlantic bluefin tuna. *Science.* **293**:1310-1314.

Block, B.A., H. Dewar, C. Farwell & E. Prince. 1998. A new satellite technology for tracking the movements of Atlantic bluefin tuna. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* **95**:9384-9389.

Block, B.A., J.R. Finnerty, A.F.R. Stewart & J. Kidd. 1993. Evolution of endothermy in fish: mapping physiological traits on a molecular phylogeny. *Science.* **260**:210-214.

Block, B.A., S.L.H. Teo, A. Walli, A. Boustany, M.J.W. Stokesbury, C.J. Farwell, K.C. Weng, H. Dewar & T.D. Williams. 2005. Electronic tagging and population structure of Atlantic bluefin tuna. *Nature.* **434**:1121-1127.

Boudouresque, C.F. 2004. Marine biodiversity in the Mediterranean: status of species, populations and communities. *Scientific Report of Port-Cros National.* **20**:97-146.

Boxer, B. & M. Salah. 2018. Encyclopædia Britannica: Mediterranean Sea. <https://www.britannica.com/place/Mediterranean-Sea>. (Consultado el 5 de marzo de 2019).

Buffett, G.G., R.W. Hobbs, E.A. Vsemirnova, D. Klaeschen, C.A. Hurich, C. Ranero & V. Sallares. 2013. Characterization of thermohaline staircases in the Tyrrhenian Sea using Stochastic Heterogeneity Mapping. *J. Acoust. Soc. Am.* **133**:3313. DOI 10.1121/1.4805513.

Carey, F.G. & Q.H. Gibson. 1983. Heat and oxygen exchange in the rete mirabile of the bluefin tuna, *Thunnus thynnus*. *Comp. Biochem. Physiol.* **74(2)**:333-342.

Carey, F.G. & K.D. Lawson. 1973. Temperature regulation in free-swimming bluefin tuna. *Comp. Biochem. Physiol. A Comp. Physiol.* **44**:375-392.

Carey, F.G. & J.M. Teal. 1969. Regulation of body temperature by the bluefin tuna. *Comp. Biochem. Physiol.* **28**:205-213.

Chen, Y. 2017. Fish resources of the Gulf of Mexico. In: Ward, C.H. (ed.). Habitats and biota of the Gulf of Mexico: Before the deepwater horizon oil spill, Volume 2, Springer Open, USA. Pp. 869-1008.

Chow, S. & H. Kishino. 1995. Phylogenetic relationships between tuna species of the genus *Thunnus* (Scombridae: Teleostei): Inconsistent implications from morphology, nuclear and mitochondrial genomes. *J. Mol. Evol.* **41**:741-748.

Collette, B., A.F. Amorim, A. Boustany, K.E. Carpenter, N. de Oliveira Leite Jr., A. Di Natale, D. Die, W. Fox, F.L. Fredou, J. Graves, F.H. Viera Hazin, M. Hinton, M. Juan Jorda, O. Kada, C. Minte Vera, N. Miyabe, R. Nelson, H. Oxenford, D. Pollard, V. Restrepo, J. Schratwieser, R.P. Teixeira Lessa, P.E. Pires Ferreira Travassos & Y. Uozumi. 2011b. *Thunnus thynnus*. *The IUCN Red List of Threatened Species 2011*: e.T21860A9331546. Available at <http://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2011-2.RLTS.T21860A9331546.en> (Consultado el 30 de Octubre de 2018).

Collette, B.B., K.E. Carpenter, B.A. Polidoro, M.J. Juan-Jordá, A. Boustany, D.J. Die, C. Elfes, W. Fox, J. Graves, L.R. Harrison, R. McManus, C.V. Minte-Vera, R. Nelson, V. Restrepo, J. Schratwieser, C.L. Sun, A. Amorim, M. Brick-Peres, C. Canales, G. Cardenas, S.K. Chang, W.C. Chiang, N. De Oliveira-Leite Jr, H. Harwell, R. Lessa, F.L. Fredou, H.A. Oxenford, R. Serra, K.T. Shao, R. Sumaila, S.P. Wang, R. Watson & E. Yáñez. 2011a. High value and long life—double jeopardy for tunas and billfishes. *Science*. **333(6040)**:291-292. DOI 10.1126/science.1208730.

Collette, B.B. & C.E. Nauen. 1983. FAO species catalogue. Scombrids of the world. An annotated and illustrated catalogue of tunas, mackerels, bonitos and related species known to date. FAO. Fish. Synop. Pp.90-92.

Corriero, A., S. Desantis, M. Deflorio, F. Acone, C.R. Bridges, J.M. De la Serna, P. Megalofonou & G. De Metrio. 2003. Histological investigation on the ovarian cycle of the bluefin tuna in the western and central Mediterranean. *J. Fish. Biol.* **63(1)**:108-119. DOI 10.1046/j.1095-8649.2003.00132.x.

Corriero, A., S. Karakulak, N. Santamaria, M. Deflorio, D. Spedicato, P. Addis, S. Desantis, F. Cirillo, A. Fenech-Farrugia, R. Vassallo-Agius, J.M. De La Serna, I. Oray, A. Cau & G. De Metrio. 2005. Size and age at sexual maturity of female bluefin tuna (*Thunnus thynnus* L. 1758) from the Mediterranean Sea. *J. Appl. Ichthyol.* **21**:483-486.

Cort, J.L. 1991. Age and growth of the Bluefin tuna, *Thunnus thynnus*(L.) of the Northeast Atlantic. *Col. Vol. Sci. Pap. ICCAT.* **35(2)**:213-230.

Cruz-Castán R, Meiners-Mandujano C, Macías D, Jiménez-Badillo L, Curiel-Ramírez S. 2019. Reproductive biology of little tunny *Euthynnus alletteratus* (Rafinesque, 1810) in the southwest Gulf of Mexico. *PeerJ* **7**:e6558 DOI 10.7717/peerj.6558.

Delesse, M.A. 1847. Procédé mécanique pour déterminer la composition des roches. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris.* **25**:544-545.

Dhurmeea, Z., I. Zudaire, E. Chassot, M. Cedras, N. Nikolic, J. Bourjea, W. West, C. Appadoo & N. Bodin. 2016. Reproductive Biology of Albacore Tuna (*Thunnus alalunga*) in the Western Indian Ocean. *PloS ONE.* **11(12)**:e0168605. DOI 10.1371/journal.pone.0168605.

Diaz, G.A. & S.C. Turner. 2006. Size frequency distribution analysis, age composition, and maturity of western bluefin tuna in the Gulf of Mexico from the U.S. (1981-2005) and Japanese (1975-1981) longline fleets. SCRS 090.

Dominguez-Petit, R., A. Anastasopoulou, L. Cubillos, H.D. Gerritsen, P. Gonçalves, M. Hidalgo, J. Kennedy, M. Korta, G. Marteinsdottir, C. Morgado, M. Muñoz, I. Quincoces, M. Sainza, A. Thorsen & F. Vitale. 2017. Chapter 3: Maturity. In: Dominguez-Petit, R., H. Murua, F. Saborido-Rey & E. Trippel. (ed.). Handbook of applied fisheries reproductive biology for stock assessment and management. Digital CSIC, Vigo, Spain. Pp. 4-47.

Dubois-Dauphin, Q., P. Montagna, G. Siani, E. Douville, C. Wienberg, D. Hebbeln, Z. Liu, N. Kallel, A. Dapoigny, M. Revel, E. Pons-Branchu, M. Taviani & C. Colin. 2017. Hydrological variations of the intermediate water masses of the western Mediterranean Sea

during the past 20 ka inferred from neodymium isotopic composition in foraminifera and cold-water corals. *Clim. Past.* **13**:17-37.

Duron JN, Fromentin JM, Hanke AR, Arrizabalaga H, Damalas D, Tiina V, Quílez-Badia G, Ramirez K, Arregui I, Tserpes G. 2016. Habitat suitability of the Atlantic bluefin tuna by size class: An ecological niche approach. *Progress in Oceanography* **142**:30-46.

FAO. 2018. The State of Mediterranean and Black Sea Fisheries. General Fisheries Commission for the Mediterranean. Rome. 172 pp.

Fautin, D., P. Dalton, L.S. Incze, J.C. Leong, C. Pautzke, A. Rosenberg, P. Sandifer, G. Sedberry, J.W. Tunnell Jr, I. Abbott, R.E. Brainard, M. Broudeur, L.G. Eldredge, M. Feldman, F. Moretzsohn, P.S. Vroom, M. Wainstein & N. Wolff. 2010. An overview of marine biodiversity in United States waters. *PLoS One.* **5(8)**:e11914. DOI 10.1371/journal.pone.0011914.

Fromentin, J.M. 2006. Atún rojo del atlántico. ICCAT. 2006-2016. Manual de ICCAT. Comisión internacional para la conservación del atún Atlántico. In: Publicaciones ICCAT [on line]. Actualizado 2016. (Consultado el 5 de marzo de 2019).

Fromentin, J.M., H. Arrizabalaga, V.R. Restrepo & J. Ortiz de Urbina. 2007. Estimates of total mortality of Eastern Atlantic bluefin tuna based on year-class curves. *Col. Vol. Sci. Pap. ICCAT.* **60(3)**:928-936.

Fromentin, J.M. & J.E. Powers. 2005. Atlantic bluefin tuna: Population dynamics, ecology, fisheries, and management. *Fish. Fish.* **6**:281-306.

Ganias, K., H. Murua, G. Claramunt, R. Domínguez-Petit, P. Gonçalves, F. Juanes, J. Kennedy, N. Klibansky, M. Korta, Y. Kurita, S. Lowerre-Barbieri, G. Macchi, M. Matsuyama, A. Medina, C. Nunes, G. Plaza, R. Rideout, S. Somarakis, A. Thorsen, A. Uriarte & M. Yoneda. 2014. Chapter 4: Egg production. In: Domínguez-Petit, R., H. Murua, F. Saborido-Rey & E. Trippel. (ed.). Handbook of applied fisheries reproductive biology for stock assessment and management. Digital CSIC, Vigo, Spain. Pp. 5-108.

Garcia, A., F. Alemany, J.M. De La Serna, I. Oray, S. Karakulak, L. Rollandi, A. Arigo & S. Mazzola. 2005. Preliminary results of the 2004 bluefin tuna larval surveys off different Mediterranean sites (Balearic Archipelago, Levantine Sea, and the Sicilian Channel).

Col. Vol. Sci. Pap. ICCAT. **58**:1420-1428.

Gardieff, S. 2019. Florida Museum: Discover fishes, *Thunnus thynnus*. <https://www.floridamuseum.ufl.edu/discover-fish/species-profiles/thunnus-thynnus/>. (Consultado el 5 de marzo de 2019).

Heinisch, G., H. Rosenfeld, J.M. Knapp, H. Gordin & M.E. Lutcavage. 2014. Sexual maturity in the western Atlantic bluefin tuna. *Sci. Rep.* **4**, 7205; DOI 10.1038/srep07205.

Hoese, H.D. & R.H. Moore. 1998. Fishes of the Gulf of Mexico-Texas, Louisiana, and adjacent waters. 2nd ed. Texas A&M University Press, College Station, TX, USA. 422 pp.

Hunter, J.R., N.C.H. Lo & R.J.H. Leong. 1985. Batch fecundity in multiple spawning fishes. In: Lasker, R. (ed.). An egg production method for estimating spawning biomass of pelagic fish: Application to the Northern anchovy, *Engraulis mordax*. U.S. Dep. Comm., NOAA Tech. Rep. 36: 67-78.

ICCAT. 2009. Report of the 2008 Atlantic Bluefin Tuna Stock Assessment Session. *Col. Vol. Sci. Pap. ICCAT*. **64(1)**:1-352.

ICCAT. 2017a. Recommendation by ICCAT amending the recommendation 14-04 on Bluefin tuna in the eastern Atlantic and Mediterranean. 36 pp.

ICCAT. 2017b. Recommendation by ICCAT for an interim conservation and management plan for western Atlantic Bluefin tuna. 6 pp.

Ingram Jr, G.W., W.J. Richards, J.T. Lamkin & B. Muhling. 2010. Annual indices of Atlantic bluefin tuna (*Thunnus thynnus*) larvae in the Gulf of Mexico developed using delta lognormal and multivariate models. *Aquat. Living. Resour.* **23**:35-47. DOI 10.1051/alr/2009053.

Introzzi, A.R. & G.D. De Introzzi. 1986. Estudio de las concentraciones de los ácidos nucleicos (RNA, DNA) en músculo blanco e hígado de la lisa (*Mugil brasiliensis*) a lo largo de sus periodos de reposo y maduración gonadal. *Rev. Invest. Des. Pesq.* **6**:117-129.

ITIS (Integrated Taxonomic Information System on-line database). 2019. *Thunnus thynnus*. <http://www.itis.gov/>. (Consultado el 5 de marzo de 2019).

Justel-Rubio, A. & M. Ortiz. 2013. Review and preliminary analyses of size frequency samples of Bluefin tuna (*Thunnus thynnus*) 1952-2010. *Col. Vol. Sci. Pap. ICCAT*. **69(1)**:297-330.

Karakulak, S., I. Oray, A. Corriero, A. Aprea, D. Spedicato, D. Zubani, N.

Santamaria & G. De Metrio. 2004b. First information the reproductive biology of the bluefin tuna (*Thunnus thynnus*) in the Eastern Mediterranean. *Col. Vol. Sci. Pap. ICCAT*. **56**:1158-1162.

Karakulak, S., I. Oray, A. Corriero, M. Deflorio, N. Santamaria, S. Desantis & G. De Metrio. 2004a. Evidence of a spawning area for the bluefin tuna (*Thunnus thynnus* L.) in the eastern Mediterranean. *J. Appl. Ichthyol.* **20(4)**:318-320. DOI 10.1111/j.1439-0426.2004.00561.x.

Knapp, J.M., G. Aranda, A. Medina & M. Lutcavage. 2014. Comparative Assessment of the Reproductive Status of Female Atlantic Bluefin Tuna from the Gulf of Mexico and the Mediterranean Sea. *PLoS ONE* **9(6)**: e98233. DOI 10.1371/journal.pone.0098233.

Koched, W., A. Hattour, F. Alemany, A. Garcia & K. Said. 2013. Spatial distribution of tuna larvae in the Gulf of Gabes (Eastern Mediterranean) in relation with environmental parameters. *Medit. Mar. Sci.* **14**:5-14.

Kumpf, H., K. Steidinger & K. Sherman. 1999. The Gulf of Mexico large marine ecosystem: Assessment, sustainability, and management. Blackwell Science, Inc., Malden, MA, USA. 704 pp.

Kurita, Y. & O.S. Kjesbu. 2009. Fecundity estimation by oocyte packing density formulae in determinate and indeterminate spawners: theoretical considerations and applications. *J. Sea. Res.* **61**:188-196.

Lombardo, F., P. Baiata, A. Oliveri & P. Pignalosa. 2016. Length/weight relationship for Bluefin tuna caught by longliners in central Mediterranean sea. *Col. Vol. Sci. Pap. ICCAT*. **72(7)**:1815-1822.

Lombardo, F., P. Baiata, P. Pignalosa, M. Api, F. Maradonna & O. Carnevali. 2017. An update on the length-weight relationship for Bluefin tuna caught by longliners in the Mediterranean sea. *Col. Vol. Sci. Pap. ICCAT*. **73(7)**:2333-2339.

MacKenzie, B.R. & P. Mariani. 2012. Spawning of Bluefin Tuna in the Black Sea: Historical Evidence, Environmental Constraints and Population Plasticity. *PLoS ONE* **7(7)**: e39998. DOI 10.1371/journal.pone.0039998.

Magnuson, J.J., B.A. Block, R.B. Deriso, J.R. Gold, W.S. Grant, T.J. Quinn, S.B. Saila, L. Shapiro & E.D. Stevens. 1994. An assessment of Atlantic bluefin tuna. National Academies Press, Washington, DC, USA. 166 pp.

Mather, F.J., J.M. Mason Jr & A. Jones. 1995. Historical document: life history and fisheries of Atlantic bluefin tuna. NOAA Technical Memorandum NMFS-SEFSC-370. Miami, USA. 165 pp.

McEachran, J.D. & J.D. Fechhelm. 2005. Fishes of the Gulf of Mexico, Vol. 2., Scorpaeniformes to Tetraodontiformes. University of Texas Press, Austin, TX, USA. 1004 pp.

Medina, A., F.J. Abascal, L. Aragón, G. Mourente, G. Aranda, T. Galaz, A. Belmonte, J.M. De La Serna & S. García. 2007. Influence of sampling gear in assessment of reproductive parameters for bluefin tuna in the western Mediterranean. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **337**:221-230.

Medina, A., F.J. Abascal, C. Megina & A. García. 2002. Stereological assessment of the reproductive status of female Atlantic northern bluefin tuna during migration to Mediterranean spawning grounds through the Strait of Gibraltar. *J. Fish. Biol.* **60**:203-217. DOI 10.1006/jfbi.2001.1835.

Megalofonou, P., C. Yannopoulos, D. Damalas, G. De Metrio, M. Deflorio, J.M. De La Serna & D. Macias. 2005. Incidental catch and estimated discards of pelagic sharks from the swordfish and tuna fisheries in the Mediterranean sea. *Fish. Bull.* **103(4)**:620-634.

Miyake, P.M., J.M. De La Serna, A. Di Natale, A. Farrugia, I. Katavic, N. Miyabe & V. Ticina. 2003. General review of Bluefin tuna farming in the Mediterranean area. *Col. Vol. Sci. Pap. ICCAT.* **55(1)**:114-124.

Morgan, M.J., H. Murua, G. Kraus, Y. Lambert, G. Marteinsdottir, C.T. Marshall, L. O'Brien & J. Tomkiewicz. 2009. The evaluation of reference points and stock productivity in the context of alternative indices of stock reproductive potential. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* **66**:404-414. DOI 10.1139/F09-009.

Muhling, B.A., J.T. Lamkin & M.A. Roffer. 2010. Predicting the occurrence of Atlantic bluefin tuna (*Thunnus thynnus*) larvae in the northern Gulf of Mexico: building a classification model from archival data. *Fish. Oceanogr.* **19**:526-539.

Muhling, B.A., S.K. Lee, J.T. Lamkin & Y. Liu. 2011. Predicting the effects of climate change on bluefin tuna (*Thunnus thynnus*) spawning habitat in the Gulf of Mexico. *ICES. J. Mar. Sci.* **68(6)**:1051-1062.

Murua, H., G. Kraus, F. Saborido-Rey, P.R. Witthames, A. Thorsen & S. Junquera.

2003. Procedures to estimate fecundity of marine fish species in relation to their reproductive strategy. *J. Northw. Atl. Fish. Sci.* **33**:33-54.

Murua, H. & L. Motos. 2006. Reproductive strategy and spawning activity of the European hake *Merluccius merluccius* (L.) in the Bay of Biscay. *J. Fish. Biol.* **69**:1288-1303. DOI 10.1111/j.1095-8649.2006.01169.x.

Mylonas, C.C., F. De La Gándara, A. Corriero & A. Belmonte-Ríos. 2010. Atlantic Bluefin Tuna (*Thunnus Thynnus*) Farming and Fattening in the Mediterranean Sea. *Rev. Fish. Sci.* **18(3)**:266-280. DOI 10.1080/10641262.2010.509520.

Nelson, J.S. 2006. Fishes of the world. 4th ed. John Wiley and sons, New York, NY, USA. 601 pp.

Nemerson, D., S. Berkeley & C. Safina. 2000. Spawning site fidelity in Atlantic bluefin tuna, *Thunnus thynnus*: the use of size-frequency analysis to test for the presence of migrant east Atlantic bluefin tuna on Gulf of Mexico spawning grounds. *Fish. Bull.* **98(1)**:118-126.

Noguez-Fuentes, J.F., M.J. Dreyfus-León & H. Robles-Ruiz. 2007. Análisis de la pesca de atún con palangre en el Golfo de México durante las fases de luna nueva y llena. *Hidrobiológica.* **17(2)**:91-99.

Oey, L.Y. & H.C. Lee. 2002. Deep eddy energy and topographic Rossby waves in the Gulf of Mexico. *J. Phys. Oceanogr.* **32**:3499-3527.

Oray, I.K. & F.S. Karakulak. 2005. Further evidence of spawning of bluefin tuna (*Thunnus thynnus* L., 1758) and the tuna species (*Auxis rochei* Ris., 1810, *Euthynnus alletteratus* Raf., 1810) in the eastern Mediterranean Sea: preliminary results of TUNALEV larval survey in 2004. *J. Appl. Ichthyol.* **21**:236-240.

Ortiz de Urbina, J., J.M. Fromentin, V.R. Restrepo, H. Arrizabalaga & J.M. De La Serna. 2007. Standardized CPUE of Bluefin tuna (*Thunnus thynnus*) caught by spanish traps for the period 1981-2004. *Col. Vol. Sci. Pap. ICCAT.* **60(3)**:913-927.

Ortiz de Urbina, J., E. Rodríguez-Marín, J.M. De La Serna, D. Macías, P. Rioja & S. Saber. 2013. Updated standardized CPUE of Bluefin tuna (*Thunnus thynnus*) caught by spanish traps for the period 1981-2011. *Col. Vol. Sci. Pap. ICCAT.* **69(1)**:287-291.

Ottolenghi, F. 2008. Capture-based aquaculture of Bluefin tuna. In: Lovatelli, A. & P.F.

Holthus. (ed.). Capture-Based aquaculture. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome. Pp. 169-182.

Ramírez-López, K. & A. Abad-Uribarren. 2013. Análisis de la captura incidental del atún aleta azul (*Thunnus thynnus*) por la flota palangrera Mexicana en el Golfo de México, 1994-2011. *Col. Vol. Sci. Pap. ICCAT*. **69(2)**:1046-1056.

Ravier, C. & J.M. Fromentin. 2004. Are the long-term fluctuations in Atlantic bluefin tuna (*Thunnus thynnus*) population related to environmental changes?. *Fish. Oceanogr.* **13(3)**:145-160.

Restrepo, V.R., J.M. Ortiz de Urbina, J.M. Fromentin & H. Arrizabalaga. 2007. Estimates of selectivity for eastern Atlantic bluefin tuna from catch curves. *Col. Vol. Sci. Pap. ICCAT*. **60(3)**:937-948.

Richards, W.J. 1976. Spawning of bluefin tuna (*Thunnus thynnus*) in the Atlantic Ocean and adjacent seas. *Col. Vol. Sci. Pap. ICCAT*. **5**:267-278.

Richardson, D.E., K.E. Marancik, J.R. Guyon, M.E. Lutcavage, B. Galuardi, C.H. Lam, H.J. Walsh, S. Wildes, D.A. Yates & J.A. Hare. 2016. Discovery of a spawning ground reveals diverse migration strategies in Atlantic bluefin tuna (*Thunnus thynnus*). *PNAS*. **113(12)**:3299-3304. DOI 10.1073/pnas.1525636113.

Robinson, A.R., W.G. Leslie, A. Theocharis & A. Lascaratos. 2001. Mediterranean Sea circulation. In: Steele, J.H. (ed.). Encyclopedia of Ocean Sciences, Second edition. Academic Press. Pp.710-725. DOI 10.1016/B978-012374473-9.00376-3.

Rocha, M., A. Arukwe & B. Kapoor. 2008. Fish reproduction. Science Publishers, Enfield, NH, USA. 632 pp.

Rodríguez-Roda, J. 1967. Fecundidad del atún, *Thunnus thynnus* (L.), de la costa sudatlántica de España. *Invest. Pesq.* **31**:33-52.

Rooker, J.R., J.R. Alvarado Bremer, B.A. Block, H. Dewar, G. De Metrio, A. Corriero, R.T. Kraus, E.D. Prince, E. Rodríguez-Marín & D.H. Secor. 2007. Life History and Stock Structure of Atlantic Bluefin Tuna (*Thunnus thynnus*). *Rev. Fish. Sci.* **15**:265-310. DOI 10.1080/10641260701484135.

Rooker, J.R., D.H. Secor, G. De Metrio, R. Schloesser, B.A. Block & J.D. Neilson.

2008. Natal Homing and Connectivity in Atlantic Bluefin Tuna Populations. *Science*. **322**:742-744. DOI 10.1126/science.1161473.

Rosenberg, A., A. Cooper, M. Maunder, M. McAllister, R. Methot, S. Miller, C. Porch, J. Powers, T. Quinn, V. Restrepo, G. Scott, J.C. Seijo, G. Stefansson & J. Walter. 2013. Scientific examination of the western Atlantic bluefin tuna stock-recruit relationships. *Col. Vol. Sci. Pap. ICCAT*. **69(2)**:1016-1045.

Saber, S., D. Macías, J. Ortiz De Urbina & O.S. Kjesbu. 2016. Contrasting batch fecundity estimates of albacore (*Thunnus alalunga*), an indeterminate spawner, by different laboratory techniques. *Fish. Res.* **176**:76-85.

SCRS. 2003. Annual report for the biennial period, 2002-2003. International Commission for the Conservation of Atlantic Tunas. Part 1, Vol. 2. SCRS.

SCRS. 2006. Annual report for the biennial period, 2004-2005. International Commission for the Conservation of Atlantic Tunas. Part, 2, Vol. 2. SCRS.

Sissenwine, M.P., P.M. Mace, J.E. Powers & G.P. Scott. 1998. A Commentary on Western Atlantic Bluefin Tuna Assessments. *T. Am. Fish. Soc.* **127(5)**:838-855. DOI 10.1577/1548-8659(1998)127<0838:ACOWAB>2.0.CO;2.

Solana-Sansores, R. & K. Ramírez-López. 2006. Análisis de la pesquería Mexicana del atún en el Golfo de México, 2004. *Col. Vol. Sci. Pap. ICCAT*. **59(2)**:525-535.

Sterio, D.C. 1984. The unbiased estimation of number and sizes of arbitrary particles using the disector. *J. Microsc.* **134**:127-136.

