

ESTIMACIÓN DEL CRECIMIENTO DEL ERIZO DE MAR *Paracentrotus lividus*

Toledo, H., Clemente, S. & *Hernández, J. C.

Grupo de investigación en Biodiversidad, Ecología Marina y Conservación (BIOECOMAC)
Departamento de Biología Animal, Edafología y Geología, Universidad de La Laguna

* Autor de correspondencia: joearher@ull.es

RESUMEN

Se presenta por primera vez un modelo matemático que define el crecimiento del erizo de mar *Paracentrotus lividus* en el medio natural, estimado mediante el marcaje con el fluorocromo calceína. El estudio se realizó en una plataforma intermareal situada en el norte de la isla de Tenerife mediante el marcaje de una población de erizos que fueron recapturados tras un año. Para determinar el modelo de crecimiento en los erizos marcados se midió, bajo luz UV, el crecimiento registrado en las demipirámides de la linterna de Aristóteles. Aplicando el modelo Logístico Dosis-Respuesta se obtuvieron resultados que indican que *P. lividus* es una especie longeva que presenta un crecimiento rápido en sus primeros años de vida y que éste disminuye drásticamente a partir de los cuatro años de edad. El estudio de la frecuencia de tallas indica que la población de erizos estudiada está conformada principalmente por erizos que oscilan entre los 1,3 a los 5 años, si bien también aparecen individuos jóvenes de menos de 1 año e individuos muy longevos, por encima de los 75 años de edad. Esta distribución de edades es indicativa de una población con una tasa de renovación elevada y una alta supervivencia.

Palabras clave: crecimiento, calceína, estructura de población, erizo de mar, modelo Logístico Dosis-Respuesta, *Paracentrotus lividus*.

ABSTRACT

A mathematical model that defines the growth rate of the sea urchin *Paracentrotus lividus* in the natural environment is presented for the first time, using tagging techniques with calcein fluorochrome. The study was conducted in a middle-intertidal rocky platform located in the north of the island of Tenerife by means of tagging a population of sea that were recaptured after one year. In order to determine the growth model, the growth in the demi-pyramids of Aristotle's lantern of marked sea urchins were measured under UV light. Applying the Logistic Dose Response model the results obtained indicate that *P. lividus* is a long-lived species that has a rapid growth in its early years and it decreases drastically from four years of age. The study of the size frequency of the population indicated that the studied sea urchin population is mainly composed of sea urchins ranging from 1.3 to 5 years of age, although

there were young individuals of less than 1 year and very old individuals of above 75 years old. This age distribution is indicative of a population with a high turnover rate and high survival.

Keywords: growth, calcein, population structure, sea urchin, Logistic Dose-Response Model, *Paracentrotus lividus*.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Generalidades sobre el erizo de mar *Paracentrotus lividus* (Lamarck, 1816)

El erizo de mar *Paracentrotus lividus* presenta una distribución geográfica que va desde Escocia e Irlanda, como límite Norte, hasta Canarias, como límite Sur, estando ausente en extensas zonas entre estos extremos (ALLAIN, 1972). Dentro de esta distribución, los archipiélagos del NE Atlántico, como Azores, Madeira y Canarias, así como la costa Mediterránea, presentan poblaciones importantes en relación a su abundancia y función en el ecosistema (ESPINO *et al.* 2006). En Canarias existe un gradiente de disminución de las densidades poblacionales desde las islas orientales hacia las occidentales, relacionado con el aumento de las temperaturas superficiales del mar. Este patrón viene condicionado, en gran medida, por la mayor producción primaria de las aguas orientales cercanas al afloramiento del noroeste africano, y que parece favorecer el desarrollo de extensas poblaciones de este erizo (GIRARD, 2008).