Stokesbury, M.J.W., R. Cosgrove, A. Boustany, D. Browne, S.L.H. Teo, R.K. O'Dor & B.A. Block. 2007. Results of satellite tagging of Atlantic bluefin tuna, *Thunnus thynnus*, off the coast of Ireland. *Hydrobiologia*. **582**:91-97. DOI 10.1007/s10750-006-0552-y.

Stokesbury, M.J.W., S.L.H. Teo, A. Seitz, R.K. O'Dor & B.A. Block. 2004. Movement of Atlantic bluefin tuna (*Thunnus thynnus*) as determined by satellite tagging experiments initiated off New England. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* **61**:1976-1987.

Susca, V., A. Corriero, C. Bridges & G. Metrio. 2001. Study of the sexual maturity of female bluefin tuna: purification and partial characterization of vitellogenin and its use in an enzyme-linked immunosorbent assay. *J. Fish. Biol.* **58**:815-831.

Susca, V., A. Corriero, M. Deflorio, C.R. Bridges & G. De Metrio. 2001. New results on the reproductive biology of bluefin tuna (*Thunnus thynnus*) in the Mediterranean. *Col. Vol. Sci. Pap. ICCAT*. **52**:745-751.

Taylor, N.G., M.K. McAllister, G.L. Lawson, T. Carruthers & B.A. Block. 2011. Atlantic Bluefin Tuna: A Novel Multistock Spatial Model for Assessing Population Biomass. *PLoS ONE*. **6(12)**: e27693. DOI 10.1371/journal.pone.0027693.

Teo, S.L.H., A. Boustany, H. Dewar, M.J.W. Stokesbury, K.C. Weng, S. Beemer, A.C. Seitz, C.J. Farwell, E.D. Prince & B.A. Block. 2007. Annual migrations, diving behavior, and thermal biology of Atlantic bluefin tuna, *Thunnus thynnus*, on their Gulf of Mexico breeding grounds. *Mar. Biol.* **151**:1-18.

Tsikliras, A.C., K.I. Stergiou & R. Froese. 2013. Editorial note on reproductive biology of fishes. *Acta. Ichthyol. Piscat.* **43(1)**:1-5. DOI 10.3750/AIP2013.43.1.01.

Tunnell, J.W. Jr. 2009. The Gulf of Mexico. In: Earle, S.A. & L.K. Glover. (ed.). *Ocean: An illustrated atlas*. National Geographic Society, Washington, D.C., USA. Pp. 136-137.

UNEP-MAP RAC/SPA 2010. The Mediterranean Sea Biodiversity: state of the ecosystems, pressures, impacts and future priorities. By Bazairi, H., S. Ben Haj, F. Boero, D. Cebrian, S. De Juan, A. Limam, J. Leonart, G. Torchia & C. Rais. Ed. RAC/SPA, Tunis. 100 pp.

Viñas, J. & S. Tudela. 2009. A Validated Methodology for Genetic Identification of Tuna Species (Genus *Thunnus*). *PLoS ONE* **4(10)**: e7606. DOI 10.1371/journal.pone.0007606.

Walli, A., S.L.H. Teo, A. Boustany, C.J. Farwell, T. Williams, H. Dewar, E. Prince & B.A. Block. 2009. Seasonal Movements, Aggregations and Diving Behavior of Atlantic Bluefin Tuna (*Thunnus thynnus*) Revealed with Archival Tags. *PLoS ONE* **4(7)**:e6151. DOI 10.1371/journal.pone.0006151.

Ward, C.H. & J.W. Tunnell Jr. 2017. Habitats and Biota of the Gulf of Mexico: An Overview. In: Ward, C.H. (ed.). *Habitats and biota of the Gulf of Mexico: Before the deepwater horizon oil spill*, Volume 1, Springer Open, USA. Pp. 1-51.

Weibel, E.R. & D.M. Gomez. 1962. Special communications: a principle for counting tissue structures on random sections. *J. Appl. Physiol.* **17**:343-348.

Weibel, E.R., G.S. Kristel & W.F. Scherle. 1966. Practical stereological methods for

morphometric cytology. *J. Cell. Biol.* **30**:23-38.

Wilson, S.G., I.D. Jonsen, R.J. Schallert, J.E. Ganong, M.R. Castleton, A.D. Spares, A.M. Boustany, M.J.W. Stokesbury & B.A. Block. 2015. Tracking the fidelity of Atlantic bluefin tuna released in Canadian waters to the Gulf of Mexico spawning grounds. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* **72**:1700-1717.

Yoskowitz, D., C. Leon, J. Gibeaut, B. Lupher, M. Lopez, C. Santos, G. Sutton & L. McKinney. 2013. Gulf 360: State of the Gulf of Mexico. Harte Research Institute for Gulf of Mexico Studies, Texas A&M University-Corpus Christi, Corpus Christi, TX, USA. 52 pp.

**CAPÍTULO II. NUEVA ÁREA DE PUESTA PARA EL ATÚN ALETA AZUL
DEL ATLÁNTICO (*Thunnus thynnus*): PRIMERA EVIDENCIA
HISTOLÓGICA DE ACTIVIDAD REPRODUCTIVA EN EL SUR DEL
GOLFO DE MÉXICO**

Producto derivado: Artículo científico

Estatus: Publicado

Cruz-Castán R, Saber S, Macías D, Gómez Vives MJ, Galindo-Cortes G, Curiel-Ramirez S, Meiners-Mandujano C. 2019. A possible new spawning area for Atlantic bluefin tuna (*Thunnus thynnus*): the first histologic evidence of reproductive activity in the southern Gulf of Mexico. *PeerJ* 7:e7187 DOI 10.7717/peerj.7187.

RESUMEN

Los estudios acerca de la biología reproductiva del atún aleta azul llevados a cabo en el golfo de México son significativamente más bajos que los realizados en el mar Mediterráneo. Para el stock oriental de atún aleta azul se han documentado cuatro áreas de puesta en el mar Mediterráneo, por lo que resulta viable pensar que exista más de un área de puesta en el golfo de México para el stock occidental. Los individuos estudiados en este trabajo fueron capturados de manera incidental por la flota palangrera mexicana entre enero y abril del 2015. Un total de 63 individuos fueron utilizados, con tallas comprendidas entre 192 y 293 cm L_F (con un promedio de 238 ± 22.52 cm). Las gónadas de 46 individuos (31 hembras y 15 machos) se colectaron para su examinación histológica. Todos los individuos fueron clasificados como maduros; 25 de ellos estuvieron reproductivamente activos (capacitados para la puesta y en puesta). El análisis histológico indica actividad de desove en aguas mexicanas (sur del golfo de México), el cual ocurrió en marzo y abril, cuando se registró una temperatura superficial de $25.57 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0.69$ en marzo y $27.03 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0.69$ en abril. El presente estudio revela la primera evidencia de actividad reproductiva del atún aleta azul en aguas mexicanas y demuestra la existencia de una nueva área de puesta en el golfo de México, que se suma a las dos áreas previamente documentadas para el stock occidental.

Palabras clave: atún aleta azul, sur del golfo de México, área de puesta, histología, reproducción, stock occidental.

ABSTRACT

The number of studies of reproductive biology for Atlantic bluefin tuna carried out in the Gulf of Mexico is significantly lower than those undertaken in the Mediterranean Sea. Four spawning areas have been found for the eastern Atlantic bluefin tuna stock in the Mediterranean Sea, so it is not implausible that there is more than one spawning area in the Gulf of Mexico for the western Atlantic bluefin tuna stock. The individuals used in this study were caught as bycatch by the Mexican surface longline fleet between January and April 2015. A total of 63 individuals ranging between 192 and 293 cm L_F (mean = 238 ± 22.52 cm) were measured. Gonads from 46 fish (31 females and 15 males) were collected for histological examination. All the individuals were classified as mature; 25 were reproductively active (in spawning capable and spawning stages). The histological analysis indicates spawning activity in Mexican waters (the southern Gulf of Mexico). Spawning occurred in March and April, when the sea surface temperature was $25.57 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0.69$ in March and $27.03 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0.69$ in April. The present study provides the first histological evidence of reproductive activity in Mexican waters, and indicates a new spawning area in the Gulf of Mexico.

Keywords: Atlantic bluefin tuna, southern Gulf of Mexico, spawning area, histology, reproduction, western stock.

INTRODUCCIÓN

El atún aleta azul del Atlántico, es un recurso pesquero migratorio, de alta demanda y con gran valor comercial, clasificado como una especie en peligro (Collette & Nauen, 1983; Collette *et al.*, 2011a, 2011b), por lo que investigaciones acerca de su biología reproductiva son indispensables para un correcto manejo de la especie. A pesar de que las primeras regulaciones de la ICCAT se establecieron sobre el stock occidental (desde 1999), el número de estudios reproductivos es significativamente menor que aquellos llevados a cabo para el stock oriental (Susca *et al.*, 2001; Corriero *et al.*, 2003; Aranda *et al.*, 2011; MacKenzie & Mariani, 2012).

Los estudios llevados a cabo para el stock occidental se enfocan principalmente en las aguas de Canadá y la región norte del golfo de México, específicamente en aguas estadounidenses (Heinisch *et al.*, 2014; Knapp *et al.*, 2014), donde se han documentado las áreas de desove de este stock, en el norte del golfo de México y el Slope Sea (Nemerson, Berkely & Safina, 2000; Ingram *et al.*, 2010; Richardson *et al.*, 2016).

Adicionalmente, se ha planteado que el sur del golfo de México, es decir, aguas mexicanas de acuerdo con Ward & Tunnell (2017), podrían representar una potencial área de desove debido a la marcada temporalidad de las capturas incidentales de esta especie, que además corresponden a individuos de gran tamaño, los cuales arriban al sur del golfo de México cuando la temperatura superficial del mar (SST) se ubica dentro de la ventana térmica óptima para llevar a cabo la actividad reproductiva (Abad-Uribarren *et al.*, 2014).

Conocer y delimitar la localización de las áreas de desove es indispensable para un correcto manejo de esta especie. En el mar Mediterráneo se han descrito cuatro áreas de desove para el stock oriental (Karakulak *et al.*, 2004), por lo tanto es bastante probable que exista más de un área de desove en el golfo de México. Hasta ahora no se han realizado estudios que permitan conocer el estatus reproductivo del atún aleta azul del Atlántico al momento de su llegada a aguas mexicanas. El objetivo principal de este trabajo fue, a través de un análisis de frecuencias de tallas y la examinación histológica de las gónadas, determinar el estado reproductivo del atún aleta azul capturado incidentalmente en el sur del golfo de México, su proporción y evolución espacio-temporal como elementos para dilucidar si las aguas mexicanas son escenario de desove para esta especie y por tanto, un área de puesta de nueva descripción para el stock occidental.

MATERIALES Y MÉTODOS

Los individuos de atún aleta azul (*Thunnus thynnus*) utilizados en el presente trabajo fueron capturados de manera incidental en el sur del golfo de México, entre enero y abril del 2015, por la flota palangrera mexicana de atún aleta amarilla (*Thunnus albacares*) basada en Tuxpan, Veracruz; se contó con acceso a muestras de gónadas gracias al apoyo de armadores de la flota, especialmente de la compañía K&B Tuna, así como pescadores y observadores a bordo de las embarcaciones. De acuerdo con los registros de los observadores y pescadores realizados en 2015, no se capturaron individuos de atún aleta azul entre mayo y diciembre. Los observadores a bordo registraron la longitud furcal (L_F) de los individuos capturados. Se realizó un análisis de tallas utilizando Estimadores de Densidad por Kernel (KDE) (Salgado-Ugarte, 2002; Rivera-Velázquez *et al.*, 2010). La ecuación KDE es:

$$f(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x - X_i}{h}\right)$$

Donde $f(x)$ es la densidad estimada de la variable x , n es el número de observaciones, h es la amplitud de banda (intervalo), X_i corresponde a la longitud del i -ésimo espécimen, finalmente K representa la función ponderal Kernel.

Se registraron las coordenadas de captura de todos los individuos utilizados en este estudio (Fig. 1) y se colectaron muestras de tejido de gónada de un subgrupo de estos. Las muestras de gónadas fueron fijadas en líquido de Bouin durante cuatro horas y posteriormente se colocaron en etanol al 70% para su preservación. Una fracción de cada muestra de gónada preservada fueron embebidas en parafina, para ser cortadas en el microtomo a 10 μm con una separación entre cortes de 400 μm , finalmente fueron teñidas con tricrómica de Mallory para su observación al microscopio. La clasificación microscópica utilizada en este estudio se basó en una modificación de los criterios de Schaefer (1998) y Farley *et al.* (2013).

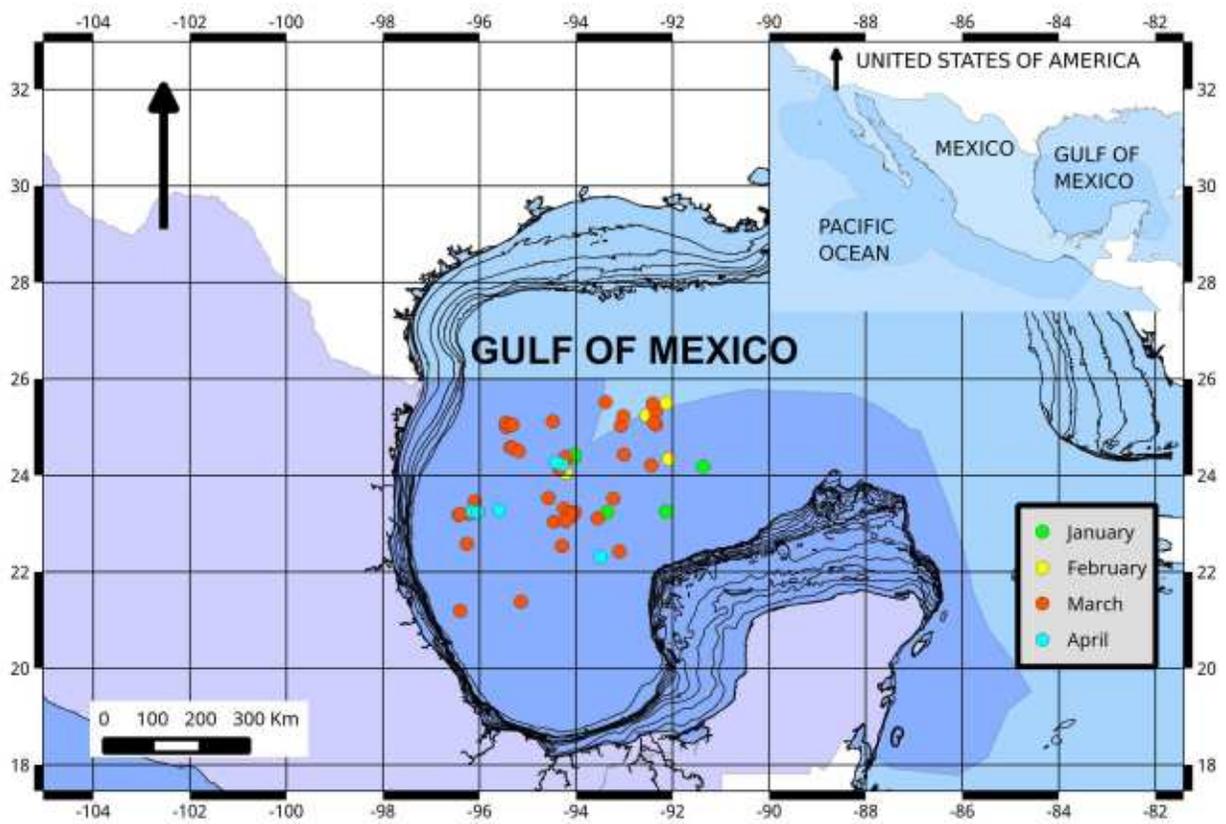


Figura 1. Localización de las áreas de pesca del atún aleta azul del Atlántico capturado por mes (2015) en el sur del golfo de México. La Zona Económica Exclusiva (ZEE) de México se representa con azul oscuro.

En este estudio fueron considerados seis estadios de desarrollo de ovocitos: crecimiento primario (PG), estado lipídico (LS), vitelogénesis temprana (E-Vit), vitelogénesis avanzada (A-Vit), núcleo migratorio (MG) y ovocito hidratado (HY). Para determinar el estado de madurez ovárica de las hembras, se identificó el grupo más avanzado de ovocitos (MAGO) presente en cada ovario, así como la presencia o ausencia de folículos postovulatorios (POFs) y atresias. Las hembras fueron consideradas como maduras si en sus ovarios se observaron ovocitos vitelogénicos, MG o HY, así como atresias. Los ovarios se clasificaron en siete estados de madurez (Tabla 1).

Tabla 1. Clasificación histológica de los estados de madurez gonadal para hembras de atún aleta azul del Atlántico (*Thunnus thynnus*).

Estado de madurez	Actividad	Estado gonadal	MAGO	Características adicionales
Inmaduro	Inactivo	Inmaduro	PG o LS	<ul style="list-style-type: none"> • Ausencia de atresias • Sin POFs
Maduro	Inactivo	En desarrollo	E-Vit	<ul style="list-style-type: none"> • Puede haber atresias • Sin POFs
Maduro	Activo	Capacitado para la puesta	A-Vit	<ul style="list-style-type: none"> • Puede haber atresias • Sin POFs
Maduro	Activo	Puesta	A-Vit	<ul style="list-style-type: none"> • Se observan POFs • Puede haber atresias
Maduro	Activo	Puesta	MG o HY	<ul style="list-style-type: none"> • Puede haber POFs • Puede haber atresias
Maduro	Inactivo	Regresión	LS, E-Vit o A-Vit	<ul style="list-style-type: none"> • Abundante atresia • No hay POFs • Desorganización de la estructura ovárica, con algunos espacios
Maduro	Inactivo	Regeneración	PG o LS	<ul style="list-style-type: none"> • Niveles avanzados de atresia • No hay POFs

Para el caso de los machos, cuatro estadios celulares fueron diferenciados microscópicamente: espermatogonias (SG), espermatocitos (SC), espermátidas (SD) y espermatozoides (SZ). Los testículos fueron clasificados en cinco estados de madurez con base en la abundancia relativa de los cuatro estadios celulares en los cistos, la presencia o ausencia de espermatozoides dentro de los túbulos seminíferos y la cantidad de esperma dentro de los vasos deferentes (Tabla 2).

Los datos de la temperatura superficial del mar (SST) se obtuvieron a partir de la interfaz telemática para la visualización y análisis de datos “Giovanni” (Acker & Leptoukh, 2007) a través de detección remota satelital con una resolución espacial de 4 km. Una serie temporal

mensual con los promedios de SST fue construida a partir de los valores de temperaturas registradas dentro de un polígono regular que incluyó el área de las capturas, con el fin de relacionar la SST promedio con los diferentes estados de madurez reproductiva.

Tabla 2. Clasificación histológica de los estados de madurez gonadal para machos de atún aleta azul del Atlántico (*Thunnus thynnus*).

Estado gonadal	Características principales
Inmaduro (virgen)	<ul style="list-style-type: none"> • Solo SG presente • No esperma en los ductos • Pequeños espacios en el lumen del lóbulo
Espermatogénesis temprana (en desarrollo)	<ul style="list-style-type: none"> • Cistos con SG • Algunos SC y SD • Algunos SZ
Espermatogénesis avanzada (capacitado para la puesta)	<ul style="list-style-type: none"> • Abundante SD • Algunos SZ dentro de los túbulos seminíferos
Puesta	<ul style="list-style-type: none"> • Algunos SD • Muchos SZ • Ductos llenos de esperma
Postpuesta (regresión)	<ul style="list-style-type: none"> • SZ residuales

RESULTADOS

A pesar de que la flota palangrera mexicana de atún aleta amarilla opera durante todo el año, las capturas de atún aleta azul únicamente ocurrieron entre enero y abril. Un total de 63 individuos fueron capturados, cinco en enero (7.93%), ocho en febrero (12.69%), 42 en marzo (66.66%) y ocho en abril (12.69%). Las tallas de estos individuos se ubicaron en un intervalo de 192 a 293 cm L_F , con un promedio de 238 ± 22.52 cm L_F . La estructura de tallas mostró una moda dominante de 235 cm L_F (Fig. 2).

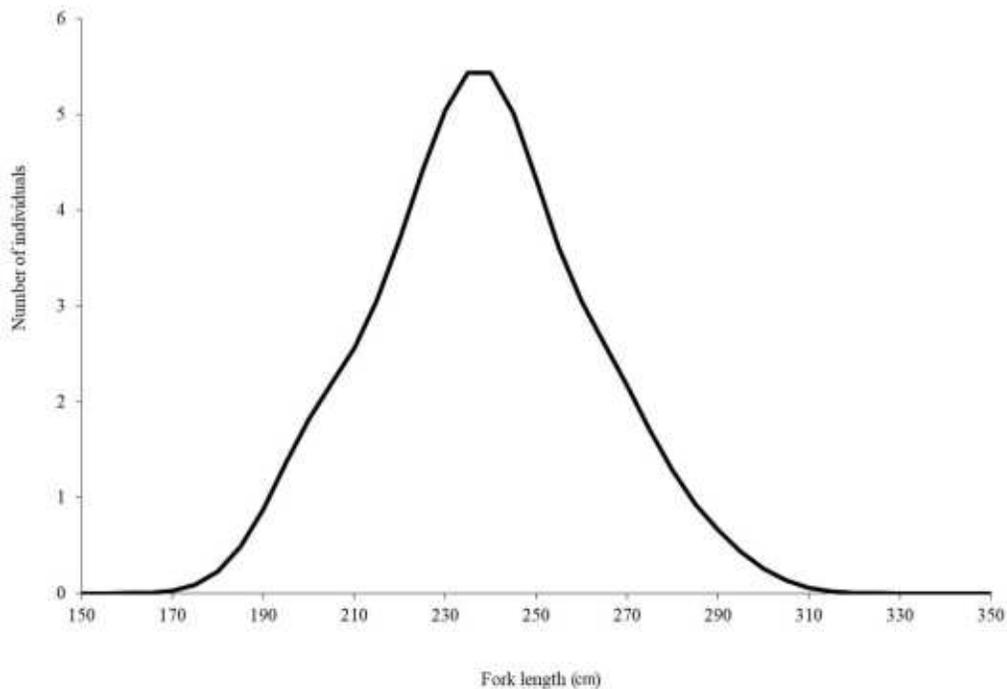


Figura 2. Distribución de tallas del atún aleta azul del Atlántico capturado incidentalmente por la flota palangrera mexicana del golfo de México en 2015 (n = 63).

Las gónadas de 46 individuos, 31 ovarios y 15 testículos, fueron examinadas histológicamente con la finalidad de determinar la progresión temporal de los estados de madurez gonadal (Tabla 3). En el presente estudio, únicamente se registraron individuos maduros. Los cinco estados de madurez observados en los ovarios se muestran en la Fig. 3. Todos los ovarios colectados en enero y febrero (2 y 4, respectivamente) estuvieron en estado de regeneración. En marzo, se observaron seis ovarios (29%) en regeneración, un ovario (5%) en desarrollo, 12 ovarios (57%) capacitados para la puesta y dos ovarios (10%) en regresión. En abril, un ovario (25%) se observó en desarrollo, dos ovarios (50%) capacitados para la puesta y uno (25%) en puesta. No se observaron POFs, el ovario clasificado en puesta presentó ovocitos MG como MAGO.

Tabla 3. Progresión temporal de los estados de madurez gonadal observados en los individuos de atún aleta azul del Atlántico (*Thunnus thynnus*) colectados en 2015. Los meses se dividieron en inicios (I) del día 1 al 10, mediados (M) del día 11 al 20 y finales (F) del día 21 al 31.