El extenso rango de distribución espacial de *P. lividus* comprende desde zonas someras de alta hidrodinámica a zonas calmadas, así como zonas profundas que superan los 150 m (BESTEIRO & URGORRI, 1988). Sin embargo, dentro de este amplio rango se distribuye principalmente hasta los 30 metros de profundidad, llegando a formar parches de altas densidades especialmente en los primeros 5 metros. Su hábitat presenta una gran variedad desde paredes rocosas a bosques de algas, así como zonas de grandes rocas. Sin embargo, suele encontrarse en mayor abundancia en sustratos rocosos duros de baja inclinación situados en zonas expuestas o semiexpuestas. *P. lividus* muestra un comportamiento gregario de escasa movilidad y la mayor parte de los estudios indican que presenta actividad nocturna evitando así a los depredadores de hábitos diurnos (VEGA & ROMERO, 2011). Durante el día permanecen en oquedades de su tamaño que excavan en la roca, reduciendo así el impacto directo del oleaje (CLEMENTE & HERNÁNDEZ, 2008). Esto, sumado a un característico fototropismo negativo de la especie (HYMAN, 1955), determina que se encuentre durante el día en zonas poco iluminadas como grietas o cubiertos con pequeñas piedras, fragmentos de algas, conchas, etc. A pesar del típico comportamiento gregario documentado para la especie, se ha observado una migración de individuos que puede ser desencadenada de forma voluntaria por la disponibilidad de alimentos o involuntaria por el arrastre producido por las corrientes o los temporales marítimos (VEGA & ROMERO, 2011).

P. lividus puede alcanzar una talla máxima de 70 mm de diámetro de caparazón (HYMAN, 1955) y presenta una gran variedad de tonalidades que van desde el blanco hasta el negro pasando por variaciones de marrón, verde, amarillo o lila, siendo esta última la coloración más común y de la cual deriva su epíteto específico *lividus*, (GONZÁLEZ *et al.* 2007). En cuanto a la alimentación, esta varía en relación a su edad, talla y localización aunque está conformada principalmente por algas. La actividad alimenticia de la especie es predominantemente nocturna (VEGA & ROMERO, 2011). Sus principales depredadores varían según el tamaño del erizo: los menores a 1 cm son depredados por doncellas (*Coris julis*) y

pejeverdes (*Thalassoma pavo*), los erizos entre 1 y 4 cm son comúnmente consumidos por sargos (*Diplodus sargus* y *D. cervinus*) y seifias (*Diplodus vulgaris*) y los más grandes (> 4 cm) son depredados por sargos de mayor tamaño (*Diplodus sargus* y *D. cervinus*) (SALA, 1997; CLEMENTE, 2007). A la presión de estos depredadores hay que añadir la intensa actividad extractiva que ejercen los humanos para su consumo directo o para su utilización como carnada.

1.2. El crecimiento en equinoideos

El crecimiento en los erizos de mar implica un aumento de masa y diámetro de los individuos mediante la producción de tejidos blandos y de las estructuras duras calcáreas. Este crecimiento no es lineal y se concentra en las primeras etapas de desarrollo. Tras estas primeras etapas del crecimiento, el erizo juvenil madura y comienza a centrar gran parte de sus energías en el desarrollo de las gónadas desacelerando notoriamente su crecimiento (EBERT, 2007).

El esqueleto de los equinoideos está formado por estructuras calcáreas que incluyen las espinas, las placas del caparazón unidas por elementos de colágeno y los elementos de la linterna de Aristóteles. Se ha demostrado que se pueden producir fenómenos de reabsorción ósea, siendo un fenómeno extendido en equinoideos y reportándose casos en la linterna de Aristóteles (MÄRKEL, 1979), que puede ser debida a la inanición o la disminución de la cantidad de alimentos en el medio (EBERT, 2007; EBERT *et al.* 2014). Estudios previos realizados en Cantabria han demostrado que el crecimiento de *P. lividus* es marcadamente estacional mostrando un crecimiento máximo en primavera y verano a consecuencia del aumento de temperatura (GONZÁLEZ, 2009). El aumento de temperatura conlleva una aceleración del metabolismo y un aumento de las concentraciones de magnesio lo que favorece el crecimiento de las estructuras calcáreas (EBERT, 2007). A partir de la maduración sexual se reduce la velocidad de crecimiento y produciendo diferencias significativas en las tasas de crecimiento entre erizos maduros e inmaduros (GONZÁLEZ, 2009).