Estado gonadal	Meses												Total
	Enero			Febrero			Marzo			Abril			
	I	M	F	I	M	F	I	M	F	I	M	F	
Hembras													
Regeneración		1	1			4	3	1	2				12
Desarrollo									1	1			2
Capacitado para la puesta									12	2			14
Puesta										1			1
Regresión									2				2
Machos													
Espermatogénesis temprana			1				1						2
Espermatogénesis avanzada									5	1			6
Puesta								2	1			1	4
Postpuesta									1	2			3

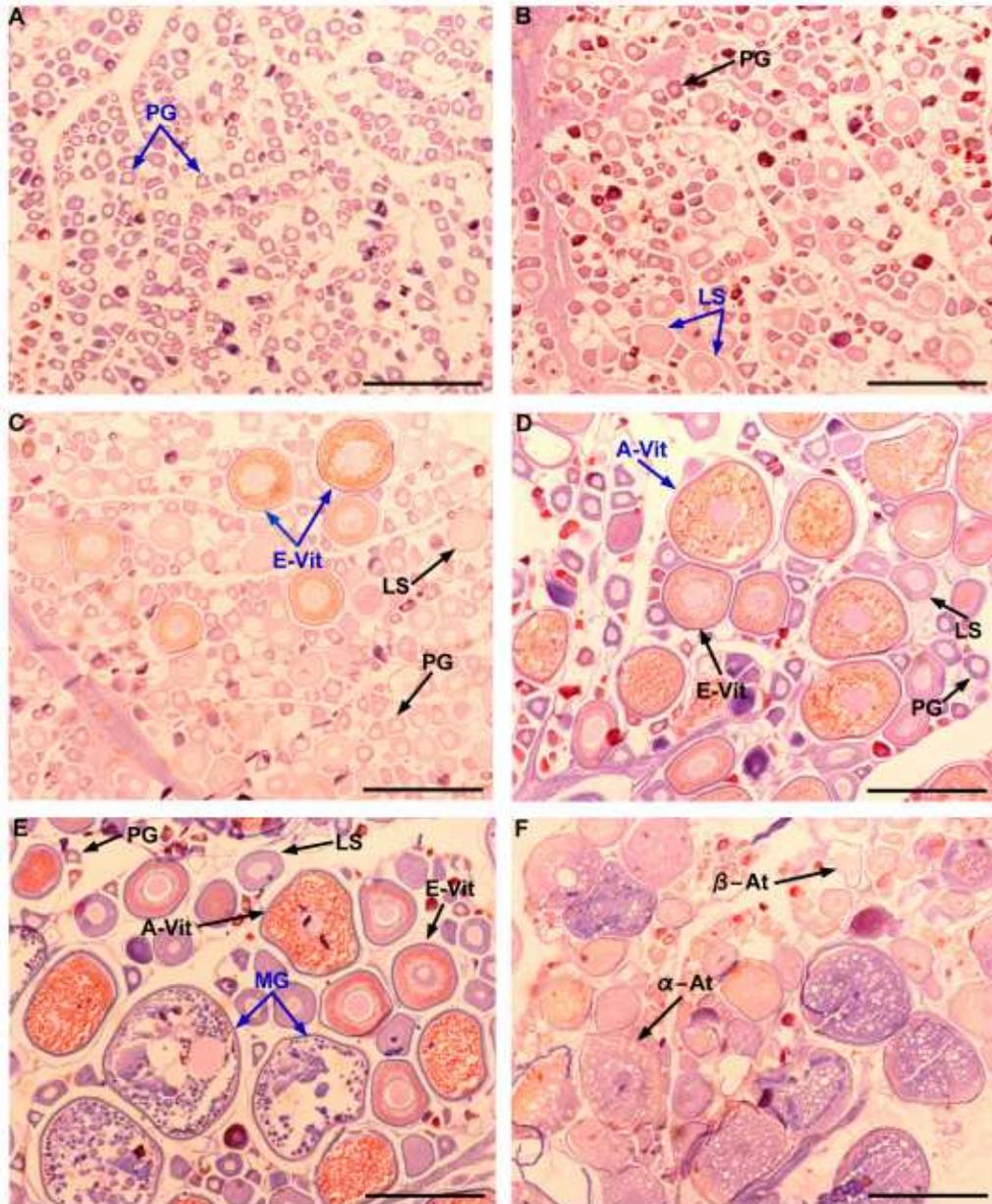


Figura 3. Estados gonadales observados en las hembras de atún aleta azul del Atlántico capturadas en el sur del golfo de México en 2015. Ovario en estado de regeneración (A-B), en desarrollo (C), capacitado para la puesta (D), en puesta (E) y en regresión (F). PG, ovocitos en crecimiento primario; LS, en estado lipídico; E-Vit, vitelogénesis temprana; A-Vit, vitelogénesis avanzada; MG, núcleo migratorio; α -At, alfa atresia; β -At, beta atresia. El MAGO para cada estado gonadal se indica en color azul. Barra de escala = 500 μ m.

Para el caso de los machos, los cuatro estados de madurez gonadal encontrados se muestran en la Fig. 4. Únicamente un macho fue colectado en enero, encontrándose en espermatogénesis temprana. En el mes de febrero no se colectaron testículos. En marzo, un testículo (10%) se observó en espermatogénesis temprana, cinco (50%) en espermatogénesis avanzada, tres (30%) en puesta y uno (10%) en postpuesta. En abril, un testículo (25%) se observó en espermatogénesis avanzada, uno (25%) en puesta y dos (50%) en postpuesta.

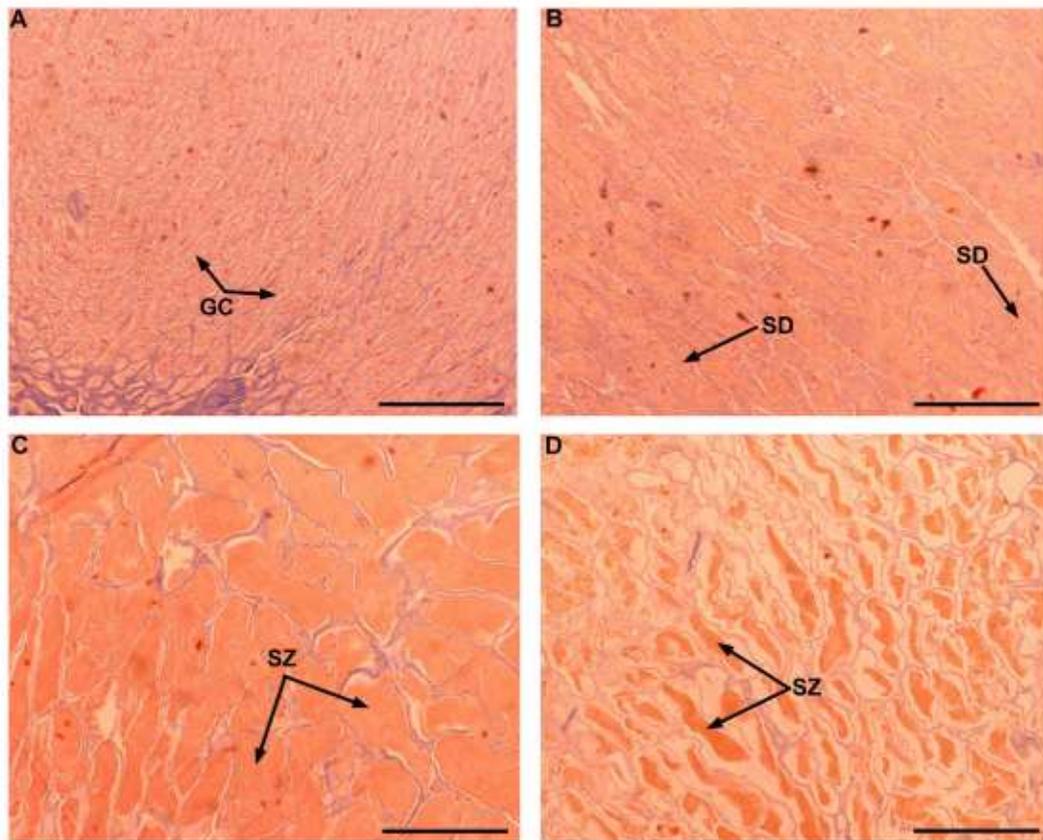


Figura 4. Estados gonadales observados en los machos de atún aleta azul del Atlántico capturados en el sur del golfo de México en 2015. Testículos en espermatogénesis temprana (A), espermatogénesis avanzada (B), en puesta (C) y en postpuesta (D). GC, células germinales; SD, espermatidas; SZ, espermatozoides. Barra de escala = 500 μ m.

Los valores de SST obtenidos en el sur del golfo de México mostraron un ligero incremento entre enero y febrero de $23.04\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.69$ a $23.42\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.69$, en marzo se registró una temperatura de $25.57\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.69$ y finalmente en abril la temperatura incrementó hasta alcanzar los $27.03\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.69$ (Fig. 5).

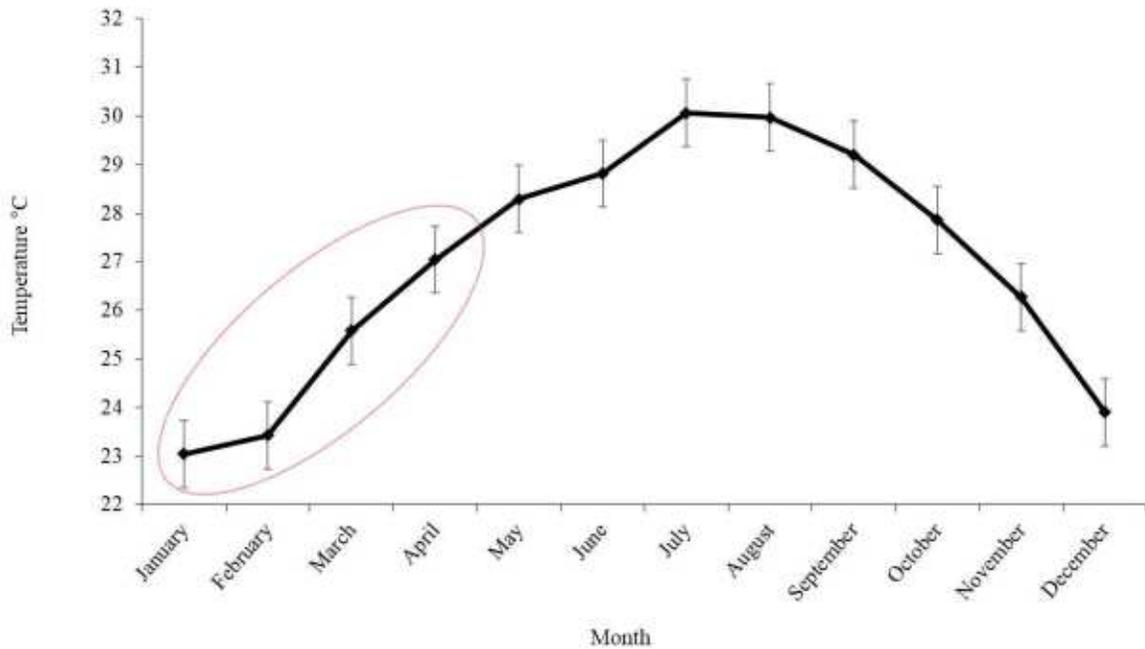


Figura 5. Variación mensual de la temperatura superficial del mar (SST) en el área de operación de la flota palangrera mexicana de atún aleta amarilla durante 2015. La elipse señala la temperatura en los meses que se capturó de manera incidental el atún aleta azul del Atlántico. Las barras de error representan el error estándar (SE).

DISCUSIÓN

Este es el primer estudio que reporta información histológica acerca del estatus reproductivo del atún aleta azul del Atlántico en el sur del golfo de México. En este sentido, se aprecia una marcada temporalidad en las capturas incidentales de esta especie por la flota palangrera mexicana de atún aleta amarilla, coincidiendo con lo previamente reportado por Abad-

Uribarren et al. (2014).

La variación en las capturas registradas (7.9% en enero, 12.7% en febrero, incrementando considerablemente hasta 66.7% en marzo y disminuyendo en abril a 12.7%) sugiere que el atún aleta azul llega de manera gradual a aguas mexicanas en enero y febrero, y registra el mayor número de capturas en marzo, posiblemente debido a un incremento en sus patrones de alimentación mientras se preparan para la puesta, y disminuyendo de forma substancial cuando esta inicia en el mes de abril.

A pesar de que no existen estudios previos describiendo los patrones de alimentación para esta especie en el sur del golfo de México, comportamientos similares han sido previamente reportados para el atún aleta azul del Pacífico (*Thunnus orientalis*) y otros túnidos, observando una marcada disminución en la alimentación y por lo tanto en las capturas cuando la puesta inicia (Rivas, 1954; Chen, Crone & Hsu, 2006).

El periodo reproductivo de los atunes está fuertemente ligado a la temperatura, se considera que ~ 24 °C es la temperatura óptima para comenzar el desove (Schaefer, 1998). La SST media registrada en el presente estudio para la zona de capturas de atún aleta azul en el sur del golfo de México, de 25.57 °C ± 0.69 en marzo y 27.03 °C ± 0.69 en abril, es similar a la previamente reportada para el área de puesta en el norte del golfo de México, donde se encontraron larvas de esta especie entre los 25 y 28 °C (Muhling, Lamkin & Roffer, 2010).

Las tallas de los individuos capturados en este estudio de enero a abril corresponden a individuos adultos sexualmente maduros (Diaz & Turner, 2007). El análisis histológico de las gónadas demostró que el 48% de las hembras y 67% de los machos estuvieron reproductivamente activos. Los machos en puesta se registraron a partir de mediados de marzo, en tanto que los machos en postpuesta con evidencia de SZ residual fueron encontrados a finales de marzo y principios de abril. Para el caso de las hembras, el estado de madurez ovárica más frecuente en marzo corresponde a capacitadas para la puesta, mientras que una hembra en puesta fue registrada en abril, lo cual concuerda con el periodo de puesta reportado previamente para este stock en el norte del golfo de México (Schaefer, 2001; Teo, Boustany & Block, 2007).

A pesar de que históricamente diversos estudios habían definido un periodo de desove de tres meses para el atún aleta azul en ambos stocks, de mayo a julio para el stock oriental y de

abril a junio para el occidental (Richards, 1976; Clay, 1991; Knapp *et al.*, 2014), la reciente incorporación del área de puesta del Slope Sea, con evidencia de actividad reproductiva de junio a julio (Richardson *et al.*, 2016), y los resultados encontrados en la presente investigación, que confirman actividad reproductiva en el sur del golfo de México de marzo a abril, amplían el periodo de desove del stock occidental a cinco meses. Esta amplitud en el periodo de desove y la diferencia temporal en cada una de las áreas de puesta del stock occidental está ligada a una progresión espacio-temporal de la SST óptima para la reproducción, la cual ocurre de forma latitudinal, del sur del golfo de México al Slope Sea (Fig. 6).

Lutcavage *et al.* (1999) expresaron la necesidad de considerar otras posibles áreas de puesta para el stock occidental, discutiendo incluso la posibilidad de que pudiera existir un área de puesta en medio del Atlántico debido a que esta cuenta con características hidrográficas similares al área de puesta del norte del golfo de México; sin embargo, no les fue posible confirmarlo debido a la falta de evidencia histológica.

En el presente estudio, el 54% de los individuos de atún aleta azul del Atlántico analizados histológicamente estaban capacitados para la puesta o en puesta (43.5% y 11%, respectivamente), e incluso el 11% en postpuesta, lo que confirma intensa actividad reproductiva del stock occidental en el sur del golfo de México, en consecuencia, a partir de ahora para el stock occidental quedan delimitadas tres áreas de puesta: el sur del golfo de México, el norte del golfo de México y el Slope Sea (Fig. 7).

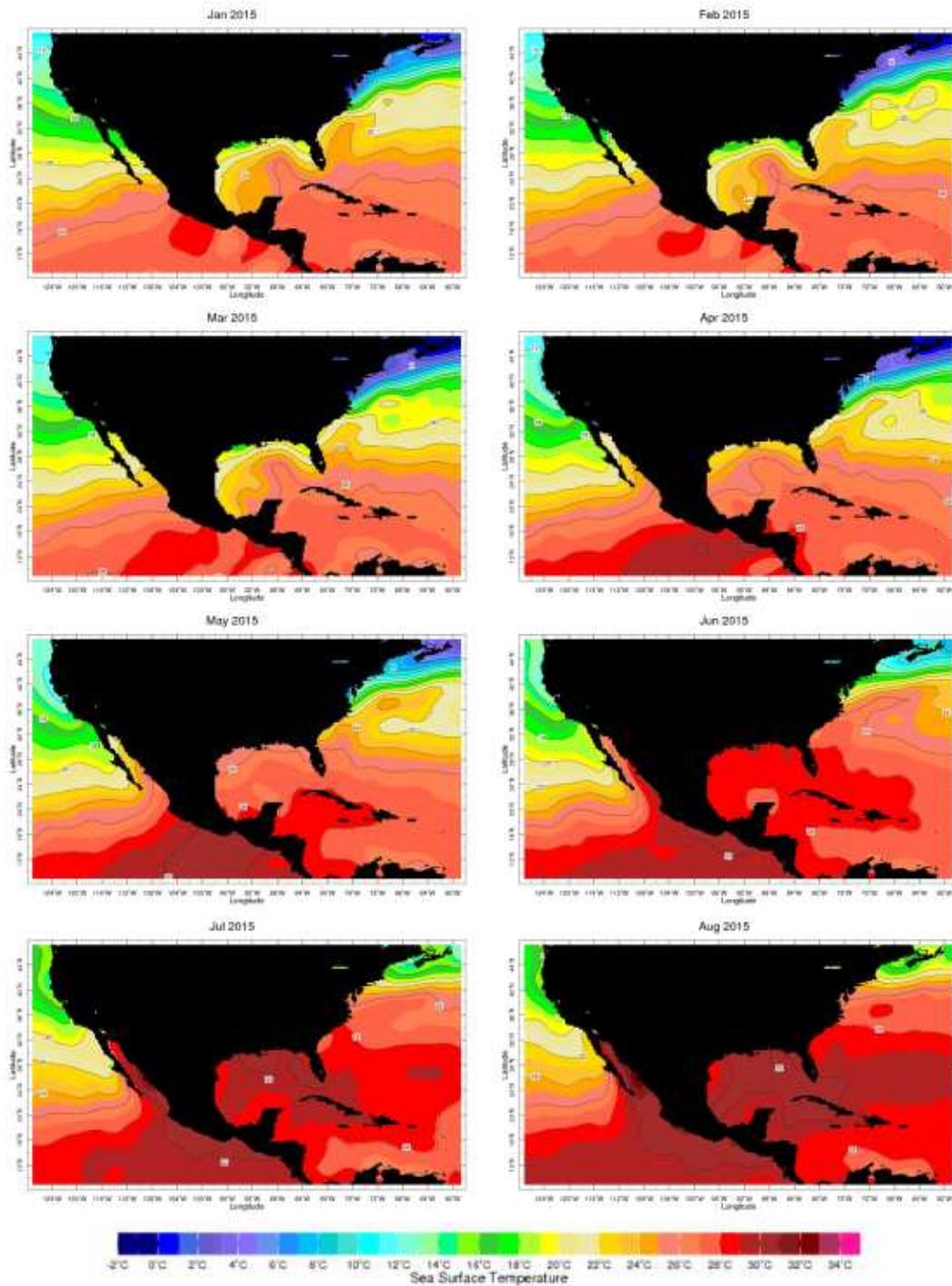


Figura 6. Progresión espacio temporal de la temperatura superficial del mar (SST) en el golfo de México y el océano Atlántico, 2015. *Fuente:* IRI Climate Monitoring Ocean Temperature https://iridl.ldeo.columbia.edu/maproom/Global/Ocean_Temp/Monthly_Temp.html

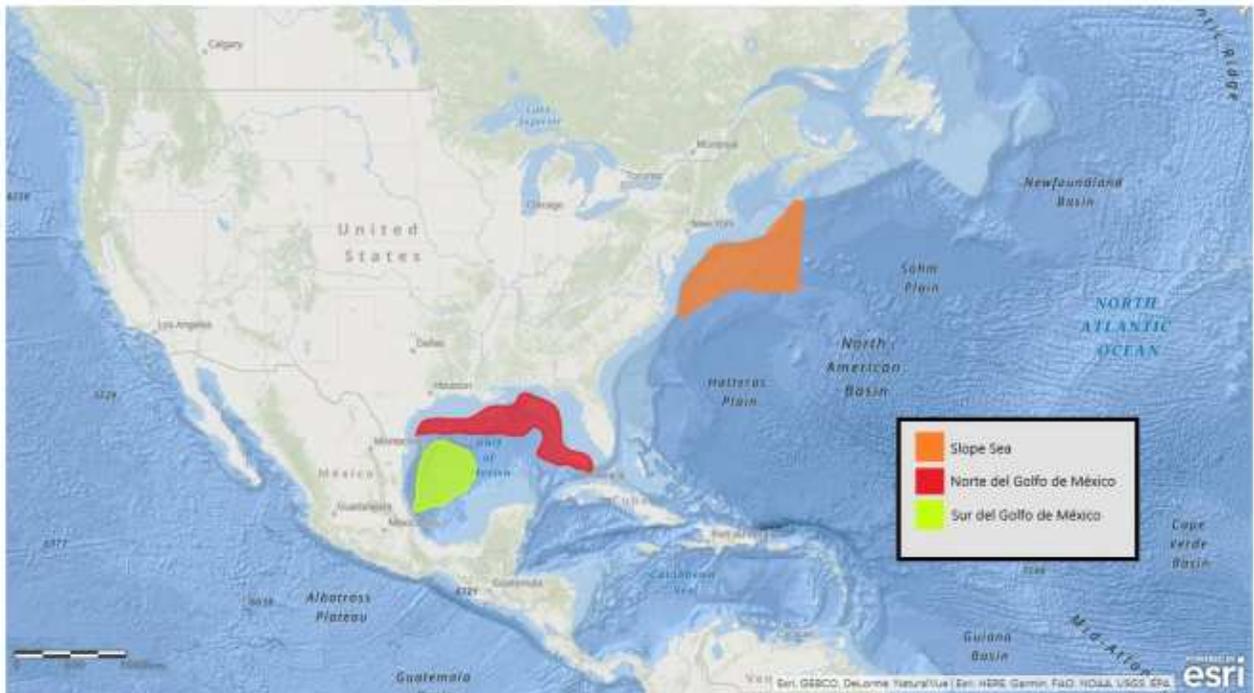


Figura 7. Ubicación de las áreas de puesta conocidas actualmente para el stock occidental de atún aleta azul del Atlántico, en color verde se muestra la nueva área de puesta descubierta en esta investigación.

La existencia de estas tres áreas de puesta, segregadas espacial y temporalmente para el stock occidental, es claramente homóloga al patrón de migración reproductiva en el Mediterráneo para el stock oriental (Karakulak *et al.*, 2004), con la salvedad que el gradiente es latitudinal para el occidental y longitudinal en el oriental, pero en ambos casos controlados por el patrón de calentamiento de las aguas, de sur a norte en el eje golfo de México-Slope Sea y de Levante a Gibraltar en el Mediterráneo. Bajo este escenario, es muy probable que la puesta del stock occidental de atún aleta azul del Atlántico inicia en el sur del golfo de México y conforme se va calentando, la actividad reproductiva se desplaza hacia la parte norte de este, y finalmente en los meses de verano, la puesta concluya en el Slope Sea, al ser el área que alcanza la ventana térmica óptima para la puesta más tardíamente y que se encuentra próxima a las zonas de alimentación (Walli *et al.*, 2009). Poseer un patrón de múltiples puestas parciales en sitios distantes entre sí, a lo largo de un periodo de puesta prolongado, reduce sustancialmente el riesgo de un decaimiento anual de la fuerza de reclutamiento de la progenie.

CONCLUSIONES

Este estudio provee cuatro evidencias que confirman al sur del golfo de México como una nueva área de puesta para el stock occidental de atún aleta azul:

- 1) Existe una marcada ocurrencia temporal de los individuos de atún aleta azul en el sur del golfo de México, consistente con el patrón de migración reproductiva.
- 2) La SST en el área de operación de la flota palangrera mexicana durante los meses que se captura incidentalmente atún aleta azul en el sur del golfo de México, abarca la ventana térmica óptima para que ocurra la actividad reproductiva.
- 3) El tamaño de todos los individuos de atún aleta azul capturados en aguas mexicanas corresponden a adultos sexualmente maduros.
- 4) Se evidenció que existe actividad reproductiva (individuos capacitados para la puesta, en puesta y postpuesta) en esta área entre los meses de marzo y abril; estos meses, que se suman a los previamente reportados en el norte del golfo de México y el Slope Sea, demuestran que el periodo de desove del stock occidental es más amplio de lo que previamente se creía, abarcando cinco meses (de marzo a julio), y es por tanto, mayor que en el stock oriental, donde comprende tres meses (de mayo a julio).

REFERENCIAS

Abad-Uribarren A, Meiners C, Ramírez-López K, Ortega-García S. 2014. Dinámica temporal de la captura incidental de atún aleta azul (*Thunnus thynnus*) y su relación con la variabilidad ambiental en aguas Mexicanas del Golfo de México. *ICCAT Collective Volume of Scientific Papers* **70(2)**:684–698.

Acker JG, Leptoukh G. 2007. Online analysis enhances use of NASA earth science data. *Eos, Transactions American Geophysical Union* **88(2)**:14–17 DOI 10.1029/2007EO020003.

Aranda G, Aragón L, Corriero A, Mylonas CC, De la Gándara F, Belmonte A, Medina A. 2011. GnRHa-induced spawning in cage-reared Atlantic bluefin tuna: an evaluation using stereological quantification of ovarian post-ovulatory follicles. *Aquaculture* **317(1–4)**:255–259 DOI 10.1016/j.aquaculture.2011.04.030.

Chen K-S, Crone P, Hsu C-C. 2006. Reproductive biology of female Pacific bluefin tuna *Thunnus orientalis* from south-western North Pacific Ocean. *Fisheries Science* **72(5)**:985–994 DOI 10.1111/j.1444-2906.2006.01247.x.

Clay D. 1991. Atlantic bluefin tuna (*Thunnus thynnus thynnus* (L.)): a review. *Inter-American Tropical Tuna Commission Special Report* **7**:89–180.

Collette B, Amorim AF, Boustany A, Carpenter KE, De Oliveira Leite N Jr, Di Natale A, Die D, Fox W, Fredou FL, Graves J, VieraHazin FH, Hinton M, Juan Jorda M, Kada O, Minte Vera C, Miyabe N, Nelson R, Oxenford H, Pollard D, Restrepo V, Schratwieser J, Teixeira Lessa RP, Pires Ferreira Travassos PE, Uozumi Y. 2011b. *Thunnus thynnus*. *IUCN Red List of Threatened Species* **2011**:e.T21860A9331546 DOI 10.2305/IUCN.UK.2011-2.RLTS.T21860A9331546.en (accessed 30 October 2018).

Collette BB, Carpenter KE, Polidoro BA, Juan-Jordá MJ, Boustany A, Die DJ, Elfes C, Fox W, Graves J, Harrison LR, McManus R, Minte-Vera CV, Nelson R, Restrepo V, Schratwieser J, Sun C-L, Amorim A, Brick Peres M, Canales C, Cardenas G, Chang S-K, Chiang W-C, De Oliveira Leite N Jr, Harwell H, Lessa R, Fredou FL, Oxenford HA, Serra R, Shao K-T, Sumaila R, Wang S-P, Watson R, Yáñez E. 2011a. High value and long life—double jeopardy for tunas and billfishes. *Science* **333(6040)**:291–292 DOI 10.1126/science.1208730.

Collette BB, Nauen CE. 1983. FAO species catalogue. Scombrids of the world. An annotated and illustrated catalogue of tunas, mackerels, bonitos and related species known to date. Vol. 1. Rome: FAO Fisheries Synopsis, 90–92.

Corriero A, Desantis S, Deflorio M, Acone F, Bridges CR, De la Serna JM, Megalofonou P, De Metrio G. 2003. Histological investigation on the ovarian cycle of the bluefin tuna in the western and central Mediterranean. *Journal of Fish Biology* **63(1)**:108–119 DOI 10.1046/j.1095-8649.2003.00132.x.

Diaz GA, Turner SC. 2007. Size frequency distribution analysis, age composition, and maturity of western Bluefin tuna in the Gulf of Mexico from the U.S. (1981–2005) and Japanese (1975–1981) longline fleets. *ICCAT Collective Volume of Scientific Papers* **60(4)**:1160–1170.

Farley JH, Williams AJ, Hoyle SD, Davies CR, Nicol SJ. 2013. Reproductive dynamics and potential annual fecundity of South Pacific albacore tuna (*Thunnus alalunga*). *PLOS ONE* **8(4)**:e60577 DOI 10.1371/journal.pone.0060577.

Heinisch G, Rosenfeld H, Knapp JM, Gordin H, Lutcavage ME. 2014. Sexual maturity in western Atlantic bluefin tuna. *Scientific Reports* **4(1)**:7205 DOI 10.1038/srep07205.

Ingram GW Jr, Richards WJ, Lamkin JT, Muhling B. 2010. Annual indices of Atlantic bluefin tuna (*Thunnus thynnus*) larvae in the Gulf of Mexico developed using delta-lognormal and multivariate models. *Aquatic Living Resources* **23(1)**:35–47 DOI 10.1051/alr/2009053.

IRI Climate Monitoring Ocean Temperature. 2020. Monthly Sea Surface Temperature https://iridl.ldeo.columbia.edu/maproom/Global/Ocean_Temp/Monthly_Temp.html (consultado el 13 de mayo del 2020).

Karakulak S, Oray I, Corriero A, Deflorio M, Santamaria N, Desantis S, De Metrio G. 2004. Evidence of a spawning area for the bluefin tuna (*Thunnus thynnus* L.) in the eastern Mediterranean. *Journal of Applied Ichthyology* **20(4)**:318–320 DOI 10.1111/j.1439-0426.2004.00561.x.

Knapp JM, Aranda G, Medina A, Lutcavage M. 2014. Comparative assessment of the reproductive status of female Atlantic Bluefin Tuna from the Gulf of Mexico and the Mediterranean sea. *PLOS ONE* **9(6)**:e98233 DOI 10.1371/journal.pone.0098233.

Linnaeus C. 1758. Systema Naturae per regna tria naturae, secundum classes, ordines, genera, species, cum characteribus, differentiis, synonymis, locis. Editio decima, reformata. Vol. 1. Holmiae: Laurentius Salvius, 824. Available at <https://biodiversitylibrary.org/page/726886>.

Lutcavage ME, Brill RW, Skomal GB, Chase BC, Howey PW. 1999. Results of pop-up satellite tagging of spawning size class fish in the Gulf of Maine: do North Atlantic bluefin tuna spawn in the mid-Atlantic? *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* **56(2)**:173–177 DOI 10.1139/f99-016.

Mackenzie BR, Mariani P. 2012. Spawning of Bluefin Tuna in the black sea: historical evidence, environmental constraints and population plasticity. *PLOS ONE* **7(7)**:e39998 DOI 10.1371/journal.pone.0039998.

Muhling BA, Lamkin JT, Roffer MA. 2010. Predicting the occurrence of Atlantic bluefin tuna (*Thunnus thynnus*) larvae in the northern Gulf of Mexico: building a classification model from archival data. *Fisheries Oceanography* **19(6)**:526–539 DOI 10.1111/j.1365-2419.2010.00562.x.

Nemerson D, Berkeley S, Safina C. 2000. Spawning site fidelity in Atlantic bluefin tuna, *Thunnus thynnus*: the use of size-frequency analysis to test for the presence of migrant east Atlantic bluefin tuna on Gulf of Mexico spawning grounds. *Fishery Bulletin* **98(1)**:118–126.

Richards, W.J. 1976. Spawning of bluefin tuna (*Thunnus thynnus*) in the Atlantic Ocean and adjacent seas. *ICCAT Collective Volume of Scientific Papers* **5**:267-278.

Richardson DE, Marancik KE, Guyon JR, Lutcavage ME, Galuardi B, Lam CH, Walsh HJ, Wildes S, Yates DA, Hare JA. 2016. Discovery of a spawning ground reveals diverse migration strategies in Atlantic bluefin tuna (*Thunnus thynnus*). *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **113(12)**:3299–3304 DOI 10.1073/pnas.1525636113.

Rivas LR. 1954. A preliminary report on the spawning of the western North Atlantic bluefin tuna (*Thunnus thynnus*) in the Straits of Florida. *Bulletin of Marine Science-Miami* **4(4)**:302–322.

Rivera-Velázquez G, Salgado-Ugarte I, Soto L, Naranjo E. 2010. Un estudio de caso en el análisis de la distribución de frecuencias de tallas de *Litopenaeus vannamei* (Boone, 1931)

mediante el uso de estimadores de densidad por Kernel. *Latin American Journal of Aquatic Research* **38(2)**:201–209 DOI 10.3856/vol38-issue2-fulltext-4.

Salgado-Ugarte IH. 2002. Suavización no paramétrica para análisis de datos. Mexico: FES Zaragoza-DGAPA UNAM (PAPIIT IN217596, PAPIME 192031), 139. Available at https://www.researchgate.net/publication/257029341_Suavizacion_no_parametrica_para_analisis_de_datos.

Schaefer KM. 1998. Reproductive biology of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) in the eastern Pacific Ocean. *Inter-American Tropical Tuna Commission Bulletin* **21(5)**:205–221.

Schaefer KM. 2001. Reproductive biology of tunas. In: Block BA, Stevens ED, eds. Tunas: Physiology, Ecology, and Evolution. San Diego: Academic Press, 225–270.

Susca V, Corriero A, Deflorio M, Bridges CR, De metrio G. 2001. New results on the reproductive biology of bluefin tuna (*Thunnus thynnus*) in the Mediterranean. *ICCAT Collective Volume of Scientific Papers* **52**:745–751.

Teo SLH, Boustany AM, Block BA. 2007. Oceanographic preferences of Atlantic bluefin tuna, *Thunnus thynnus*, on their Gulf of Mexico breeding grounds. *Marine Biology* **152(5)**:1105–1119 DOI 10.1007/s00227-007-0758-1.

Walli A, Teo SLH, Boustany A, Farwell CJ, Williams T, Dewar H, Prince E, Block BA. 2009. Seasonal Movements, Aggregations and Diving Behavior of Atlantic Bluefin Tuna (*Thunnus thynnus*) Revealed with Archival Tags. *PloS ONE* **4(7)**:e6151 DOI 10.1371/journal.pone.0006151.

Ward CH, Tunnell JW Jr. 2017. Habitats and biota of the Gulf of Mexico: an overview. In: Ward CH, ed. Habitats and Biota of the Gulf of Mexico: Before the Deepwater Horizon Oil Spill. Vol. 1. New York: Springer, 1–54.

**CAPÍTULO III. DINÁMICA OVOCITARIA DEL ATÚN ALETA AZUL
(*Thunnus thynnus*) CAPTURADO EN EL SUR DEL GOLFO DE MÉXICO:
UNA EVALUACIÓN COMPARATIVA CON LA FRACCIÓN DESOVANTE
DEL MEDITERRÁNEO A TRAVÉS DE DOS MÉTODOS
ESTEREOLÓGICOS**

Producto derivado: Artículo científico

Estatus: En proceso

Cruz-Castán R, Saber S, Meiners-Mandujano C, Gómez Vives MJ, Galindo-Cortes G, Curiel-Ramirez S, Macías D. 2020. Oocyte dynamics for Atlantic bluefin tuna (*Thunnus thynnus*) caught in the southern Gulf of Mexico: A comparative assessment with Mediterranean spawners by two stereological methods.

RESUMEN

A pesar de que la mayoría de las investigaciones del stock occidental del atún aleta azul del Atlántico se han enfocado en la zona norte del golfo de México, recientemente se presentó por primera vez evidencia histológica de actividad reproductiva para esta especie en aguas mexicanas (sur del golfo de México). El objetivo principal del presente estudio fue estudiar por primera vez la dinámica del desarrollo de los ovocitos para el atún aleta azul capturado en aguas mexicanas y llevar a cabo una evaluación comparativa con las hembras del Mediterráneo utilizando dos métodos esterológicos. Se analizó comparativamente la estructura de tallas de reproductores de ambos stocks utilizando Estimadores de Densidad por Kernel (KDE), los pesos fueron estimados a través de una función talla-peso preestablecida; el número de ovocitos por gramo de ovario (densidad) en los diferentes estados de madurez gonadal fueron estimados mediante los métodos de Weibel & Gomez (W&G) y “Oocyte Packing Density” (OPD). Las hembras del sur del golfo de México y el Mediterráneo arribaron a sus respectivas áreas de puesta en diferentes meses, sin embargo, ambos componentes de los stocks llegaron reproductivamente inactivos y permanecieron ahí durante periodos de tiempo similares, empezando su actividad reproductiva hasta marzo en el caso de las hembras del sur del golfo de México y hasta mayo para las hembras del Mediterráneo. Aún cuando las hembras del sur del golfo de México mostraron un mayor tamaño que las del Mediterráneo, la somatometría de estas no influye en la densidad de ovocitos producidos. El número de ovocitos por gramo de ovario estimados a través de los métodos de W&G y OPD no difirieron entre stocks en cada de uno de los diferentes estados de madurez gonadal y exhibieron el mismo patrón en la dinámica del desarrollo de los ovocitos.

Palabras clave: atún aleta azul, ovocito, Weibel, OPD, sur del golfo de México, Mediterráneo.

ABSTRACT

Although for western Atlantic bluefin tuna the majority of research have been focused in the northern zone of the Gulf of Mexico, recently the first histological evidence of reproductive activity of this species in Mexican waters (southern Gulf of Mexico) was presented. The aim of this work was to study by first time the oocyte dynamics in Atlantic bluefin tuna caught in Mexican waters and carried out a comparative assessment with Mediterranean spawners using two stereological methods. Size structure of both stocks were comparatively analyzed using Kernel Density Estimators (KDE), while weights were calculated using a length-weight function; the number of oocytes per gram of ovary (oocyte density) at different gonad stages were estimated by Weibel & Gomez (W&G) and Oocyte Packing Density (OPD) methods. Despite southern Gulf of Mexico and Mediterranean females arrived to their respective spawning grounds at different months, they both appeared reproductively inactive and stay in these zones during similar time periods, starting their reproductive activity until March for southern Gulf of Mexico and May for Mediterranean females. Southern Gulf of Mexico females were larger than Mediterranean females, however length and weight of females had no influence over oocyte density production. The number of oocytes per gram of ovary obtained by W&G and OPD methods at different gonad stages were similar between stocks and exhibited the same pattern in oocyte dynamics.

Keywords: Atlantic bluefin tuna, oocyte, Weibel, OPD, southern Gulf of Mexico, Mediterranean.

INTRODUCCIÓN

El atún aleta azul del Atlántico es un importante recurso marino, cuyo esfuerzo pesquero y talla mínima de captura se recomendó limitar por primera vez en 1974 debido a su sobreexplotación (Mather, Mason & Jones, 1995; Fromentin & Powers, 2005; Bjørndal & Brasão, 2006). A pesar de que las cuotas de captura permitidas para el stock occidental son sustancialmente menores respecto al oriental y que en México esta especie se captura incidentalmente (Ramírez-López & Abad-Urribarren, 2013), históricamente se ha sugerido que el stock occidental es más pequeño que el oriental y que su biomasa de individuos desovantes se encuentra en un estado de baja abundancia (Fromentin & Powers, 2005; Rosenberg *et al.*, 2013), por lo que la recuperación del stock occidental estaría fuertemente ligada a la capacidad reproductiva y las tasas de supervivencia del stock oriental, como consecuencia de la conectividad que existe entre ambos stocks (Nemerson, Berkeley & Safina, 2000; Block *et al.*, 2005; Stokesbury *et al.*, 2007; Rooker *et al.*, 2008; Taylor *et al.*, 2011; Wilson *et al.*, 2015; Richardson *et al.*, 2016).

Si bien esta especie se caracteriza por ser altamente migratoria, existe evidencia de fidelidad a sus zonas de desove, para el stock oriental se han documentado cuatro áreas de puesta en el mar Mediterráneo y para el stock occidental, actualmente se han determinado tres, el norte del golfo de México, el Slope Sea y recientemente el sur del golfo de México (Bard, Bach & Josse, 1998; Fromentin & Fonteneau, 2001; Powers & Porch, 2004; Rooker *et al.*, 2007; Rooker *et al.*, 2008; Richardson *et al.*, 2016; Cruz-Castán *et al.*, 2019).

Las investigaciones que abordan aspectos migratorios, reproductivos y de fecundidad en el stock occidental se han enfocado históricamente en un área de puesta, el norte del golfo de México (Baglin, 1982; Scott *et al.*, 1993; Block *et al.*, 1998; Lutcavage *et al.*, 1999; Lutcavage *et al.*, 2000; Nemerson, Berkeley & Safina, 2000; Block *et al.*, 2001; Wilson *et al.*, 2004; Block *et al.*, 2005; Teo *et al.*, 2007; Teo, Boustany & Block, 2007; Rooker *et al.*, 2008; Muhling *et al.*, 2011; Heinisch *et al.*, 2014; Knapp *et al.*, 2014; Rodríguez-Marin *et al.*, 2015), por lo que al no tener información biológica de las otras dos áreas de puesta, la biomasa de individuos desovantes podría estar subestimada para este stock, a diferencia del stock oriental en donde este tipo de investigaciones abarcan el Mediterráneo en su totalidad (Rodríguez-Roda, 1967; Mather, Mason

& Jones, 1995; Ravier & Fromentin, 2001; Susca *et al.*, 2001; Medina *et al.*, 2002; Corriero *et al.*, 2003; Fenech, De La Serna & Ortiz De Urbina, 2003; Carlsson *et al.*, 2004; De la Serna *et al.*, 2004; Karakulak *et al.*, 2004; Storelli *et al.*, 2005; Idrissi & Abid, 2009; Gordo *et al.*, 2009; Alemany *et al.*, 2010; Idrissi & Abid, 2011; Abid *et al.*, 2013; Gordo, Sanz & Viñas, 2015).

Adicionalmente, el hallazgo de la nueva área de puesta en el sur del golfo de México, basado en evidencias histológicas, demuestra la similitud con la dinámica de puesta de esta especie en ambos mares mediterráneos, el americano y el euroasiático-africano, con más de un área focal de desove determinadas temporalmente por la progresión de la isoterma de los ~24 °C, latitudinalmente en el golfo de México y longitudinalmente en el Mediterráneo. En este sentido, entender la biología reproductiva de ambos stocks considerando todas las áreas de puesta conocidas es indispensable para una correcta evaluación, manejo y conservación de la especie (Murua & Motos, 2006; Morgan *et al.*, 2009; Dhurmeea *et al.*, 2016).

La densidad de ovocitos (ovocitos por gramo de ovario), es un parámetro biológico de interés para las investigaciones pesqueras, ya que a partir de este se puede estimar la fecundidad, un aspecto fundamental de la dinámica de poblaciones (Hunter *et al.*, 1992). En la actualidad, existen diversos métodos que pueden aplicarse para estimar este parámetro, cuya elección depende generalmente de los recursos disponibles (Murua *et al.*, 2003; Saber *et al.*, 2016). En especies con una estrategia reproductiva indeterminada, comúnmente se utiliza el método de conteo de ovocitos hidratados desarrollado por Hunter, Lo & Leong (1985), en el caso de los túnidos, este tipo de ovocitos rara vez se observa en los individuos capturados, por lo que posteriormente se han incluido en el conteo los ovocitos con núcleo migratorio, que son más comunes de observar (Hunter *et al.*, 1992; Schaefer, 1996).

Si bien este método es ampliamente utilizado gracias a su simplicidad y al poco equipo especializado requerido (estereoscopio), se limita a la estimación de la fecundidad. Por el contrario, los métodos histológicos, a pesar de requerir mayor tiempo y recursos, así como técnicas de laboratorio más especializadas, adicionalmente, hacen posible distinguir adecuadamente los diferentes estadios de los ovocitos, la presencia de folículos postovulatorios y atresias, lo que garantiza una inequívoca caracterización de los diferentes estados gonadales de los individuos (Saber *et al.*, 2016), permitiendo determinar con mayor precisión la variación

temporal y dinámica ovocitaria en cada una de las fases reproductivas, información que resulta de utilidad para obtener resultados más precisos acerca de la biología reproductiva de las especies (Hunter & Macewicz, 1985; Macchi & Barrera-Oro, 1995; Saber *et al.*, 2015a; Milton *et al.*, 2017).

El objetivo de este trabajo consiste en caracterizar por primera vez el desarrollo y la producción de ovocitos del atún aleta azul capturado en aguas mexicanas del golfo de México y compararla con la fracción desovante del mar Mediterráneo, con la finalidad de determinar el grado de similitud entre ambos stocks, bajo dos diferentes métodos estereológicos, el método de Weibel & Gomez (1962) y el método “Oocyte Packing Density” desarrollado por Kurita & Kjesbu (2009), para minimizar la variabilidad metodológica como posible fuente de sesgo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Muestreo

Se colectaron ovarios de hembras de atún aleta azul capturadas incidentalmente en el sur del golfo de México entre enero y abril del 2015, con el apoyo de armadores de la flota palangrera mexicana basada en Tuxpan, Veracruz, especialmente de la compañía K&B Tuna, así como pescadores y observadores a bordo de las embarcaciones. Paralelamente, se contó con acceso a muestras de ovarios pertenecientes a hembras que en el Mediterráneo fueron capturadas estacionalmente y de manera dirigida por palangre y almadrabas entre marzo y julio del 2010, 2014, 2015 y 2016, como parte del proyecto de pelágicos mayores del Instituto Español de Oceanografía.

Registro de tallas y estimaciones de peso

Las tallas de las hembras capturadas (longitud furcal, L_F) fueron registradas por los observadores a bordo y pescadores de la flota atunera mexicana. El peso fue estimado a partir de una función talla-peso y los factores de conversión correspondientes a cada stock, de acuerdo con lo reportado por Rodríguez-Marin et al. (2015), ya que no fue posible registrar el peso al momento de la captura, la función utilizada fue:

$$RWT = \alpha \cdot (L_F)^\beta$$

Donde RWT es el peso total individual antes de cualquier procesamiento; L_F es la longitud furcal; α y β son los coeficientes de forma y de alometría respectivamente, $\alpha = 1.77054 \times 10^{-5}$ y $\beta = 3.001252$ para las hembras del sur del golfo de México (stock occidental), $\alpha = 3.50801 \times 10^{-5}$ y $\beta = 2.878451$ para las hembras del Mediterráneo (stock oriental).

Análisis de tallas

Se realizó un análisis comparativo de tallas entre los stocks desovantes utilizando Estimadores de Densidad por Kernel (KDE) (Salgado-Ugarte, 2002; Rivera-Velázquez *et al.*, 2010). La ecuación KDE es:

$$f(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x - X_i}{h}\right)$$

Donde $f(x)$ es la densidad estimada de la variable x , n es el número de observaciones, h es la amplitud de banda (intervalo), X_i corresponde a la longitud del i -ésimo espécimen, finalmente K representa la función ponderal Kernel.

Tinción y clasificación histológica

Las muestras de gónadas fueron fijadas en líquido de Bouin durante cuatro horas y posteriormente se colocaron en etanol al 70% para su preservación. Una fracción de cada muestra de gónada preservada fue embebida en parafina, para posteriormente cortar en el microtomo 10 secciones transversales con 10 μm de grosor cada una, estableciendo una separación de 400 μm entre cortes, finalmente fueron teñidas con tricrómica de Mallory para su observación al microscopio con una magnificación x4.

La clasificación microscópica utilizada en este estudio se basó en una modificación de los criterios de Schaefer (1998) y Farley et al. (2013). Se consideraron seis estadios de desarrollo de ovocitos: crecimiento primario (PG), estado lipídico (LS), vitelogénesis temprana (E-Vit), vitelogénesis avanzada (A-Vit), núcleo migratorio (MG) y ovocito hidratado (HY). Para determinar el estado de madurez ovárica de las hembras, se identificó el grupo más avanzado de ovocitos (MAGO) presente en cada ovario, así como la presencia o ausencia de folículos postovulatorios (POFs) y atresias. Las hembras fueron consideradas como maduras si en sus ovarios se observaron ovocitos vitelogénicos, MG o HY, así como atresias. Los ovarios se clasificaron en siete estados de madurez (Tabla 1).

La intensidad relativa de atresias, es decir el número de atresias en relación con el número total de ovocitos vitelogénicos expresado en porcentaje, fue estimado para cada ovario utilizando diez micrografías (una por cada sección transversal cortada). Seis niveles de atresia en estado alfa (α -Atresia) fueron determinados: ausente (0%), mínimo ($\leq 10\%$), bajo (11-30%), considerable (31-50%), mayor ($> 50\%$) y completo (100%). Los estados avanzados de atresia (β -Atresia) fueron referidos como presentes o ausentes.

Tabla 1. Clasificación histológica de los estados de madurez gonadal para hembras de atún aleta azul del Atlántico (*Thunnus thynnus*).

Estado de madurez	Actividad	Estado gonadal	MAGO	Características adicionales
Inmaduro	Inactivo	Inmaduro	PG o LS	<ul style="list-style-type: none"> • Ausencia de atresias • Sin POFs
Maduro	Inactivo	En desarrollo	E-Vit	<ul style="list-style-type: none"> • Puede haber atresias • Sin POFs
Maduro	Activo	Capacitado para la puesta	A-Vit	<ul style="list-style-type: none"> • Puede haber atresias • Sin POFs
Maduro	Activo	Puesta	A-Vit	<ul style="list-style-type: none"> • Se observan POFs • Puede haber atresias
Maduro	Activo	Puesta	MG o HY	<ul style="list-style-type: none"> • Puede haber POFs • Puede haber atresias
Maduro	Inactivo	Regresión	LS, E-Vit o A-Vit	<ul style="list-style-type: none"> • Abundante atresia • No hay POFs • Desorganización de la estructura ovárica, con algunos espacios
Maduro	Inactivo	Regeneración	PG o LS	<ul style="list-style-type: none"> • Niveles avanzados de atresia • No hay POFs

Método estereológico de Weibel & Gomez (1962)

El método de Weibel & Gomez (W&G) y su modificación presentada en Weibel, Kristel & Scherle (1966) permite estimar la densidad numérica de cada tipo de ovocito por unidad de volumen (N_V). El método W&G se sustenta en el principio de Delesse (Delesse, 1847) citado por Emerson, Greer Walker & Witthames (1990), el cual establece que la fracción de volumen (V_i) de un componente “i” en un tejido es proporcional a la fracción de área de su sección transversal (A_i). La fórmula de W&G se define como:

$$N_v = \frac{k}{\beta} \cdot \frac{N_a^{3/2}}{V_i^{1/2}}$$

Donde k representa el coeficiente de distribución de tamaño de los ovocitos, β es el coeficiente de forma de los ovocitos, N_a es el número promedio de ovocitos por unidad de área y V_i el promedio de la fracción de volumen ocupada por los ovocitos. En este estudio, el método de W&G fue utilizado para estimar la densidad de todos los estadios de ovocitos presentes en cada uno de los estados gonadales. Los parámetros k y β fueron estimados de acuerdo con el método descrito por Emerson, Greer Walker & Witthames (1990) y la función de Weibel & Gomez (1962) respectivamente; para estas estimaciones fueron medidos 10 ovocitos de cada uno de los estadios de desarrollo a partir de las 10 micrografías obtenidas para cada ovario, utilizando el programa ImageJ (<http://rsb.info.nih.gov/ij>) y el complemento ObjectJ (<http://simon.bio.uva.nl/objectj/>).

Diez micrografías fueron usadas para estimar los valores de V_i y N_a (Coward & Bromage, 2002; Medina *et al.*, 2007; Knapp *et al.*, 2014). De acuerdo con el método presentado por Saber *et al.* (2016), las estimaciones de V_i fueron llevadas a cabo mediante una rejilla de Weibel compuesta por 128 líneas de 107.9 μm (256 puntos) contenidas en un marco con un área de 2.578 mm^2 , sobrepuesta a cada una de las diez micrografías utilizando nuevamente el programa ImageJ. El valor paramétrico de N_a fue estimado cuantificando el número de ovocitos localizados por completo dentro del marco y aquellos en contacto con los bordes superior y derecho.

Método estereológico “Oocyte Packing Density”

El método “Oocyte Packing Density” (OPD) permite conocer el número de ovocitos por gramo de ovario, para este estudio la ecuación de Kurita & Kjesbu (2009) fue utilizada para cada tipo de ovocito:

$$\log(OPD_i) = \log\left[V_i \cdot \frac{1}{\rho_o} \cdot \left(\frac{1+k}{8 \cdot k}\right)^3\right] + 12.28 - 3 \cdot \log(cOD_v)$$

Donde OPD_i representa el número de ovocitos por gramo de ovario, V_i es la fracción de volumen ocupada por los ovocitos, ρ_o la densidad del ovario, k es el factor de forma (la razón

entre el diámetro mayor y menor para cada estadio de desarrollo de los ovocitos), cOD_{Vi} es el volumen basado en el diámetro promedio para cada estadio de desarrollo, donde el diámetro individual de los ovocitos fue corregido tras considerar la contracción que estos sufren durante el proceso histológico (Saber *et al.*, 2015b). Las estimaciones de la fracción de volumen obtenidas mediante el método de W&G fueron también utilizadas en OPD.

Con la finalidad de comparar los resultados entre las dos técnicas, se estandarizaron las unidades de densidad de ambos métodos; debido a que el método de W&G estima la densidad de ovocitos basada en volumen, el volumen de un gramo de ovario fue calculado utilizando la ecuación de Medina *et al.* (2007) y considerando la pérdida de volumen promedio en la gónada de 12.4% reportada por Saber *et al.* (2016), obteniendo así un volumen de 0.8036 cm³ por gramo de ovario, finalmente este valor fue multiplicado por N_v para obtener una densidad de ovocitos basada en masa (ovocitos por gramo de ovario), como en el método OPD.