En equinoideos, los primeros trabajos sobre estimaciones de crecimiento se realizaron a partir de la identificación de líneas de crecimiento en las placas del caparazón (MOORE, 1935). Las líneas de crecimiento se forman en las épocas de crecimiento somático y reproductivo pudiendo distinguirse líneas de alta y de baja densidad respectivamente. Las líneas de alta densidad se producen en épocas de crecimiento intenso y las de baja densidad en épocas de poco crecimiento somático relacionadas con la época reproductiva (LOZANO *et al.* 1995). El principal problema para el estudio de las líneas de crecimiento es que muchas aparecen demasiado próximas entre sí para poder diferenciarse con claridad. Además, durante épocas de estrés pueden formarse también líneas de crecimiento traslúcidas, lo que se traduce en una sobreestimación de la edad especialmente en los individuos de mayor tamaño (TURON *et al.* 1995). Además, la realización de comparaciones de los resultados obtenidos por métodos de estimación del crecimiento con marcadores químicos como la calceína y a partir de las líneas de crecimiento en una misma población de erizos ha permitido demostrar que estas últimas no son válidas para determinar la edad (HAAG *et al.* 2013).

Por todo esto y debido al lento crecimiento de los individuos de mayor tamaño de *P. lividus*, y de los equinoideos en general, se hace necesario el uso de métodos de marcaje y recaptura para poder estudiar los patrones de crecimiento en la naturaleza. Si bien, cada método tiene sus propias limitaciones por lo que una combinación de varios de ellos aumentará la fiabilidad de los resultados obtenidos. En general, los marcajes físicos se han ido abandonando paulatinamente debido al abaratamiento de las técnicas de marcaje químico y a que numero-

Los estudios han demostrado que los datos que aportan los primeros no son totalmente fiables, disminuyendo la tasa de supervivencia o incluso minimizando el crecimiento de los individuos. Entre los marcajes físicos podemos encontrar tubos de plástico que se insertan en las espinas de mayor tamaño, etiquetas insertadas en el caparazón mediante alambres de acero o monofilamento de nylon (DUGGAN & MILLER, 2001). Por último, se han desarrollado estudios mediante el uso de los PIT tags (Passive Integrated Transponder) basados en el magnetismo, sin embargo y a pesar de que los marcajes físicos son más fiables siguen afectando al crecimiento y a la mortalidad de los individuos (MORGAN *et al.* 2000; LAUZON-GUAY & SCHEIBLING, 2008).

En relación a los marcajes químicos, los más utilizados son la tetraciclina, que muestra una fluorescencia amarilla bajo luz ultravioleta (UV), y la calceína, con fluorescencia verde. Sin embargo, existen otros marcadores menos efectivos como la Complexona Alizarina azul, la Alizarina S roja o el Xilenol naranja. La tetraciclina y la calceína se unen a los iones de carbonato cálcico incorporándose al esqueleto durante la calcificación y señalando la talla de las estructuras duras en el momento del marcaje, lo que permite estimar el crecimiento experimentado por los individuos hasta el momento de su recaptura. Los primeros experimentos en equinodermos fueron realizados por KOBAYASHI & TAKI (1969), aunque fue SMITH (1980) quien descubrió, gracias a estudios en poblaciones de *P. lividus* precisamente, que los marcajes químicos permitían estudiar las estructuras de crecimiento y con ello la edad de los individuos. Para la realización de este trabajo hemos utilizado como marcador la calceína que destaca sobre la tetraciclina debido a que es menos tóxica, de más fácil absorción y posee más fluorescencia (HAAG *et al.* 2013). La principal ventaja de su uso es que permite realizar el marcaje de gran cantidad de individuos en poco tiempo, realizando baños con los individuos de menor tamaño o de forma inyectada en adultos. Además, permite detectar crecimientos nulos así como crecimientos de milímetros. Sin embargo, presenta ciertas desventajas como la necesidad de sacrificar a los individuos para la detección de la marca y el tedioso preparado de las muestras (EBERT, 2007).