RESULTADOS

En el sur del golfo de México se analizaron 31 hembras de atún aleta azul, dos capturadas en enero (6.45%), cuatro en febrero (12.90%), 21 en marzo (67.74%) y cuatro en abril (12.90%). Para el caso del Mediterráneo, se tuvo acceso a un total de 33 hembras que fueron capturadas estacionalmente entre marzo y julio, seis en marzo (18.18%), 17 en mayo (51.51%), tres en junio (9.09%) y siete en julio (21.21%).

Las hembras del sur del golfo de México registraron una longitud promedio de 234.96 cm L_F (\pm 18.01 cm) y un peso promedio de 235.19 kg (\pm 53.23 kg), las hembras del Mediterráneo registraron una longitud promedio de 175.84 cm L_F (\pm 38.75 cm) y un peso promedio de 114.51 kg (\pm 63.06 kg). Los detalles de los valores de talla y peso registrados para ambos stocks se muestran en la Tabla 2, la Fig. 1 muestra la relación talla-peso de todos los individuos por stock. En el caso de las hembras del sur del golfo de México, la estructura de tallas fue unimodal, simétrica y sesgada hacia individuos grandes de 238 cm L_F , en contraste, para las hembras del Mediterráneo la distribución fue más amplia, sesgada hacia tallas no tan grandes y claramente bimodal en los 132 y 208 cm L_F respectivamente (Fig. 2).

Tabla 2. Descriptores generales de talla y peso para el atún aleta azul del Atlántico capturado en el sur del golfo de México y el mar Mediterráneo.

Stock	Núm. de individuos	L_F promedio \pm SD (cm)	Peso promedio \pm SD (kg)	Rango de longitud (cm)	Rango de peso (kg)
Sur del Golfo de México	31	234.96 \pm 18.01	235.19 \pm 53.23	200.00 – 270.00	142.58 – 350.94
Mediterráneo	33	175.84 \pm 38.75	114.51 \pm 63.06	118.00 – 228.00	32.27 – 214.91

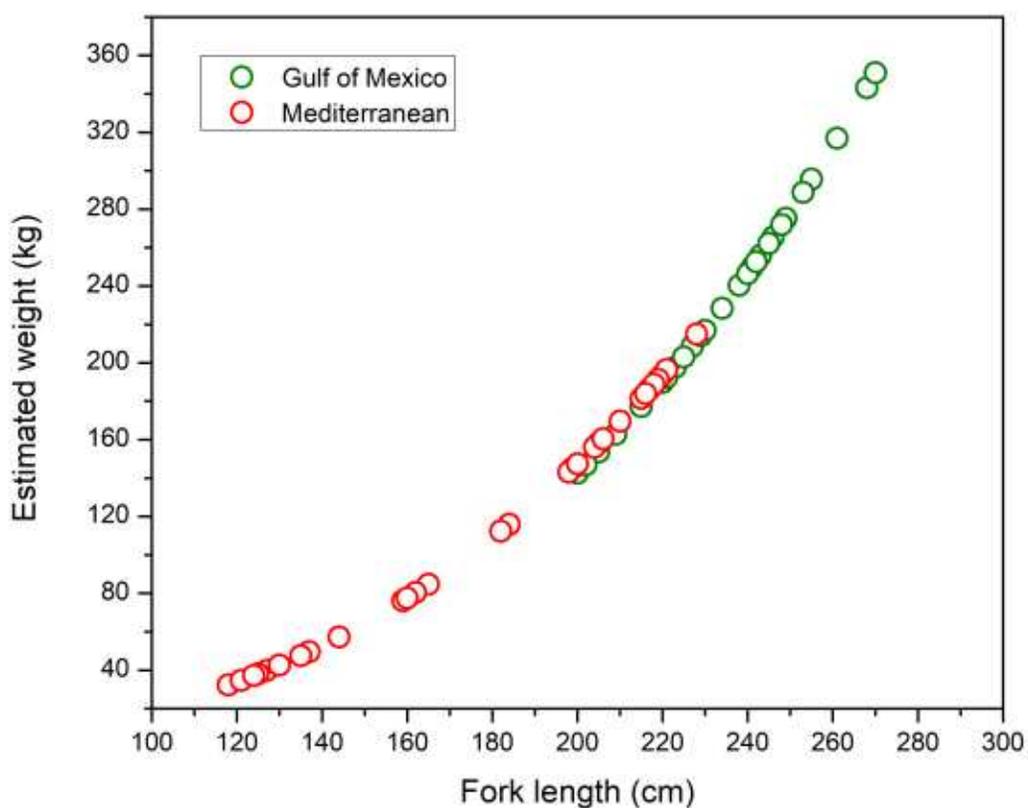


Figura 1. Relación talla-peso individual para las hembras de atún aleta azul del Atlántico capturadas en el sur del golfo de México y el Mediterráneo.

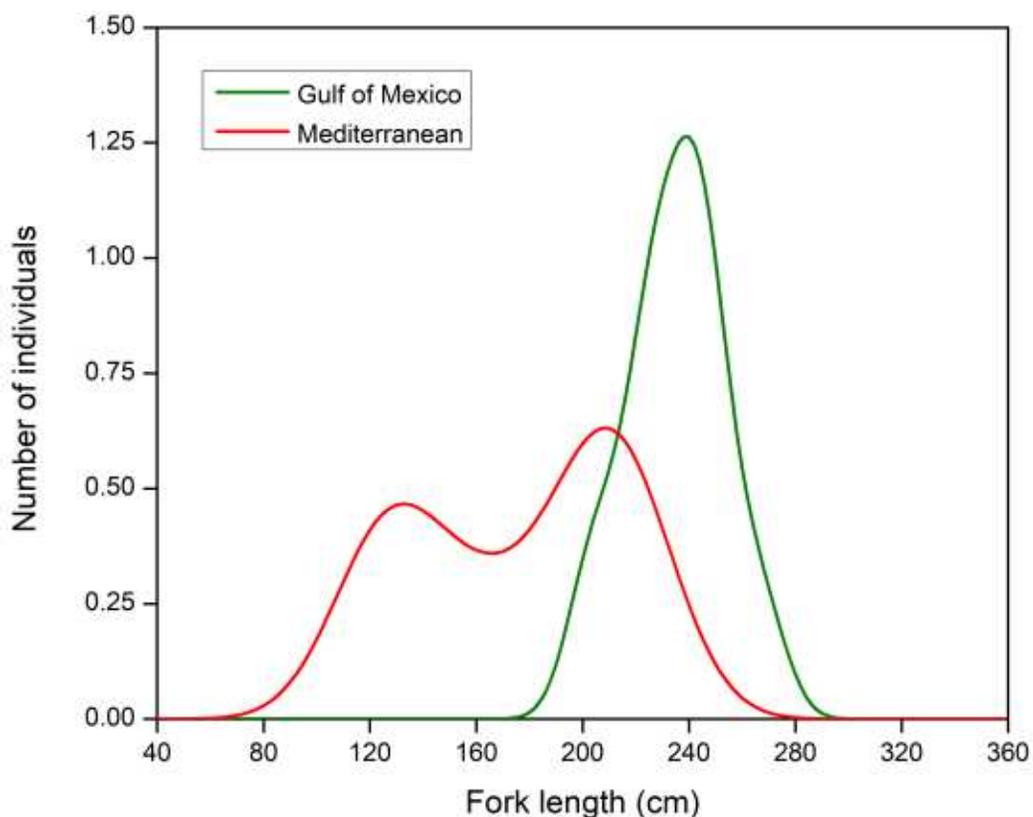


Figura 2. Distribución de tallas a través de Estimadores de Densidad por Kernel (KDE) para las hembras de atún aleta azul del Atlántico capturadas en el sur del golfo de México ($n = 31$) y el mar Mediterráneo ($n = 33$).

La clasificación y progresión temporal de los estados de madurez determinados histológicamente para las 31 gónadas de las hembras capturadas en el sur del golfo de México y las 33 del Mediterráneo se presentan en la Tabla 3 y Tabla 4 respectivamente; la totalidad de las muestras analizadas correspondieron a hembras maduras. Los seis estados de madurez gonadal observados para ambos grupos de muestras se presentan en la Fig. 3.

Para las hembras del sur del golfo de México, todos los ovarios colectados en enero y febrero (dos y cuatro, respectivamente) se encontraron en estado de regeneración. En marzo, seis ovarios (29%) se observaron también en estado de regeneración, un ovario (5%) se encontró en

desarrollo, 12 ovarios (57%) como capacitados para la puesta y dos (10%) se observaron en regresión. En abril, un ovario (25%) se encontró en desarrollo, dos ovarios (50%) capacitados para la puesta y uno (25%) en puesta, en este último no se observaron POFs, sin embargo, fue clasificado en puesta debido a que presentaba ovocitos MG como MAGO.

Tabla 3. Progresión temporal de los estados de madurez gonadal observados en las hembras de atún aleta azul del Atlántico capturadas en el sur del golfo de México. Los meses se dividieron en inicios (I) del día 1 al 10, mediados (M) del día 11 al 20 y finales (F) del día 21 al 31.

Estado gonadal	Meses												Total	
	Enero			Febrero			Marzo			Abril				
	I	M	F	I	M	F	I	M	F	I	M	F		
Regeneración		1	1			4	3	1	2					12
Desarrollo									1	1				2
Capacitado para la puesta									12	2				14
Puesta											1			1
Regresión									2					2

Tabla 4. Progresión temporal de los estados de madurez gonadal observados en las hembras de atún aleta azul del Atlántico capturadas en el mar Mediterráneo. Los meses se dividieron en inicios (I) del día 1 al 10, mediados (M) del día 11 al 20 y finales (F) del día 21 al 31.

Estado gonadal	Meses												Total	
	Marzo			Mayo			Junio			Julio				
	I	M	F	I	M	F	I	M	F	I	M	F		
Regeneración	2	4		1										7
Desarrollo				5	4	2	1							12
Capacitado para la puesta					2	2					1	2		7
Puesta									2	1	1			4
Regresión						1						2		3

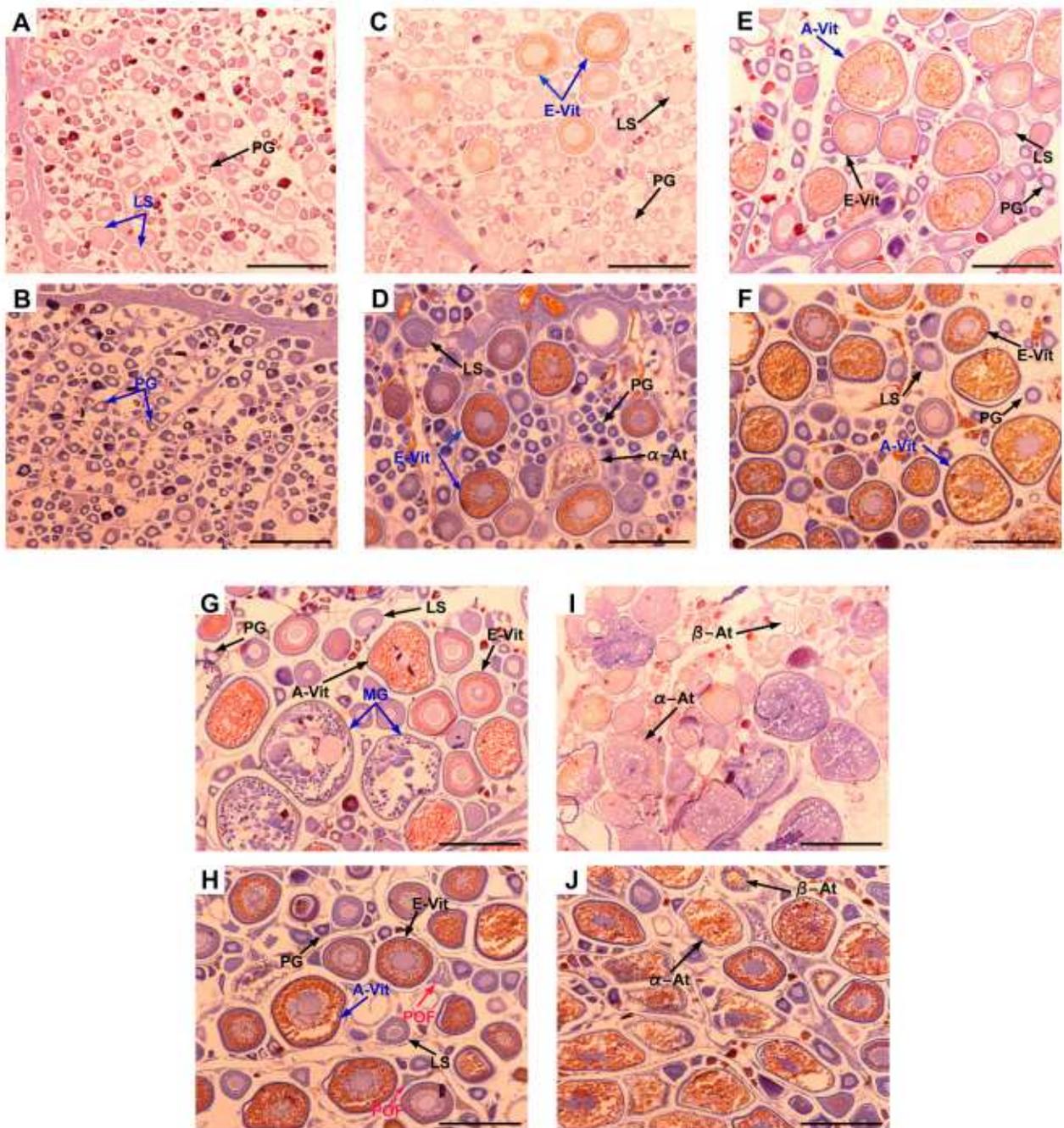


Figura 3. Estados gonadales observados en las hembras de atún aleta azul del Atlántico, capturadas en el sur del golfo de México y el mar Mediterráneo respectivamente. Ovarios en estado de regeneración (A-B), en desarrollo (C-D), capacitados para la puesta (E-F), en puesta (G-H) y en regresión (I-J). PG, ovocitos en crecimiento primario; LS, en estado lipídico; E-Vit, vitelogénesis temprana; A-Vit, vitelogénesis avanzada; MG, núcleo migratorio; POF, folículo postovulatorio; α -At, alfa atresia; β -At, beta atresia. El MAGO para cada estado gonadal se indica en color azul. Barra de escala = 500 μ m.

En el caso de las hembras del Mediterráneo, todos los ovarios colectados en marzo (seis) se observaron en regeneración. En mayo, un ovario (6%) se encontró en regeneración, 11 ovarios (65%) en desarrollo, cuatro (24%) se encontraron capacitados para la puesta y un ovario (6%) se observó en regresión. Para los ovarios colectados en junio, uno (33%) se encontró en desarrollo y dos (67%) en puesta. Finalmente en julio, tres ovarios (43%) se observaron capacitados para la puesta, dos (29%) en puesta y dos (29%) en regresión. Para las hembras en puesta de este stock se observaron POFs.

El porcentaje relativo de α -Atresia se observó en un nivel considerable o superior en ambos stocks sólo en aquellas hembras con ovarios en regresión, mientras que las β -Atresia estuvieron presentes en todas las hembras con gónadas capacitadas para la puesta, en puesta y en regresión (Tabla 5).

Tabla 5. Porcentaje relativo de atresias (α -Atresias con respecto a ovocitos vitelogénicos) y presencia de estados avanzados de atresia (β -Atresias) en los diferentes estados de madurez gonadal para ambos stocks de atún aleta azul del Atlántico.

*En el estado gonadal regeneración no se presentan ovocitos vitelogénicos.

Estado gonadal	Sur del Golfo de México								
	n	α -Atresia					β -Atresia		
		Ausente 0%	Mínimo $\leq 10\%$	Bajo 11-30%	Considerable 31-50%	Mayor $>50\%$	Completo 100%	Presente	Ausente
Regeneración*	12	-	-	-	-	-	-	5	7
Desarrollo	2	1	1						2
Capacitado para la puesta	14	1	8	5				14	
Puesta	1		1					1	
Regresión	2				2			2	
Estado gonadal	Mediterráneo								
	n	α -Atresia					β -Atresia		
		Ausente 0%	Mínimo $\leq 10\%$	Bajo 11-30%	Considerable 31-50%	Mayor $>50\%$	Completo 100%	Presente	Ausente
Regeneración*	7	-	-	-	-	-	-	5	2
Desarrollo	12	7	4	1				10	2
Capacitado para la puesta	7	1	3	3				7	
Puesta	4	3	1					4	
Regresión	3				2		1	3	

Los diámetros de los ovocitos no difirieron significativamente entre stocks (*t*-test, $p > 0.05$) en cada uno de sus estadios de desarrollo; se observó un marcado incremento en el diámetro durante el proceso de maduración de los ovocitos (Tabla 6).

Tabla 6. Variación del diámetro promedio de los ovocitos durante su proceso de desarrollo para el atún aleta azul del Atlántico en ambos stocks.

Estadio de desarrollo	Sur del Golfo de México			Mediterráneo		
	n	Diámetro promedio (µm)	SD (µm)	n	Diámetro promedio (µm)	SD (µm)
PG	310	100.26	8.61	330	101.98	9.18
LS	290	186.44	16.56	260	195.55	20.12
E-Vit	190	288.95	29.34	250	298.48	45.40
A-Vit	170	363.54	43.62	120	400.52	43.61
MG	10	521.80	30.01	-	-	-

La variación de la fracción de volumen ocupada por cada estadio de desarrollo de los ovocitos en los diferentes estados de madurez gonadal, para ambos stocks, se presentan en la Fig. 4. La mayor fracción de volumen de ovocitos PG (~40%) se observó en los estados de regeneración y desarrollo, decayendo abruptamente en los estados: capacitados para la puesta, puesta y regresión, en sincronía con la aparición de los estadios de ovocitos subsecuentes, y alcanzando sus valores mas bajos (16% para las hembras del sur del golfo de México y 9% del Mediterráneo) en el estado de puesta; esta tendencia fue homóloga para ambos stocks.

La fracción de volumen ocupada de los ovocitos LS se situó por debajo del 10%, con un mínimo (2%) en el estado de regeneración para las hembras del sur del golfo de México y ausentes para las hembras del Mediterráneo en este mismo estado. En el caso de los ovocitos vitelogénicos, los porcentajes de fracción de volumen más elevados correspondieron a los E-Vit en ambos stocks, con un máximo (30%) en el estado de puesta para las hembras del Mediterráneo. En contraste, para las hembras del sur del golfo de México este incremento no se observó, ya que los ovocitos MG ocuparon la mayor fracción de volumen (19%) en este mismo estado.

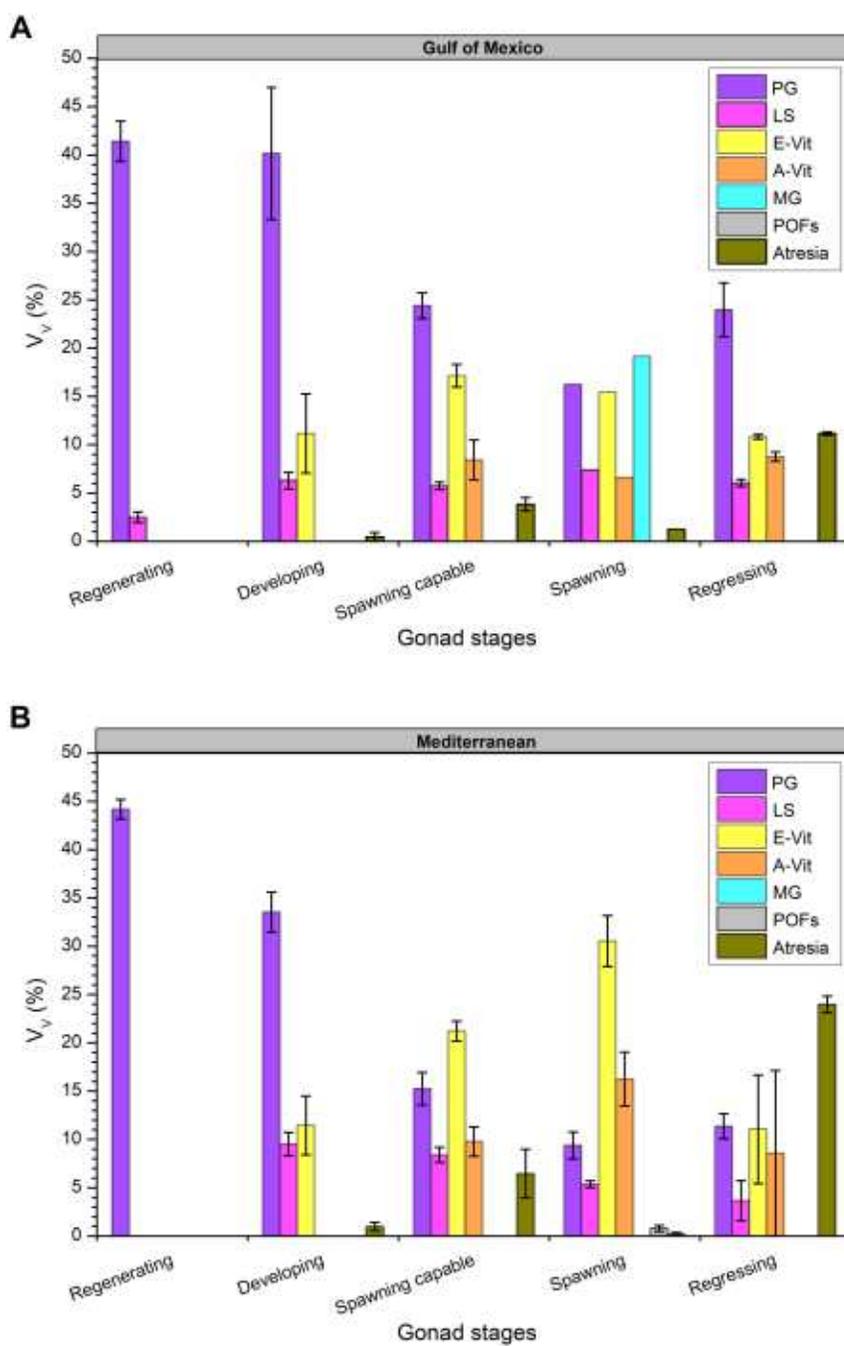


Figura 4. Fracción de volumen ocupada \pm SE de ovocitos por estadios de desarrollo en los diferentes estados de madurez gonadal para hembras de atún aleta azul del Atlántico capturadas en el sur del golfo de México (A) y el Mediterráneo (B).

Los POFs estuvieron presentes únicamente en las muestras del Mediterráneo, un porcentaje mínimo (<1%) en el estado de puesta. Las atresias estuvieron presentes desde el estado gonadal en desarrollo hasta regresión, representando el estadio de ovocitos con la menor fracción de volumen en los estados gonádicos: en desarrollo, capacitados para la puesta y en puesta, pero en las gónadas en regresión, las atresias representaron el segundo mayor contribuyente (11%) de ovocitos para las hembras del sur del golfo de México y la fracción de volumen más alta (24%) para las del Mediterráneo.

La variación en la fracción de volumen a través del proceso de maduración de los ovocitos, relacionado con un incremento en el diámetro, para cada uno de los diferentes estados gonadales en ambos stocks se presenta en la Fig. 5. En el estado de regeneración, se observó un ajuste polinomial de segundo orden ($R^2 = 0.86$) para las hembras del sur del golfo de México, mientras que para las hembras del Mediterráneo no pudo realizarse un ajuste debido a la ausencia de ovocitos LS. Para los estados gonadales en desarrollo y capacitado para la puesta, un ajuste polinomial de segundo orden ($R^2 = 0.89$ para las hembras del sur del golfo de México y $R^2 = 0.72$ para las del Mediterráneo) y tercer orden ($R^2 = 0.45$ para hembras del sur del golfo de México y $R^2 = 0.13$ para el Mediterráneo) fueron observados respectivamente.

En el caso del estado en puesta, para la hembra del sur del golfo de México los datos se ajustaron a una regresión polinomial de cuarto orden, mientras que para las hembras del Mediterráneo se observó un ajuste polinomial de tercer orden ($R^2 = 0.62$). Finalmente en el estado gonadal de regresión, los datos se ajustaron para ambos stocks a una regresión polinomial de tercer orden ($R^2 = 0.95$ para las hembras del sur del golfo de México y $R^2 = 0.88$ para las del Mediterráneo).