1.3. *Paracentrotus lividus* como recurso pesquero

El consumo de sus gónadas convierten a *P. lividus* en un importante recurso económico y se ha desarrollado un importante comercio en países como Francia, principal consumidor de Europa, Irlanda, Portugal, Italia, Grecia y España (HAYA DE LA SIERRA, 1990). Como consecuencia de esta amplia y creciente demanda se han diezmado en gran medida las poblaciones atlánticas y mediterráneas de la especie desde los años 70, si bien se han desarrollado sistemas de cultivo como alternativa a las pesquerías (GONZÁLEZ *et al.* 2007). En España es notable la diferencia de consumo entre comunidades autónomas, entre las cuales destacan, en orden de importancia, Galicia, Andalucía, Cantabria y Asturias. Según datos de la FAO, Galicia tiene una explotación pesquera tan elevada que convierten a España en el mayor productor de crizo de Europa, y se presenta como ejemplo de buen manejo del recurso al haber desarrollado y puesto en práctica planes de regulación y explotación desde los años 90 (GONZÁLEZ *et al.* 2007). En Canarias la explotación de *P. lividus* se limita principalmente a su uso como carnada para nasas y para pesca recreativa, aunque no existe aún ninguna regulación específica, y se desconoce el estado actual de sus poblaciones.

Los trabajos realizados hasta la actualidad con *P. lividus* se han centrado en el estudio de los patrones de abundancia, la bioerosión, la reproducción y las relaciones tróficas. Sin embargo, los estudios de crecimiento disponibles se han basado en el análisis de progresión modal de las tallas (LOZANO *et al.* 1995) por lo que se hace imprescindible un estudio de

marcaje-reeaptura más concienzudo que estime de una manera más fiable el crecimiento de esta especie. En este sentido, con este estudio pretendemos establecer por primera vez un modelo de crecimiento de *P. lividus* que permita conocer en profundidad la biología fundamental de esta especie y poder realizar en un futuro una correcta gestión del recurso. Por ello, nos planteamos como objetivos concretos de este trabajo:

1. Evaluar la eficiencia del fluorocromo calceína como método de marcaje de estructuras calcáreas duras del erizo de mar *P. lividus* en el medio natural.
2. Establecer por primera vez un modelo de crecimiento para el erizo de mar *P. lividus* en Canarias.
3. Estudiar la estructura de la población de *P. lividus* en el área de estudio a fin de conocer su frecuencia de edades y la importancia de procesos de entrada de nuevos individuos en la población para mantener dicha estructura poblacional.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en un charco intermareal del bajío Finca El Apio en la costa de Valle Guerra (28R 0361972 3156410 UTM), en el municipio de San Cristóbal de La Laguna, Tenerife. El charco elegido albergaba una densa población de *P. lividus*.

Esta zona se caracteriza por ser una rasa costera con elevada exposición al oleaje. El charco estudiado posee unas dimensiones de 11,2 m de largo, 10 m de ancho y 2,2 m de profundidad, con una capacidad aproximada de 248 m³ de volumen de agua. La caracterización del charco revela que las especies algales más comunes son *Lobophora variegata*, *Cystoseira abies-marina*, *Stypocaulon scoparium*, *Zonaria tornnefortii* y *Canlacanthus* sp.

2.2. Marcaje

El marcaje con calceína (Fig. 1) se realizó el 2 de noviembre de 2012. Para ello se recolectó un total de 442 individuos de *P. lividus* que fueron medidos y marcados con el fluorocromo calceína. Se efectuó una única inyección de 2 ml por individuo a través de la membrana periestomial. Tras esto se realizaron medidas del ancho y alto del caparazón mediante el uso de calibradores digitales, con una precisión de 0,01 mm. Tras ser marcados y medidos los erizos fueron devueltos al charco.

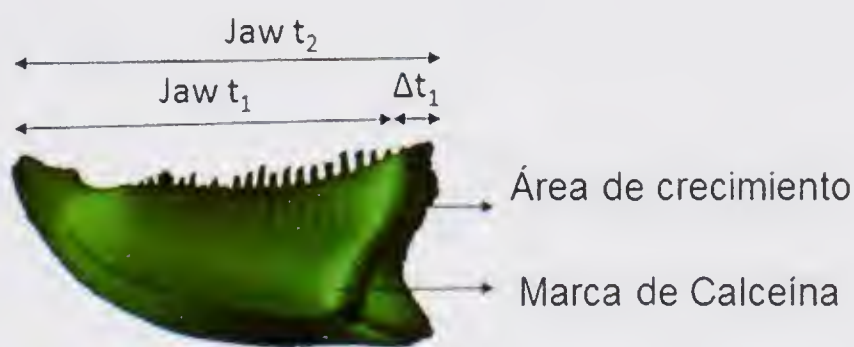


Figura 1.- Fotografía de una demipirámide de un diente de la linterna de Aristóteles marcado con calceína.