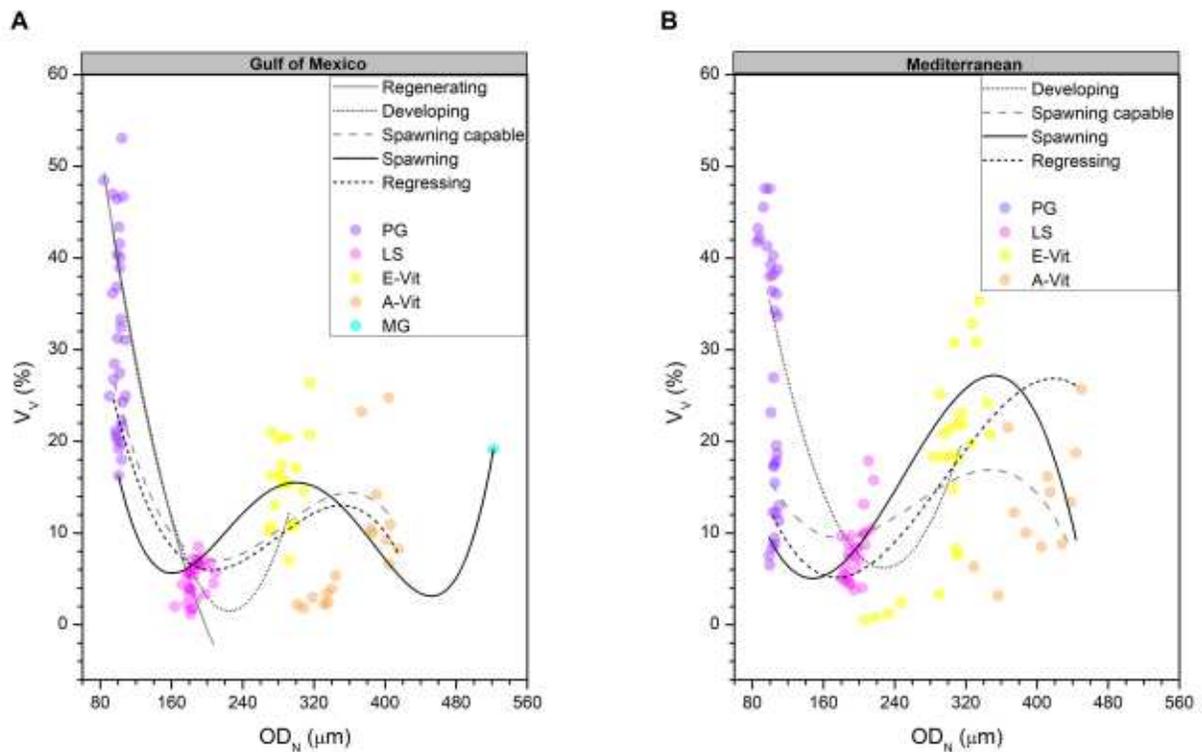


Figura 5. Variación en la fracción de volumen a través del proceso de maduración de los ovocitos para los diferentes estados de madurez gonadal, en hembras de atún aleta azul del Atlántico capturadas en el sur del golfo de México (A) y el Mediterráneo (B). Los datos fueron ajustados mediante regresiones polinomiales.

Los ovocitos promedio por gramo de ovario para cada estadio de desarrollo en los diferentes estados de madurez gonadal estimados por el método de W&G (Fig. 6), no difirieron significativamente (t -test, $p > 0.05$) entre las hembras del sur del golfo de México y del Mediterráneo. Las densidades de ovocitos obtenidas mediante el método OPD (Fig. 7) tampoco difirieron significativamente entre stocks (t -test, $p > 0.05$), con valores similares al método de W&G.

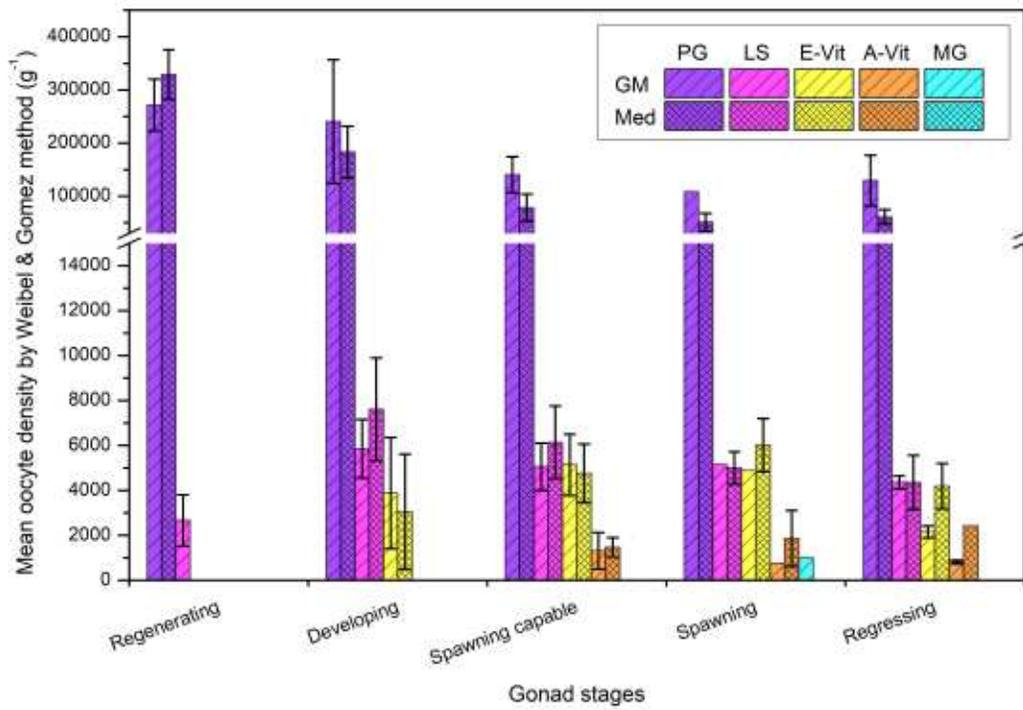


Figura 6. Densidad promedio \pm SD de ovocitos por gramo de ovario (ovocitos \cdot g⁻¹) por estadios de desarrollo en los diferentes estados de madurez gonadal, estimados por el método W&G, comparativa entre hembras de atún aleta azul del Atlántico capturadas en el sur del golfo de México y el Mediterráneo.

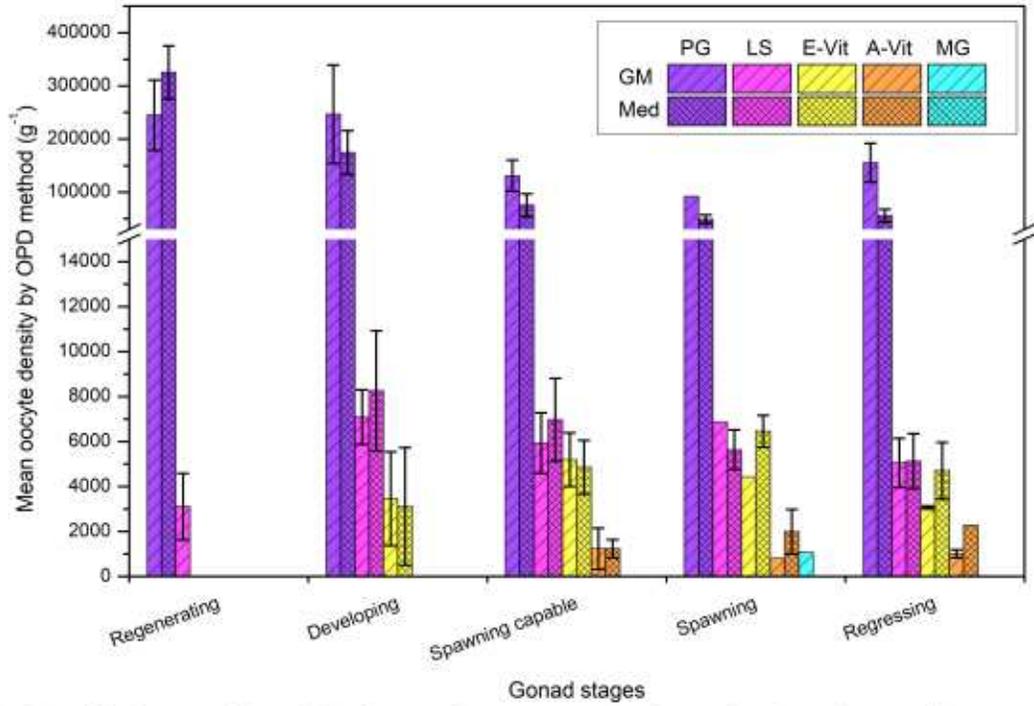


Figura 7. Densidad promedio \pm SD de ovocitos por gramo de ovario (ovocitos \cdot g⁻¹) por estadios de desarrollo en los diferentes estados de madurez gonadal, estimados por el método OPD, comparativa entre hembras de atún aleta azul del Atlántico capturadas en el sur del golfo de México y el Mediterráneo.

Se observó un decremento exponencial de la densidad de ovocitos estimados por el método W&G a lo largo del proceso de maduración de estos, en los diferentes estados de madurez gonadal para ambos stocks (Fig. 8). La transición de ovocitos PG a LS produjo una marcada disminución de hasta dos órdenes de magnitud en la densidad, mientras que para el resto de los estadios de desarrollo de los ovocitos se pudo observar en algunos casos un solapamiento en los valores de densidad. La misma tendencia pudo apreciarse con los resultados obtenidos por el método de OPD en ambos stocks (Fig. 9).

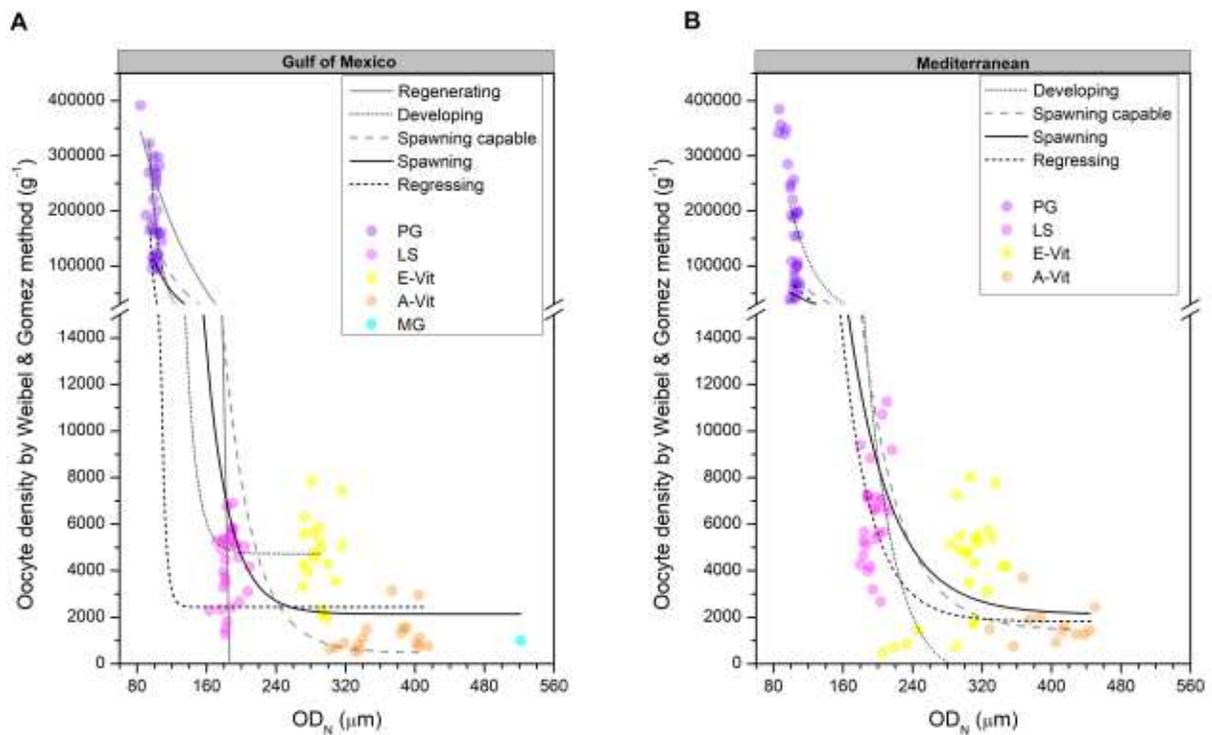


Figura 8. Variación en la densidad de ovocitos, estimados por el método W&G, a través del proceso de maduración de estos, en los diferentes estados de madurez gonadal para las hembras de atún aleta azul del Atlántico capturadas en el sur del golfo de México (A) y el Mediterráneo (B). Los datos fueron ajustados mediante regresiones exponenciales.

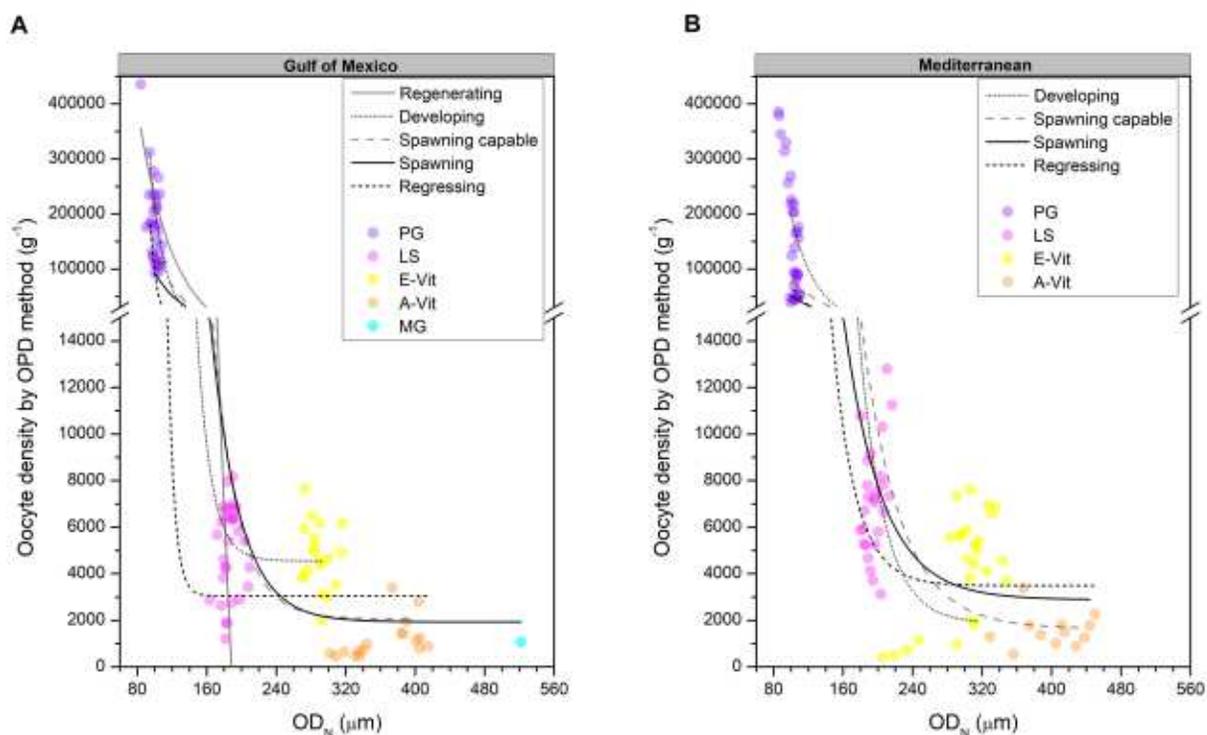


Figura 9. Variación en la densidad de ovocitos, estimados por el método OPD, a través del proceso de maduración de estos, en los diferentes estados de madurez gonadal para las hembras de atún aleta azul del Atlántico capturadas en el sur del golfo de México (A) y el Mediterráneo (B). Los datos fueron ajustados mediante regresiones exponenciales.

La densidad de ovocitos en las hembras del sur del golfo de México y del Mediterráneo, no dependió del tamaño corporal (Fig. 10), ni del peso de estas (Fig. 11), ya que no se observó correlación entre estas variables en ambos métodos estereológicos.

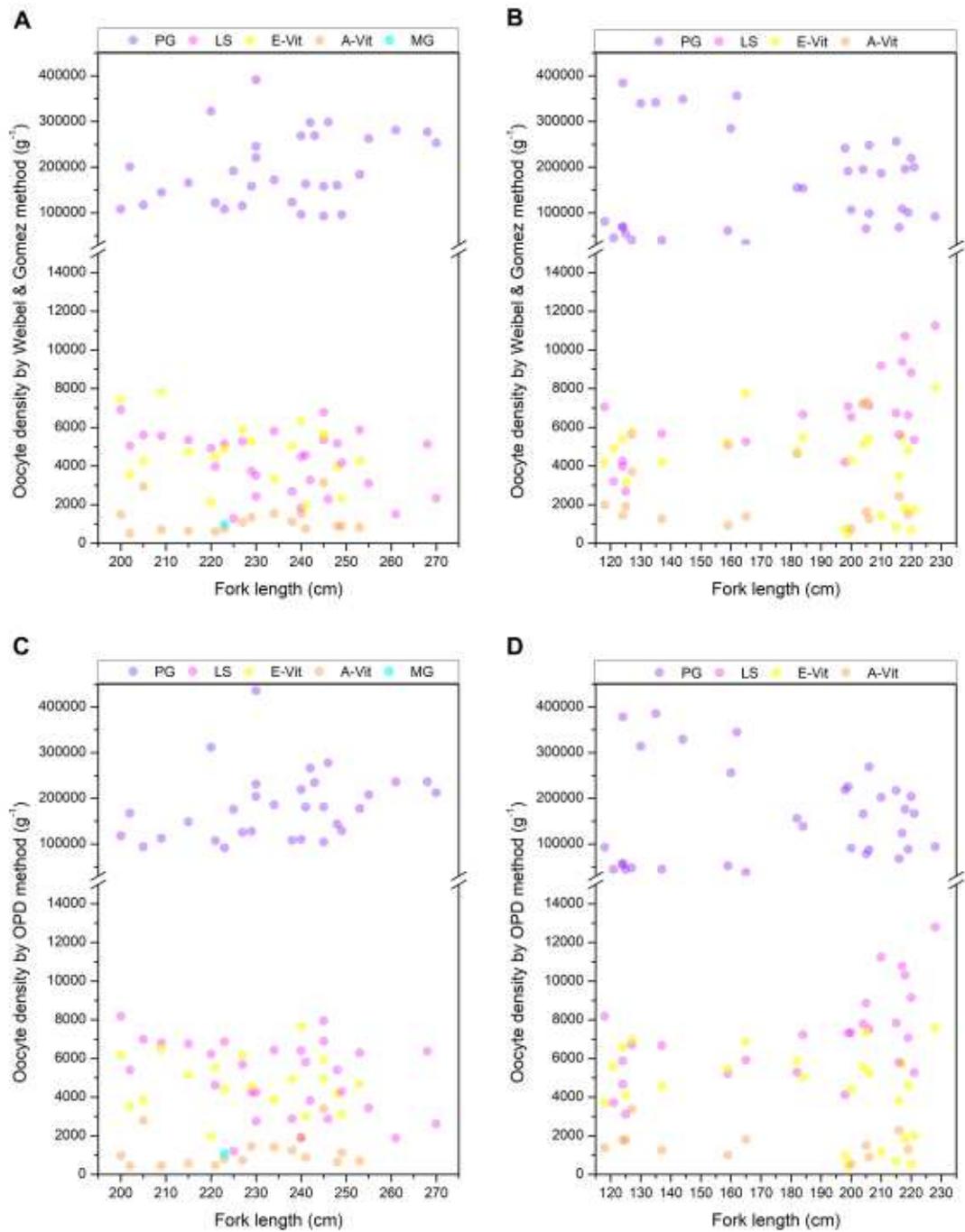


Figura 10. Relación entre la densidad de ovocitos y la longitud furcal del atún aleta azul del Atlántico, comparativa entre stocks, utilizando el método de W&G (A: sur del golfo de México, B: Mediterráneo) y el método de OPD (C: sur del golfo de México, D: Mediterráneo).

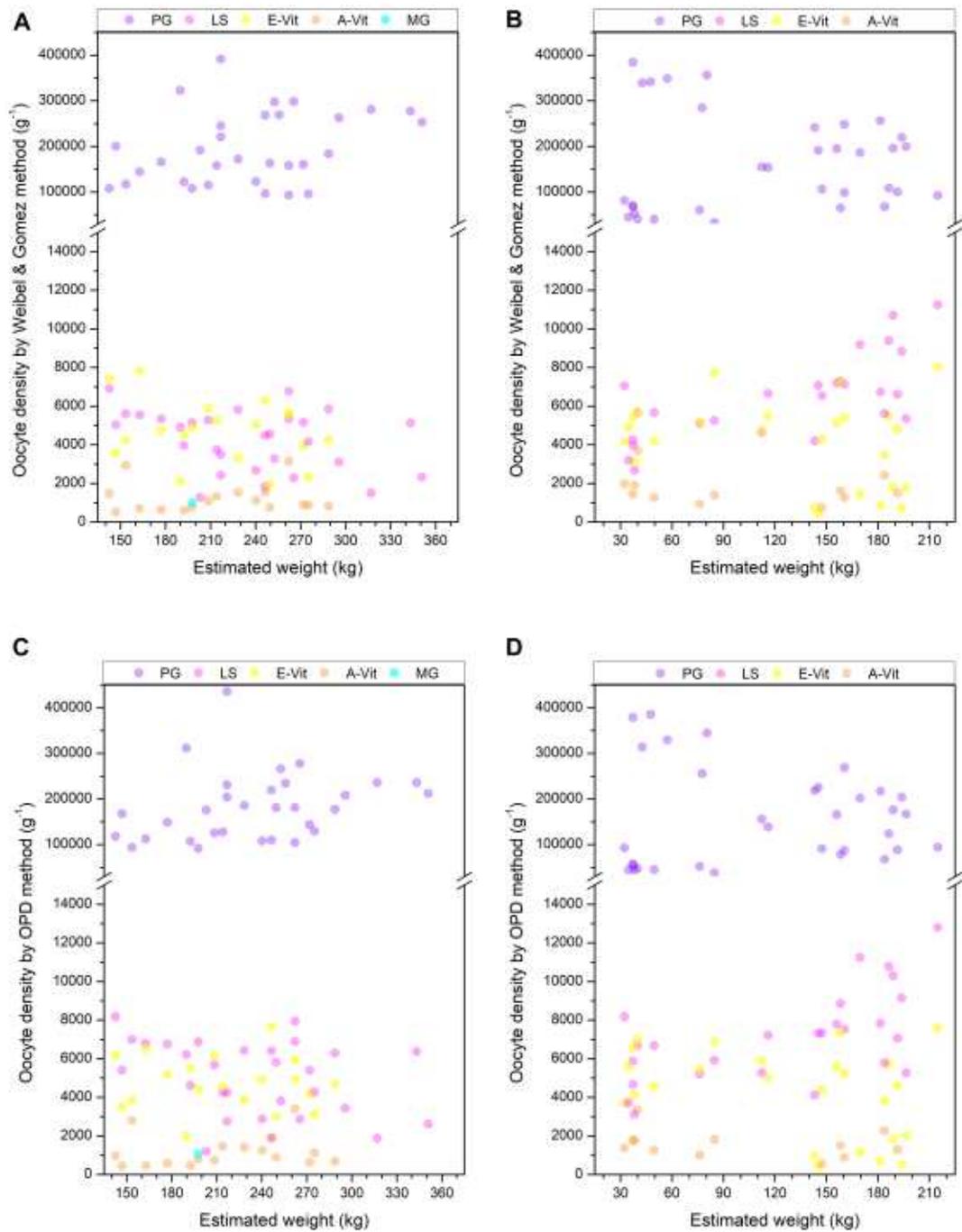


Figura 11. Relación entre la densidad de ovocitos y el peso estimado del atún aleta azul del Atlántico, comparativa entre stocks, utilizando el método de W&G (A: sur del golfo de México, B: Mediterráneo) y el método de OPD (C: sur del golfo de México, D: Mediterráneo).

Las densidades de W&G y OPD promediadas, se presentan en la Tabla 7 como factores de conversión para los diferentes estadios de ovocitos contenidos en el ovario (ovocitos $\cdot g^{-1}$) en cada uno de los estados gonadales y por stock. En este sentido, únicamente con el peso del ovario, se puede estimar individualmente el número total de ovocitos por estadio que tiene una hembra, según el estado gonadal observado; en consecuencia, el factor de conversión de ovocitos A-Vit de cada stock para el estado gonadal capacitados para la puesta, permite estimar la fecundidad potencial.

Tabla 7. Promedios \pm SD de ovocitos por gramo de ovario (ovocitos $\cdot g^{-1}$), calculados a partir de los resultados obtenidos por los métodos de W&G y OPD, para cada uno de los diferentes estados de madurez gonadal en hembras de atún aleta azul del Atlántico capturadas en el sur del golfo de México y el mar Mediterráneo.

Estado gonadal	Estadio de Desarrollo de los Ovocitos									
	PG		LS		E-Vit		A-Vit		MG	
	GM	Med	GM	Med	GM	Med	GM	Med	GM	Med
Regeneración	258 214 \pm 58 235	327 252 \pm 46 393	2 889 \pm 1 305							
Desarrollo	243 499 \pm 85 756	178 690 \pm 44 470	6 468 \pm 1 256	7 934 \pm 2 452	3 667 \pm 1 885	3 085 \pm 2 532				
Capacitado para la puesta	135 578 \pm 31 417	76 802 \pm 22 740	5 493 \pm 1 265	6 554 \pm 1 723	5 167 \pm 1 258	4 808 \pm 1 202	1 273 \pm 851	1 355 \pm 416		
Puesta	100 013 \pm 11 403	50 085 \pm 12 165	6 006 \pm 1 212	5 317 \pm 819	4 650 \pm 332	6 239 \pm 930	779 \pm 36	1 927 \pm 1 045	1 034 \pm 52	
Regresión	142 511 \pm 37 698	58 433 \pm 11 791	4 707 \pm 764	4 744 \pm 1 169	2 614 \pm 552	4 444 \pm 979	915 \pm 160	2 350 \pm 105		

DISCUSIÓN

Las tallas registradas para las hembras de atún aleta azul del Atlántico utilizadas en este estudio corresponden únicamente a individuos adultos, y a pesar de que existe una diferencia temporal en las capturas para ambos stocks, registradas de enero a abril en el sur del golfo de México y de marzo a julio en el Mediterráneo, la ocurrencia de esta especie a las áreas de puesta para ambos stocks está fuertemente determinada por el umbral de temperatura que ocurre en estos meses, aumentando en el sur del golfo de México de ~ 23 °C en enero hasta ~ 26 °C en abril (Ortega-García *et al.*, 2019; Cruz-Castán *et al.*, 2019), mientras que para el Mediterráneo la temperatura incrementa de ~ 15 °C en marzo hasta ~ 25 °C en julio (Piccinetti, Di Natale & Arena, 2013; Villegas-Hernández, Lloret & Muñoz, 2015).

Si bien el atún aleta azul se alimenta principalmente en aguas frías con alta productividad y existe evidencia de que ambos stocks llegan a coexistir en las zonas de alimentación (Walli *et al.*, 2009), estudios previos han confirmado que solamente los individuos adultos se encuentran en aguas con temperaturas de ~ 24 °C a ~ 27 °C (Block *et al.*, 2005; Teo *et al.*, 2007; Muhling *et al.*, 2011) ya que el desove de esta especie ocurre en aguas cálidas (Block *et al.*, 1993, 2001; Mather, Mason & Jones, 1995); de hecho no existe evidencia de individuos adultos en aguas con temperaturas superiores a los 30 °C (Muhling, Lamkin & Roffer, 2010), ya que de acuerdo con Blank *et al.* (2004) las temperaturas superiores a los 30 °C pueden afectar la función cardiaca de esta especie.

Aún cuando todas las hembras estudiadas en este trabajo pertenecían a la fracción reproductora de ambos stocks, se observó una marcada brecha en las tallas promedio entre stocks, la cual puede ser atribuida a la diferente presión pesquera ejercida en cada población y a la variabilidad de la selectividad por talla de los mismos (ICCAT, 2017a, 2017b), ya que numerosos estudios han evidenciado una disminución en las tallas a través del tiempo para aquellas especies que son objeto de una constante presión pesquera (Bianchi *et al.*, 2000; Kuparinen *et al.*, 2009; Sharpe & Hendry, 2009; Hunter, Speirs & Heath, 2015), particularmente para el atún aleta azul del Atlántico, Rooker *et al.* (2007) han reportado notorias diferencias en la edad y talla de primera madurez sexual entre ambos stocks.

Derivado de lo anterior, el hecho de que la L_F promedio registrada en este estudio para las

hembras del sur del golfo de México fuese mayor que para las hembras del Mediterráneo tiene sentido debido a que el stock occidental es menos explotado que el oriental, incluso no existe una pesquería dirigida sobre el atún aleta azul en aguas mexicanas (sur del golfo de México) y las capturas incidentales por la flota de palangre registran cantidades marginales de alrededor de 60 individuos por año, las cuales representan menos de ~25 toneladas anuales con una estructura de tallas que va de los 120 a 380 cm L_F con un promedio de 250 cm L_F (Ramírez-López & Abad-Uribarren, 2013; Abad-Uribarren *et al.*, 2014), valores similares a los rangos de tallas registrados en este estudio para las hembras del sur del golfo de México.

Para el stock del Mediterráneo en cambio, el atún aleta azul es una especie objetivo capturada mediante almadrabas y palangre dirigido (Megalofonou *et al.*, 2005; ICCAT, 2009), a pesar de que las almadrabas operan únicamente durante las migraciones reproductivas, es decir durante la entrada y salida de esta especie al mar Mediterráneo, el palangre y otros artes de pesca manuales, pueden ejercer en conjunto una constante presión pesquera durante toda su estancia en esta zona (Ravier & Fromentin, 2004; Mylonas *et al.*, 2010); la estructura de tallas reportadas por la flota de palangre para este stock oscila de los 111 a 271 cm L_F siendo las tallas más frecuentes de ~190 a ~220 cm L_F (Justel-Rubio & Ortiz, 2013; Lombardo *et al.*, 2016; Lombardo *et al.*, 2017), lo cual concuerda con los valores de tallas observados en este estudio para las hembras del Mediterráneo.

Para un mejor entendimiento de la estructura de tallas entre stocks es importante analizar la variación y distribución en las longitudes registradas. Usualmente la estructura de tallas se analiza a través de histogramas o polígonos de frecuencia; sin embargo, diversos autores han evidenciado diferentes problemas asociados a estos métodos, entre ellos, una dependencia derivada del origen de los datos y un sesgo debido a la selección de la amplitud de los intervalos; el uso de los KDE representa una alternativa para solucionar los problemas antes mencionados (Silverman, 1986; Salgado-Ugarte *et al.*, 2000; Salgado-Ugarte, Gómez-Márquez & Peña-Mendoza, 2005; Sanvicente-Añorve, Salgado-Ugarte & Castillo-Rivera, 2003; Ayala-Pérez *et al.*, 2008).

La distribución de frecuencia de tallas obtenida por KDE en este estudio permitió observar una clara distribución bimodal para las hembras capturadas en el Mediterráneo,

encontrándose la moda que corresponde a los individuos más pequeños bastante alejada de la única moda que se observó para las hembras del sur del golfo de México; estos resultados permiten nuevamente evidenciar el efecto de la presión pesquera y la selectividad del arte sobre la estructura de tallas en una población.

Las muestras analizadas por stock en este estudio estuvieron balanceadas en número, sin embargo, es importante resaltar que para el sur del golfo de México el número de individuos muestreados puede significar la mitad del total de las capturas incidentales que ocurren en un año, mientras que para el Mediterráneo el número de individuos analizados representa un porcentaje mucho más pequeño del total de capturas por año, ya que como previamente se mencionó, este stock es altamente explotado; no obstante nuestros resultados sugieren una temporalidad en las capturas de atún aleta azul similares en ambas áreas de puesta.

El arribo del atún aleta azul del Atlántico de ambos stocks a sus áreas de puesta fue gradual, pero con un desfase temporal entre ambos, ya que en el golfo de México el flujo inició en enero con un máximo en marzo y desapareciendo para mayo, por su parte en el Mediterráneo, la entrada inició dos meses después que en el golfo de México, con un máximo en mayo y desapareciendo para agosto. Los picos de ocurrencia de hembras, en marzo y mayo para el sur del golfo de México y el Mediterráneo respectivamente, fue coincidente con el inicio de la producción de ovocitos vitelogénicos, y posteriormente, la aparición de ovocitos MG y POFs, se correspondió con el decremento de las capturas, lo cual es consistente con la disminución en la alimentación cuando el periodo de desove inicia, tal como se ha reportado en otros túnidos (Rivas, 1954; Chen, Crone & Hsu, 2006).

Al momento en que las hembras objeto de este estudio arribaron al sur del golfo de México (enero y febrero) y al Mediterráneo (marzo), únicamente fue posible identificar el estado gonadal en regeneración (hembras reproductivamente inactivas), estas observaciones son consistentes con lo previamente reportado por Medina et al. (2002), quienes describieron que el atún aleta azul del Atlántico arriba hacia sus zonas de desove sin estar reproductivamente activo y espera las condiciones adecuadas para comenzar la puesta.

Es preciso evitar asumir que los individuos de atún aleta azul se encuentran reproductivamente activos solo por encontrarse en sus zonas de puesta, la aproximación más

precisa para determinar el inicio de la actividad reproductiva es a través de la correcta identificación histológica de ovocitos A-Vit (individuos capacitados para la puesta) o bien ovocitos MG y HY así como POFs (individuos en puesta), mientras que la presencia de niveles considerables o superiores de atresia, es decir $>30\%$ (gónadas en regresión), indicarían el final del periodo de puesta, evitando con ello, sobre estimar el potencial reproductivo de la especie.

Tal como se esperaba, el atún aleta azul mostró un desarrollo asincrónico de ovocitos en los ovarios, por lo tanto, en las hembras cuyas gónadas se encontraban en desarrollo hasta en puesta, ocurren todos los MAGO de los estados de madurez gonadal anteriores. El indicador más sensible de la progresión del desarrollo de cada uno de los estadios es el crecimiento de los ovocitos, desde PG hasta A-Vit o MG para las hembras del Mediterráneo y el sur del golfo de México respectivamente; tal y como ha sido descrito previamente para esta misma especie por Corriero et al. (2003) y Abascal & Medina (2005).

La fracción de volumen ocupada por cada estadio de ovocito en los diferentes estados de madurez gonadal estuvo influenciada por dos factores: 1) el número de ovocitos y 2) el tamaño de los mismos. Es decir, el porcentaje elevado de la fracción de volumen de los ovocitos PG está relacionada con la abundancia de estos y no con su tamaño, en tanto que el incremento en la fracción de volumen ocupada por los ovocitos vitelogénicos (E-Vit y A-Vit) y MG depende del marcado aumento en sus diámetros y no necesariamente con su abundancia. En el caso de los ovocitos LS, la escasa fracción de volumen ocupada por estos se debe a una combinación de valores bajos tanto de su abundancia como de tamaño. Finalmente para las hembras cuyas gónadas se encontraban en regresión, se observó que el porcentaje de atresia ronda $\sim 50\%$ o más del porcentaje total de ovocitos vitelogénicos.

Si bien existe una similitud en la evolución de la fracción de volumen de ambos stocks, para el estado gonadal en puesta, se observó una marcada diferencia aparente entre ellos, la cual fue dependiente de los diferentes MAGO utilizados para asignar este estado gonadal, ovocitos MG para la hembra del sur del golfo de México y ovocitos A-Vit así como POFs para las hembras del Mediterráneo, en ausencia de los MG, que ocurren en momentos muy breves de cada individuo.

Los ajustes polinomiales observados en la fracción de volumen a través del crecimiento

de los ovocitos, en los diferentes estados gonadales para ambos stocks, mostraron que no hay un incremento consistente en esta a medida que aumenta el tamaño de los ovocitos, lo cual indica que adicionalmente al diámetro, el reclutamiento de estos hacia los estadios subsecuentes contribuye en la oscilación de la fracción de volumen; este modelo polinomial era esperado para el atún aleta azul debido a que es característico de especies cuyo desarrollo de ovocitos es asincrónico (Schismenou *et al.*, 2012; Costa, Dias & Murua, 2015; Saber *et al.*, 2015b; Costa, Dias & Murua, 2016). La dinámica observada en la fracción de volumen y los ajustes polinomiales fueron consistentes entre stocks para cada estado gonadal, lo que demuestra que se trata de un patrón propio de la especie. Los bajos valores de R^2 obtenidos en los ajustes polinomiales para el estado gonadal capacitado para la puesta en ambos stocks, están claramente influenciados por el tamaño de algunos ovocitos vitelogénicos, cuyos diámetros se registraron cerca de los valores mínimos y máximos, es decir están en transición entre un estadio y otro.

Una regresión polinomial permite describir la relación entre una variable independiente (x) y una variable dependiente (y) modelada como una función polinomial de orden n siguiendo un comportamiento curvilíneo, con crestas y valles que dependen del orden del polinomio (Ajao, Abdullahi & Raji, 2012; Ostertagová, 2012); en este sentido, se observó una relación entre el orden del polinomio y el MAGO presente en cada estado de madurez gonadal, donde un estadio de ovocito avanzado como MAGO incrementa el orden de la función polinomial y viceversa, esta dependencia se demuestra en el estado gonadal en puesta, donde la hembra del sur del golfo de México, teniendo como MAGO ovocitos MG, se ajustó a una función polinomial de cuarto orden, mientras que las hembras del Mediterráneo, teniendo como MAGO ovocitos A-Vit, se ajustaron a una función de tercer orden.

Los aumentos en la fracción de volumen a través del proceso de maduración de los ovocitos, representados por las crestas observadas en los ajustes, son producto del crecimiento en diámetro y de un numeroso reclutamiento de ovocitos procedentes del estadio anterior, por el contrario, la disminución en la fracción de volumen, representada por los valles, a pesar de que existe un incremento en los diámetros, demuestra un marcado decremento en los ovocitos reclutados de un estadio a otro, lo cual permite dilucidar que no todos los ovocitos vitelogénicos son un indicador apropiado para estimar la fecundidad; los E-Vit la sobrestimarían, debido a que

una fracción considerable de ellos no alcanzará el siguiente estadio, por el contrario, la mayoría de los ovocitos A-Vit conseguirán convertirse en ovocitos MG, y por lo tanto, son un indicador apropiado para estimar la fecundidad cuando se carece de ovocitos MG o HY y POFs; estos hallazgos concuerdan con estudios previos que han respaldado la eficiencia de los estadios avanzados de ovocitos, a partir de los A-Vit, como indicadores adecuados para estimar la fecundidad en el atún aleta azul (Medina *et al.*, 2002; Medina *et al.*, 2007; Aranda *et al.*, 2013; Knapp *et al.*, 2014).

La densidad de ovocitos A-Vit en el ovario (huevos $\cdot g^{-1}$), eficaz para estimar la fecundidad potencial en hembras capacitadas para la puesta, exhibió con el método W&G, valores de ~ 1312 huevos $\cdot g^{-1}$ para las hembras del sur del golfo de México y ~ 1473 huevos $\cdot g^{-1}$ en las del Mediterráneo, mientras que con el método OPD, los valores encontrados fueron de ~ 1233 huevos $\cdot g^{-1}$ y ~ 1236 huevos $\cdot g^{-1}$, para el sur del golfo de México y Mediterráneo respectivamente; lo cual revela que la fecundidad potencial es la misma para ambas poblaciones analizadas en este estudio, al no encontrarse diferencias significativas entre estas. Los resultados obtenidos para las hembras del sur del golfo de México complementan la información disponible acerca del potencial reproductivo del stock occidental, para el cual previamente Knapp *et al.* (2014), reportaron valores semejantes de fecundidad entre hembras del norte del golfo de México y el Mediterráneo. Disponer de información detallada acerca de la dinámica ovocitaria de estas dos áreas de puesta en el golfo de México, permite aseverar con certeza que la capacidad de producción de ovocitos entre las hembras del stock occidental y oriental son iguales.

Las densidades para cada estadio de ovocitos (g^{-1}) en los diferentes estados de madurez gonadal, no difieren significativamente entre stocks, lo cual fue corroborado por dos métodos diferentes utilizados en este estudio (W&G y OPD), a pesar de fundamentarse en diferentes modelos teóricos, demostrando que la variabilidad metodológica no es determinante como fuente de sesgo en los resultados. Las densidades de los POFs y atresias no fueron estimadas, debido a que poseen una forma irregular, y por lo tanto, la cuantificación de estos componentes gonadales debe llevarse a cabo a partir de un método estereológico que no asuma formas redondeadas o elipsoidales, por ejemplo el método de disector (Aragón *et al.*, 2010; Aranda *et al.*, 2011).

El tamaño y la densidad estimada de los ovocitos de atún aleta azul por ambos métodos,

están negativamente relacionados por una función exponencial en todos los estados gonadales para ambos stocks, ya que los ovocitos de mayor tamaño ocupan un mayor volumen en la gónada y en consecuencia habrá menos de ellos por gramo de ovario (Thorsen & Kjesbu, 2001), sin embargo se observaron coeficientes de decaimiento menores cuando las hembras se encuentran capacitadas para la puesta y durante la puesta. Contrario con la tendencia observada en los análisis de fracción de volumen, en esta relación (diámetro vs densidad), a pesar de que las densidades de los ovocitos PG disminuyeron cuando apareció un nuevo MAGO, sus valores continuaron siendo significativamente más altos con respecto a los otros tipos de ovocitos en todos los estados gonadales, esto es característico en especies con desarrollo de ovocitos asincrónico (fecundidad indeterminada), donde se generan constantemente nuevos ovocitos PG durante el periodo de puesta, con la finalidad de producir y garantizar el desarrollo de nuevas tandas de ovocitos (Ganias, 2013).

Finalmente, la longitud furcal y el peso estimado en ambos stocks, no ejercen influencia sobre la producción de ovocitos por gramo de ovario, debido a que estas variables no mostraron correlación alguna con las densidades estimadas a través de ambos métodos estereológicos, lo que demuestra que la fecundidad parcial de cada hembra se encuentra determinada únicamente por el peso absoluto de su ovario, este atributo se encuentra en correspondencia con lo previamente reportado para otros túnidos (Aranda *et al.*, 2013; Ashida *et al.*, 2015; Saber *et al.*, 2016). En virtud de que el peso absoluto de la gónada mantiene una relación con el peso total del pez, la fecundidad parcial de cada stock de atún aleta azul del Atlántico, estará únicamente determinada por la biomasa de reproductores.

CONCLUSIONES

Este estudio presenta por primera vez la dinámica de desarrollo y producción de ovocitos para las hembras de atún aleta azul del Atlántico capturadas en el sur del golfo de México, y además se realiza una evaluación comparativa con la fracción desovante de hembras del Mediterráneo. En este sentido las siguientes conclusiones pueden ser extraídas:

- 1) La ocurrencia temporal del atún aleta azul en el sur del golfo de México comienza en enero, mientras que para el Mediterráneo inicia en marzo; ambos stocks arriban a sus respectivas áreas de puesta siendo reproductivamente inactivos, y se mantienen en este estado hasta que se alcanza la SST adecuada para llevar a cabo la reproducción ($\sim 24-25$ °C); por tal motivo, la actividad reproductiva empieza hasta el mes de marzo para las hembras del sur del golfo de México y hasta Mayo para las hembras del Mediterráneo.
- 2) La abundancia relativa de los individuos de atún aleta azul en ambas áreas de puesta, está relacionada directamente con la preparación para el desove (durante los estados gonadales en desarrollo y capacitados para la puesta) y disminuye cuando el periodo de puesta inicia.
- 3) El patrón en la dinámica de desarrollo de los ovocitos para cada uno de los diferentes estados gonadales, es idéntico en las hembras del sur del golfo de México y del Mediterráneo.
- 4) La densidad de ovocitos producidos (ovocitos $\cdot g^{-1}$) en cada uno de los diferentes estados de madurez gonadal, son iguales entre stocks, y los ovocitos A-Vit de hembras capacitadas para la puesta, indicadores apropiados para estimar la fecundidad potencial, presentaron valores de ~ 1273 y ~ 1355 huevos $\cdot g^{-1}$ para las hembras del sur del golfo de México y del Mediterráneo respectivamente.
- 5) La densidad de ovocitos producidos es independiente de la somatometría de la hembra, por lo tanto, la fecundidad parcial de cada hembra dependerá únicamente del peso absoluto de su ovario; dada la relación que guarda el peso de la gónada con el peso del individuo, la fecundidad parcial de cada stock de atún aleta azul del Atlántico, está únicamente influenciada por la biomasa de reproductores, por consiguiente, la composición de tallas de cada stock no afectará su potencial reproductivo, el cual estará determinado únicamente por la biomasa de la población desovante, así como la frecuencia de puesta y la extensión del periodo de desove.

REFERENCIAS

Abad-Uribarren A, Meiners C, Ramírez-López K, Ortega-García S. 2014. Dinámica temporal de la captura incidental de atún aleta azul (*Thunnus thynnus*) y su relación con la variabilidad ambiental en aguas Mexicanas del Golfo de México. *ICCAT Collective Volume of Scientific Papers* **70(2)**:684-698.

Abascal FJ, Medina A. 2005. Ultrastructure of Oogenesis in the Bluefin Tuna, *Thunnus thynnus*. *Journal of Morphology* **264**:149-160.

Abid N, Benchoucha S, Lamtai A, El Fanichi C. 2013. The size structure estimation of bluefin tuna (*Thunnus thynnus*) catches by Moroccan Atlantic traps biological scraps for 2011. *ICCAT Collective Volume of Scientific Papers* **69(1)**:240-251.

Ajao IO, Abdullahi AA, Raji II. 2012. Polynomial Regression Model of Making Cost Prediction In Mixed Cost Analysis. *Mathematical Theory and Modeling* **2(2)**:14-23.

Alemaný F, Quintanilla L, Velez-Belchí P, García A, Cortés D, Rodríguez JM, Fernández de Puelles ML, González-Pola C, López-Jurado JL. 2010. Characterization of the spawning habitat of Atlantic bluefin tuna and related species in the Balearic Sea (western Mediterranean). *Progress in Oceanography* **86**:21-38.

Aragón L, Aranda G, Santos A, Medina A. 2010. Quantification of ovarian follicles in bluefin tuna *Thunnus thynnus* by two stereological methods. *Journal of Fish Biology* **77**:719-730 DOI 10.1111/j.1095-8649.2010.02713.x.

Aranda G, Aragón L, Corriero A, Mylonas CC, De la Gándara F, Belmonte A, Medina A. 2011. GnRHa-induced spawning in cage-reared Atlantic bluefin tuna: An evaluation using stereological quantification of ovarian post-ovulatory follicles. *Aquaculture* **317**:255-259 DOI 10.1016/j.aquaculture.2011.04.030.

Aranda G, Medina A, Santos A, Abascal FJ, Galaz T. 2013. Evaluation of Atlantic bluefin tuna reproductive potential in the western Mediterranean Sea. *Journal of Sea Research* **76**:154-160 DOI 10.1016/j.seares.2012.08.005.

Ashida H, Suzuki N, Tanabe T, Suzuki N, Aonuma Y. 2015. Reproductive condition, batch fecundity, and spawning fraction of large Pacific bluefin tuna *Thunnus orientalis* landed at Ishigaki Island, Okinawa, Japan. *Environmental Biology of Fishes* **98**:1173-1183 DOI

10.1007/s10641-014-0350-8.

Ayala-Pérez LA, Ramos-Miranda J, Flores-Hernández D, Vega-Rodríguez BI, Moreno-Medina UC. 2008. Biological and ecological characterization of the catfish *Cathorops melanopus* off the west coast of Campeche, Mexico. *Ciencias Marinas* **34(4)**:453-465.

Baglin Jr RE. 1982. Reproductive biology of western Atlantic bluefin tuna. *Fishery Bulletin* **80**:121–134.

Bard FX, Bach P, Josse E. 1998. Habitat et écophysiologie des thons: Quoi de neuf depuis 15 ans?. *ICCAT Collective Volume of Scientific Papers* **50**:319-342.

Bianchi G, Gislason H, Graham K, Hill L, Jin X, Koranteng K, Manickchand-Heileman S, Payá I, Sainsbury K, Sanchez F, Zwanenburg K. 2000. Impact of fishing on size composition and diversity of demersal fish communities. *ICES Journal of Marine Science* **57**:558-571 DOI 10.1006/jmsc.2000.0727.

Bjørndal T, Brasão A. 2006. The East Atlantic Bluefin Tuna Fisheries: Stock collapse or Recovery?. *Marine Resource Economics* **21**:193-210.

Blank JM, Morrissette JM, Landeira-Fernandez AM, Blackwell SB, Williams TD, Block BA. 2004. *In situ* cardiac performance of Pacific bluefin tuna hearts in response to acute temperature change. *Journal of Experimental Biology* **207**:881-890 DOI 10.1242/jeb.00820.

Block BA, Finnerty JR, Stewart AFR, Kidd J. 1993. Evolution of endothermy in fish: mapping physiological traits on a molecular phylogeny. *Science* **260**:210-214.

Block BA, Dewar H, Farwell C, Prince ED. 1998. A new satellite technology for tracking the movements of Atlantic bluefin tuna. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **95(16)**:9384-9389 DOI 10.1073/pnas.95.16.9384.

Block BA, Dewar H, Blackwell SB, Williams TD, Prince ED, Farwell CJ, Boustany A, Teo SLH, Seitz A, Walli A, Fudge D. 2001. Migratory movements, depth preferences and thermal biology of Atlantic bluefin tuna. *Science* **293**:1310–1314 DOI 10.1126/science.1061197.

Block BA, Teo SLH, Walli A, Boustany A, Stokesbury MJW, Farwell CJ, Weng KC, Dewar H, Williams TD. 2005. Electronic tagging and population structure of Atlantic bluefin tuna. *Nature* **434**:1121–1127.

Carlsson J, McDowell JR, Díaz-Jaimes P, Carlsson JEL, Boles SB, Gold JR, Graves

JE. 2004. Microsatellite and mitochondrial DNA analyses of Atlantic bluefin tuna (*Thunnus thynnus thynnus*) population structure in the Mediterranean Sea. *Molecular Ecology* **13**:3345-3356 DOI 10.1111/j.1365-294X.2004.02336.x.

Chen K-S, Crone P, Hsu C-C. 2006. Reproductive biology of female Pacific bluefin tuna *Thunnus orientalis* from south-western North Pacific Ocean. *Fisheries Science* **72(5)**:985-994 DOI 10.1111/j.1444-2906.2006.01247.x.

Corriero A, Desantis S, Deflorio M, Acone F, Bridges CR, De la Serna JM, Megalofonou P, De Metrio G. 2003. Histological investigation on the ovarian cycle of the bluefin tuna in the western and central Mediterranean. *Journal of Fish Biology* **63**:108–119 DOI 10.1046/j.1095-8649.2003.00132.x.

Costa EFS, Dias JF, Murua H. 2015. Reproductive strategy and fecundity of the keystone species *Paralichthys brasiliensis* (Teleostei, Sciaenidae): an image processing techniques application. *Environmental Biology of Fishes* **98**:2093-2108 DOI 10.1007/s10641-015-0432-2.

Costa EFS, Dias JF, Murua H. 2016. Closely Related Fishes Inhabiting Different Ecosystems Exhibit the Same Oocyte Production and Recruitment Pattern. *Biological Bulletin* **230**:96-109.

Coward K, Bromage NR. 2002. Stereological point-counting; an accurate method for assessing ovarian function in tilapia. *Aquaculture* **212**:383–401.

Cruz-Castán R, Saber S, Macías D, Gómez-Vives MJ, Galindo-Cortes G, Curiel-Ramirez S, Meiners-Mandujano C. 2019. A possible new spawning area for Atlantic bluefin tuna (*Thunnus thynnus*): the first histologic evidence of reproductive activity in the southern Gulf of Mexico. *PeerJ* **7**:e7187 DOI 10.7717/peerj.7187.

De La Serna JM, Alot E, Majuelos E, Rioja P. 2004. La migración trófica post-reproductiva del atún rojo (*Thunnus thynnus*) a través del estrecho de Gibraltar. *ICCAT Collective Volume of Scientific Papers* **56(3)**:1196-1209.

Delesse MA. 1847. Procédé mécanique pour déterminer la composition des roches. *Compte-Rendus d' Académie des Sciences, Paris* **25**:544-545.

Dhurmeea Z, Zudaire I, Chassot E, Cedras M, Nikolic N, Bourjea J, West W,

Appadoo C, Bodin N. 2016. Reproductive Biology of Albacore Tuna (*Thunnus alalunga*) in the Western Indian Ocean. *PLoS ONE* **11(12)**:e0168605 DOI 10.1371/journal.pone.0168605.

Emerson LS, Greer Walker M, Witthames PR. 1990. A stereological method for estimating fish fecundity. *Journal of Fish Biology* **36**:721–730.

Fenech A, De La Serna JM, Ortiz De Urbina JM. 2003. Sex-ratio by length-class of Bluefin tuna (*Thunnus thynnus* L.) caught by Maltese longliners. *ICCAT Collective Volume of Scientific Papers* **55(3)**:1145-1147.

Fromentin JM, Fonteneau A. 2001. Fishing effects and life history traits: a case-study comparing tropical versus temperate tunas. *Fisheries Research* **53**:133-150.

Fromentin JM, Powers JE. 2005. Atlantic bluefin tuna: Population dynamics, ecology, fisheries, and management. *Fish and Fisheries* **6(4)**:281–306.

Ganias K. 2013. Determining the indeterminate: Evolving concepts and methods on the assessment of the fecundity pattern of fishes. *Fisheries Research* **138**:23-30 DOI 10.1016/j.fishres.2012.05.006.

Gordoa A, Olivar MP, Arevalo R, Viñas J, Molí B, Illas X. 2009. Determination of Atlantic bluefin tuna (*Thunnus thynnus*) spawning time within a transport cage in the western Mediterranean. *ICES Journal of Marine Science* **66(10)**:2205–2210.

Gordoa A, Sanz N, Viñas J. 2015. Individual Spawning Duration of Captive Atlantic Bluefin Tuna (*Thunnus thynnus*) Revealed by Mitochondrial DNA Analysis of Eggs. *PLoS ONE* **10(8)**:e0136733 DOI 10.1371/journal.pone.0136733.

Heinisch G, Rosenfeld H, Knapp JM, Gordin H, Lutcavage ME. 2014. Sexual maturity in western Atlantic bluefin tuna. *Scientific Reports* **4**:7205 DOI 10.1038/srep07205.

Hunter JR, Lo NCH, Leong RJH. 1985. Batch fecundity in multiple spawning species. In: Lasker R, ed. *An egg production method for estimating spawning biomass of pelagic Fish: application to the northern anchovy, *Engraulis mordax**. La Jolla, CA: NOAA Technical Report NMFS 36, 67–77.

Hunter JR, Macewicz BJ. 1985. Measurement of spawning frequency in multiple spawning fishes. In: Lasker R, ed. *An egg production method for estimating spawning biomass of pelagic Fish: application to the northern anchovy, *Engraulis mordax**. La Jolla, CA: NOAA

Technical Report NMFS 36, 79–94.

Hunter JR, Macewicz BJ, Lo NCH, Kimbrell CA. 1992. Fecundity, spawning, and maturity of female Dover Sole *Microstomus pacificus*, with an evaluation of assumptions and precision. *Fishery Bulletin* **90**:101-128.

Hunter A, Speirs DC, Heath MR. 2015. Fishery-induced changes to age and length dependent maturation schedules of three demersal fish species in the Firth of Clyde. *Fisheries Research* **170**:14–23 DOI 10.1016/j.fishres.2015.05.004.

ICCAT. 2009. Report of the 2008 Atlantic Bluefin Tuna Stock Assessment Session. *ICCAT Collective Volume of Scientific Papers* **64(1)**:1-352.

ICCAT. 2017a. Recommendation by ICCAT amending the recommendation 14-04 on Bluefin tuna in the eastern Atlantic and Mediterranean. Available at <https://www.iccat.int/Documents/Recs/compendiopdf-e/2017-07-e.pdf> (accessed 14 April 2020)

ICCAT. 2017b. Recommendation by ICCAT for an interim conservation and management plan for western Atlantic Bluefin tuna. Available at <https://www.iccat.int/Documents/Recs/compendiopdf-e/2017-06-e.pdf> (accessed 14 April 2020)

Idrissi M, Abid N. 2009. Preliminary estimation of the size composition of bluefin tuna (*Thunnus thynnus*) caught by Moroccan Atlantic traps from biological scraps in 2006. *ICCAT Collective Volume of Scientific Papers* **64(2)**:507-512.

Idrissi M, Abid N. 2011. The Moroccan Atlantic traps: Comparison between the estimation of the size composition of bluefin tuna catches from the average weight of fish and biological scraps, 2009. *ICCAT Collective Volume of Scientific Papers* **66(2)**:935-942.

Justel-Rubio A, Ortiz M. 2013. Review and preliminary analyses of size frequency samples of Bluefin tuna (*Thunnus thynnus*) 1952-2010. *ICCAT Collective Volume of Scientific Papers* **69(1)**:297-330.

Karakulak S, Oray I, Corriero A, Deflorio M, Santamaria N, Desantis S, De Metrio G. 2004. Evidence of a spawning area for the bluefin tuna (*Thunnus thynnus* L.) in the eastern Mediterranean. *Journal of Applied Ichthyology* **20**:318-320.

Knapp JM, Aranda G, Medina A, Lutcavage M. 2014. Comparative Assessment of the Reproductive Status of Female Atlantic Bluefin Tuna from the Gulf of Mexico and the

Mediterranean Sea. *PLoS ONE* **9**(6):e98233 DOI 10.1371/journal.pone.0098233.

Kuparinen A, Garcia de Leaniz C, Consuegra S, Merilä J. 2009. Growth-History perspective on the decreasing age and size at maturation of exploited Atlantic salmon. *Marine Ecology Progress Series* **376**:245-252 DOI 10.3354/meps07789.

Kurita Y, Kjesbu OS. 2009. Fecundity estimation by oocyte packing density formulae in determinate and indeterminate spawners: theoretical considerations and applications. *Journal of Sea Research* **61**:188–196 DOI 10.1016/j.seares.2008.10.010.

Lombardo F, Baiata P, Oliveri A, Pignalosa P. 2016. Length/weight relationship for Bluefin tuna caught by longliners in central Mediterranean sea. *ICCAT Collective Volume of Scientific Papers* **72**(7):1815-1822.

Lombardo F, Baiata P, Pignalosa P, Api M, Maradonna F, Carnevali O. 2017. An update on the length-weight relationship for Bluefin tuna caught by longliners in the Mediterranean sea. *ICCAT Collective Volume of Scientific Papers* **73**(7):2333-2339.

Lutcavage ME, Brill RW, Skomal GB, Chase BC, Goldstein JL, Tutein J. 2000. Tracking adult North Atlantic bluefin tuna (*Thunnus thynnus*) in the northwestern Atlantic using ultra-sonic telemetry. *Marine Biology* **137**(2):347–358.

Lutcavage ME, Brill RW, Skomal GB, Chase BC, Howey PW. 1999. Results of pop-up satellite tagging of spawning size class fish in the Gulf of Maine: do North Atlantic bluefin tuna spawn in the mid-Atlantic?. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* **56**:173–177.

Macchi GJ, Barrera-Oro E. 1995. Histological study on the ovarian development of mackerel icefish (*Champscephalus gunnari*) from the south Georgia islands. *CCAMLR Science* **2**:35-49.

Mather FJ, Mason JM, Jones AC. 1995. Historical document: life history and fisheries of Atlantic bluefin tuna. *NOAA Technical Memorandum, NMFS-SEFSC-370*.

Medina A, Abascal FJ, Aragón L, Mourente G, Aranda G, Galaz T, Belmonte A, De La Serna JM, García S. 2007. Influence of sampling gear in assessment of reproductive parameters for bluefin tuna in the western Mediterranean. *Marine Ecology Progress Series* **337**:221–230.

Medina A, Abascal FJ, Megina C, García A. 2002. Stereological assessment of the

reproductive status of female Atlantic northern bluefin tuna during migration to Mediterranean spawning grounds through the Strait of Gibraltar. *Journal of Fish Biology* **60**:203–217 DOI 10.1006/jfbi.2001.1835.

Megalofonou P, Yannopoulos C, Damalas D, De Metrio G, Deflorio M, De La Serna JM, Macias D. 2005. Incidental catch and estimated discards of pelagic sharks from the swordfish and tuna fisheries in the Mediterranean sea. *Fishery Bulletin* **103**(4): 620-634.

Milton J, Bhat AA, Haniffa MA, Hussain SA, Rather IA, Al-Anazi KM, Hailan WAQ, Farah MA. 2017. Ovarian development and histological observations of threatened dwarf snakehead fish, *Channa gachua* (Hamilton, 1822). *Saudi Journal of Biological Sciences* **25**:149-153.

Morgan MJ, Murua H, Kraus G, Lambert Y, Marteinsdottir G, Marshall CT, O'Brien L, Tomkiewicz J. 2009. The evaluation of reference points and stock productivity in the context of alternative indices of stock reproductive potential. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* **66**:404–414 DOI 10.1139/F09-009.

Muhling BA, Lamkin JT, Roffer MA. 2010. Predicting the occurrence of Atlantic bluefin tuna (*Thunnus thynnus*) larvae in the northern Gulf of Mexico: building a classification model from archival data. *Fisheries Oceanography* **19**:526-539 DOI 10.1111/j.1365-2419.2010.00562.x.

Muhling BA, Lee S-K, Lamkin JT, Liu Y. 2011. Predicting the effects of climate change on bluefin tuna (*Thunnus thynnus*) spawning habitat in the Gulf of Mexico. *ICES Journal of Marine Science* **68**(6):1051–1062 DOI 10.1093/icesjms/fsr008.

Murua H, Kraus G, Saborido-Rey F, Witthames PR, Thorsen A, Junquera S. 2003. Procedures to estimate fecundity of marine fish species in relation to their reproductive strategy. *Journal of Northwest Atlantic Fishery Science* **33**:33-54.

Murua H, Motos L. 2006. Reproductive strategy and spawning activity of the European hake *Merluccius merluccius* (L.) in the Bay of Biscay. *Journal of Fish Biology* **69**:1288–1303 DOI 10.1111/j.1095-8649.2006.01169.x.

Mylonas CC, De La Gándara F, Corriero A, Belmonte-Ríos A. 2010. Atlantic Bluefin Tuna (*Thunnus Thynnus*) Farming and Fattening in the Mediterranean Sea. *Reviews in Fisheries*

Science **18(3)**:266-280 DOI 10.1080/10641262.2010.509520.

Nemerson D, Berkeley S, Safina C. 2000. Spawning site fidelity in Atlantic bluefin tuna, *Thunnus thynnus*: the use of size-frequency analysis to test for the presence of migrant east Atlantic bluefin tuna on Gulf of Mexico spawning grounds. *Fishery Bulletin* **98(1)**:118–126.

Ortega-García S, Abad-Uribarren A, Jakes-Cota U, Vélez-Arellano N. 2019. Histological evidence of Bluefin tuna (*Thunnus thynnus* Linnaeus, 1758) spawning in waters within the Mexican Exclusive Economic Zone in the Gulf of Mexico. *Marine Biology Research* DOI 10.1080/17451000.2019.1662448.

Ostertagová E. 2012. Modeling using polynomial regression. *Procedia Engineering* **48**:500-506 DOI 10.1016/j.proeng.2012.09.545.

Piccinetti C, Di Natale A, Arena P. 2013. Eastern Bluefin Tuna (*Thunnus thynnus*, L.) Reproduction and Reproductive Areas and Season. *ICCAT Collective Volume of Scientific Papers* **69(2)**:891-912.

Powers JE, Porch CE. 2004. Approaches to developing management procedures which incorporate mixing. *ICCAT Collective Volume of Scientific Papers* **56(3)**:1144-1152.

Ramírez-López K, Abad-Uribarren A. 2013. Análisis de la captura incidental del atún aleta azul (*Thunnus thynnus*) por la flota palangrera Mexicana en el Golfo de México, 1994-2011. *ICCAT Collective Volume of Scientific Papers* **69(2)**:1046-1056.

Ravier C, Fromentin JM. 2001. Long-term fluctuations in the eastern Atlantic and Mediterranean bluefin tuna population. *ICES Journal of Marine Science* **58**:1299–1317 DOI 10.1006/jmsc.2001.1119.

Ravier C, Fromentin JM. 2004. Are the long-term fluctuations in Atlantic bluefin tuna (*Thunnus thynnus*) population related to environmental changes?. *Fisheries Oceanography* **13(3)**:145-160 DOI 10.1111/j.1365-2419.2004.00284.x.

Richardson DE, Marancik KE, Guyon JR, Lutcavage ME, Galuardi B, Lam CH, Walsh HJ, Wildes S, Yates DA, Hare JA. 2016. Discovery of a spawning ground reveals diverse migration strategies in Atlantic bluefin tuna (*Thunnus thynnus*). *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **113(12)**:3299-3304 DOI 10.1073/pnas.1525636113.

Rivas LR. 1954. A preliminary report on the spawning of the western North Atlantic bluefin tuna (*Thunnus thynnus*) in the straits of Florida. *Bulletin of Marine Science-Miami* **4(4)**:302-322.

Rodríguez-Marin E, Ortiz M, Ortiz de Urbina JM, Quelle P, Walter J, Abid N, Addis P, Alot E, Andrushchenko I, Deguara S, Di Natale A, Gatt M, Golet W, Karakulak S, Kimoto A, Macias D, Saber S, Neves Santos M, Zarrad R. 2015. Atlantic Bluefin Tuna (*Thunnus thynnus*) Biometrics and Condition. *PLoS ONE* **10(10)**:e0141478 DOI 10.1371/journal.pone.0141478.

Rodríguez-Roda J. 1967. Fecundidad del atún, *Thunnus thynnus* (L.), de la costa sudatlántica de España. *Investigación Pesquera* **31**:35-52.

Rooker JR, Alvarado-Bremer JR, Block BA, Dewar H, De Metrio G, Corriero A, Kraus RT, Prince ED, Rodríguez-Marín E, Secor DH. 2007. Life History and Stock Structure of Atlantic Bluefin Tuna (*Thunnus thynnus*). *Reviews in Fisheries Science* **15**:265-310 DOI 10.1080/10641260701484135.

Rooker JR, Secor DH, De Metrio G, Schloesser R, Block BA, Neilson JD. 2008. Natal Homing and Connectivity in Atlantic Bluefin Tuna Populations. *Science* **322**:742-744 DOI 10.1126/science.1161473.

Rosenberg A, Cooper A, Maunder M, McAllister M, Methot R, Miller S, Porch C, Powers J, Quinn T, Restrepo V, Scott G, Seijo JC, Stefansson G, Walter J. 2013. Scientific examination of western Atlantic bluefin tuna stock-recruit relationships. *ICCAT Collective Volume of Scientific Papers* **69(2)**:1016-1045.

Saber S, Macías D, Ortiz de Urbina J, Kjesbu OS. 2015b. Stereological comparison of oocyte recruitment and batch fecundity estimates from paraffin and resin sections using spawning albacore (*Thunnus alalunga*) ovaries as a case study. *Journal of Sea Research* **95**:226–238.

Saber S, Ortiz de Urbina J, Gómez-Vives MJ, Macías D. 2015a. Some aspects of the reproductive biology of albacore *Thunnus alalunga* from the western Mediterranean Sea. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom* **95**:1705–1715.

Saber S, Macías D, Ortiz de Urbina J, Kjesbu OS. 2016. Contrasting batch fecundity estimates of albacore (*Thunnus alalunga*), an indeterminate spawner, by different laboratory

techniques. *Fisheries Research* **176**:76-85.

Salgado-Ugarte IH, Gómez-Márquez JL, Peña-Mendoza B. 2005. Métodos actualizados para análisis de datos biológico-pesqueros. México: FES-Zaragoza, Universidad Nacional Autónoma de México.

Salgado-Ugarte IH, Shimizu M, Taniuchi T, Matsushita K. 2000. Size frequency analysis by averaged shifted histograms and kernel density estimators. *Asian Fisheries Science* **13**:1-12.

Sanvicente-Añorve L, Salgado-Ugarte IH, Castillo-Rivera M. 2003. The use of kernel density estimators to analyze length-frequency distributions of fish larvae. In: Browman IH, Skiftesvik AB, ed. The big fish bang: Proceeding of the 26th annual larval fish conference. Bergen: Institute of Marine Research, 419-430.

Schaefer KM. 1996. Spawning time, frequency, and batch fecundity of yellowfin tuna *Thunnus albacares*, near Clipperton Atoll in the eastern Pacific Ocean. *Fishery Bulletin* **94**:98-112.

Scott GP, Turner SC, Grimes CB, Richards WJ, Brothers EB. 1993. Indices of larval bluefin tuna, *Thunnus thynnus*, abundance in the Gulf of Mexico; Modelling variability in growth, mortality, and gear selectivity. *Bulletin of Marine Science* **53**(2):912-929.

Sharpe DMT, Hendry AP. 2009. Life history change in commercially exploited fish stocks: an analysis of trends across studies. *Evolutionary Applications* **2**(3):260-275 DOI 10.1111/j.1752-4571.2009.00080.x.

Schismenou E, Somarakis S, Thorsen A, Kjesbu OS. 2012. Dynamics of de novo vitellogenesis in fish with indeterminate fecundity: an application of oocyte packing density theory to European anchovy, *Engraulis encrasicolus*. *Marine Biology* **159**:757-768 DOI 10.1007/s00227-011-1852-y.

Silverman BW. 1986. Density estimation for statistics and data analysis. London: Chapman & Hall.

Stokesbury MJW, Cosgrove R, Boustany A, Browne D, Teo SLH, O'Dor RK, Block BA. 2007. Results of satellite tagging of Atlantic bluefin tuna, *Thunnus thynnus*, off the coast of Ireland. *Hydrobiologia* **582**:91-97 DOI 10.1007/s10750-006-0552-y.

Storelli MM, Giacomini-Stuffler R, Storelli A, Marcotrigiano GO. 2005. Accumulation of mercury, cadmium, lead and arsenic in swordfish and bluefin tuna from the Mediterranean sea: A comparative study. *Marine Pollution Bulletin* **50**:993-1018.

Susca V, Corriero A, Deflorio M, Bridges CR, De Metrio G. 2001. New results on the reproductive biology of the Bluefin tuna (*Thunnus thynnus*) in the Mediterranean. *ICCAT Collective Volume of Scientific Papers* **52**:745-751.

Taylor NG, McAllister MK, Lawson GL, Carruthers T, Block BA. 2011. Atlantic Bluefin Tuna: A Novel Multistock Spatial Model for Assessing Population Biomass. *PLoS ONE* **6**(12):e27693 DOI 10.1371/journal.pone.0027693.

Teo SLH, Boustany A, Dewar H, Stokesbury MJW, Weng KC, Beemer S, Seitz AC, Farwell CJ, Prince ED, Block BA. 2007. Annual migrations, diving behavior, and thermal biology of Atlantic bluefin tuna, *Thunnus thynnus*, on their Gulf of Mexico breeding grounds. *Marine Biology* **151**:1–18 DOI 10.1007/s00227-006-0447-5.

Teo SLH, Boustany AM, Block BA. 2007. Oceanographic preferences of Atlantic bluefin tuna, *Thunnus thynnus*, on their Gulf of Mexico breeding grounds. *Marine Biology* **152**:1105–1119 DOI 10.1007/s00227-007-0758-1.

Thorsen A, Kjesbu OS. 2001. A rapid method for estimation of oocyte size and potential fecundity in Atlantic cod using a computer-aided particle analysis system. *Journal of Sea Research* **46**:295-308.

Villegas-Hernández H, Lloret J, Muñoz M. 2015. Reproduction, condition and abundance of the Mediterranean bluefish (*Pomatomus saltatrix*) in the context of sea warming. *Fisheries Oceanography* **24**(1):42-56 DOI 10.1111/fog.12091.

Walli A, Teo SLH, Boustany A, Farwell CJ, Williams T, Dewar H, Prince E, Block BA. 2009. Seasonal Movements, Aggregations and Diving Behavior of Atlantic Bluefin Tuna (*Thunnus thynnus*) Revealed with Archival Tags. *PLoS ONE* **4**(7): e6151. doi:10.1371/journal.pone.0006151.

Weibel ER, Gomez DM. 1962. Special communications: a principle for counting tissue structures on random sections. *Journal of Applied Physiology* **17**:343–348.

Weibel ER, Kristel GS, Scherle WF. 1966. Practical stereological methods for

morphometric cytology. *Journal of Cell Biology* **30**:23–38.

Wilson SG, Jonsen ID, Schallert RJ, Ganong JE, Castleton MR, Spares AD, Boustany AM, Stokesbury MJW, Block BA. 2015. Tracking the fidelity of Atlantic bluefin tuna released in Canadian waters to the Gulf of Mexico spawning grounds. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* **72**:1700–1717.

Wilson SG, Lutcavage ME, Brill RW, Genovese MP, Cooper AB, Everly AW. 2004. Movements of bluefin tuna (*Thunnus thynnus*) in the northwestern Atlantic Ocean recorded by pop-up satellite archival tags. *Marine Biology* **146**:409-423 DOI 10.1007/s00227-004-1445-0.

**CAPÍTULO IV. CONCLUSIÓN INTEGRADORA Y PERSPECTIVA A
FUTURO PARA ESTUDIOS REPRODUCTIVOS DE ATÚN ALETA AZUL
DEL ATLÁNTICO (*Thunnus thynnus*)**

En este estudio se caracterizó histológicamente, por primera vez, el estado reproductivo del atún aleta azul del Atlántico (*Thunnus thynnus*) capturado incidentalmente en aguas mexicanas, lo que reveló una nueva y extensa área de puesta en el sur del golfo de México. Adicionalmente, se evaluó el grado de similitud en el desarrollo y dinámica de los ovocitos entre esta fracción del stock occidental y el Mediterráneo, y se resolvió que no existen diferencias significativas en la producción de ovocitos por gramo de ovario entre ambas poblaciones analizadas, a pesar de que existe una marcada brecha en la estructura de tallas entre stocks.

Las tallas de los individuos de atún aleta azul del Atlántico capturados en el sur del golfo de México, correspondieron a adultos sexualmente maduros; la marcada ocurrencia temporal de esta especie, registrada de enero a abril en aguas mexicanas, está relacionada con un incremento en la temperatura del sur del golfo de México. El gradiente de temperatura observado entre enero y abril fue de 23 °C a 27 °C, el cual incluye la SST óptima para llevar a cabo la reproducción en atunes (~24-25 °C), y que se registró entre los meses de marzo y abril; el análisis histológico de las gónadas evidenció actividad reproductiva en estos meses (individuos capacitados para la puesta, en puesta y postpuesta).

Derivado de estos hallazgos, se confirma que el sur del golfo de México es área de puesta del atún aleta azul del Atlántico, la cual se suma a las dos previamente conocidas para el stock occidental, el norte del golfo de México y el Slope Sea, donde se ha reportado que el periodo reproductivo ocurre de abril a junio, y de junio a julio respectivamente; en consecuencia, se demuestra que el periodo de reproducción de esta especie para el stock occidental se extiende por cinco meses (de marzo a julio) y es mayor que en el stock oriental, que comprende tres meses (de mayo a julio). Esta amplitud en el periodo de desove y la diferencia temporal de cada una de las áreas de puesta del stock occidental está ligada a una progresión espacio-temporal de la SST óptima para la reproducción, la cual ocurre de forma latitudinal (de sur a norte), desde el sur del golfo de México al Slope Sea; una progresión espacio-temporal similar de la SST, se ha reportado en el mar Mediterráneo, con la diferencia de que en este ocurre de manera longitudinal.

Para los individuos de ambas poblaciones analizadas en este estudio, se observó que arriban a sus respectivas áreas de puesta en los meses de enero para el sur del golfo de México y marzo para el Mediterráneo, en un estado de inactividad reproductiva; sin embargo, es la

progresión espacio temporal de la SST óptima para la puesta la que determina el inicio de la actividad reproductiva, en marzo y mayo, para el sur del golfo de México y el Mediterráneo respectivamente. Asimismo, para ambos stocks, existe una relación entre la marcada abundancia de los individuos y el periodo de preparación para el desove, que ocurre cuando las gónadas se encuentran en desarrollo y capacitadas para la puesta, y que disminuye cuando inicia el desove.

La dinámica de desarrollo de los ovocitos para cada uno de los diferentes estados gonadales, exhibió el mismo patrón en las hembras del sur del golfo de México y del Mediterráneo. La densidad de ovocitos producidos por gramo de ovario (ovocitos \cdot g⁻¹) son iguales entre stocks para cada uno de los estados de madurez gonadal; particularmente los ovocitos A-Vit en hembras capacitadas para la puesta, presentaron valores de \sim 1273 y \sim 1355 huevos \cdot g⁻¹ de ovario, para las hembras del sur del golfo de México y del Mediterráneo respectivamente.

Determinar que la producción de ovocitos por gramo de ovario en ambos stocks es idéntica, y que además esta no se ve afectada por el tamaño de las hembras, representa un hallazgo notable, ya que la fecundidad parcial de cada hembra se encontrará únicamente influenciada por el peso absoluto de su ovario; debido a la relación que guarda el peso de la gónada con el peso del individuo, el único parámetro biológico que contribuye a las posibles diferencias en la fecundidad parcial entre stocks de atún aleta azul del Atlántico es la biomasa de reproductores, y en consecuencia, el potencial reproductivo de cada stock, estará determinado únicamente por la biomasa de la población desovante, así como la frecuencia de puesta y la extensión del periodo de desove, y no por la composición de tallas de cada stock.

Con la finalidad de enriquecer y afinar la información biológica que permita determinar el potencial reproductivo del stock occidental, las investigaciones futuras en el sur del golfo de México, deberían abordar por primera vez estudios de marcaje y seguimiento satelital en los individuos que arriban a esta área, para determinar si tienen participación en las otras dos áreas de puesta conocidas (norte del golfo de México y Slope Sea) y con esto tener una mejor aproximación de la biomasa reproductora del stock occidental, además de precisar la frecuencia de los desoves durante los periodos reproductivos.