2.3. Recaptura y análisis de muestras

La fecha de recaptura fue el 5 de Noviembre de 2013, por lo que los erizos estuvieron en su hábitat natural 368 días tras el marcaje. Transcurrido este periodo se recolectaron 114

individuos que fueron trasladados al laboratorio donde se mantuvieron en cámaras frigoríficas hasta que se pudo proceder a la limpieza y análisis de las estructuras duras. La preparación de las muestras comenzó con la separación y numeración de cada ejemplar, seguidamente y mediante un calibrador digital se tomaron medidas del alto y ancho del caparazón. Posteriormente, y con ayuda de unas pinzas de disección y un bisturí, se extrajeron y conservaron las linternas de Aristóteles. Consecutivamente los ejemplares fueron separados en vasos numerados y sumergidos en una solución de hipoclorito de sodio a una concentración de 6% (lejía) durante 24 horas. El objetivo de este baño era eliminar por completo el tejido orgánico de las piezas esqueléticas. Una vez las muestras estuvieron limpias de tejidos blandos, se enjuagaron con agua dulce y se dejaron secar al aire otras 24 horas. Por último, se separó cada ejemplar en una bolsa hermética individual con su etiqueta identificativa correspondiente.

Posteriormente, y a fin de identificar los individuos marcados se inspeccionaron las demipirámides de cada uno de ellos. Para su estudio se fijó el diente a un portaobjetos con ayuda de plastilina dejando la superficie plana de la demipirámide paralela al portaobjetos y mirando hacia arriba (Fig. 1). La presencia de las marcas fue analizada utilizando una lupa-microscopio Nikon AZ100 Multizoom con un filtro de fluorescencia FITC: Ex. 482/35, 506 DM, Em. 536/40. Si se detectaba una marca en un diente se realizaban dos medidas: la longitud total del diente y la distancia de la marca a la base de la demipirámide (Fig. 1). Para realizar estas medidas se tomaba como referencia la escala del ocular, la cual había sido previamente calibrada en milímetros para cada aumento utilizado. Cabe destacar la importancia de tomar siempre las mismas referencias de medidas puesto que errores en la medición pueden llevar a conclusiones erróneas (EBERT *et al.* 2008). Los datos de todos los individuos marcados fueron introducidos en una hoja de Excel para su posterior tratamiento matemático.

2.4. Análisis matemático

La selección del modelo de crecimiento adecuado para estimar el crecimiento es un paso crucial en este tipo de análisis puesto que diferentes modelos conducirán a diferentes conclusiones. Varios modelos se han utilizado para describir el crecimiento de los erizo de mar, incluyendo los modelos de Gaussian, Gamma, Tanaka, Respuesta a la Dosis Logística, Richards, Bertalanffy, Gompertz y Logístico (ver Tabla 1 y Fig. 2).

Para este trabajo hemos utilizado el modelo de Respuesta a la Dosis Logística (ROGERS- BENNETT *et al.* 2003). Este modelo no asintótico es uno de los mejores que se ajusta a los datos de marcaje-recaptura de erizos de mar puesto que es específico para recoger la variación debida a los ejemplares grandes de crecimiento lento (EBERT, 2013), como los existentes en las poblaciones de *P. lividus*. Para poder aplicar el modelo obtuvimos en primer lugar el diámetro original (D_1) de los ejemplares marcados. Este valor se obtuvo hallando el crecimiento (D_D) que experimentó el caparazón desde el marcaje (D_1) hasta la recaptura (D_2) utilizando como punto de partida el crecimiento medido en la demipirámide y aplicando la siguiente fórmula:

$$D_D = \exp \text{ intercept} \times [(\text{Tamaño final del diente}^{\text{pendiente}}) - (\text{Tamaño inicial del diente}^{\text{pendiente}})]$$

Posteriormente restamos al diámetro final (D_2), el crecimiento (D_D) y obtuvimos el diámetro original del ejemplar (D_1). Por último, antes de aplicar la fórmula del modelo ajustamos las constantes (b y c) de la ecuación del modelo mediante SOLVER (Función de Excel) y minimizamos el error mediante el método de los Mínimos Cuadrados. Hallado el tamaño ini-

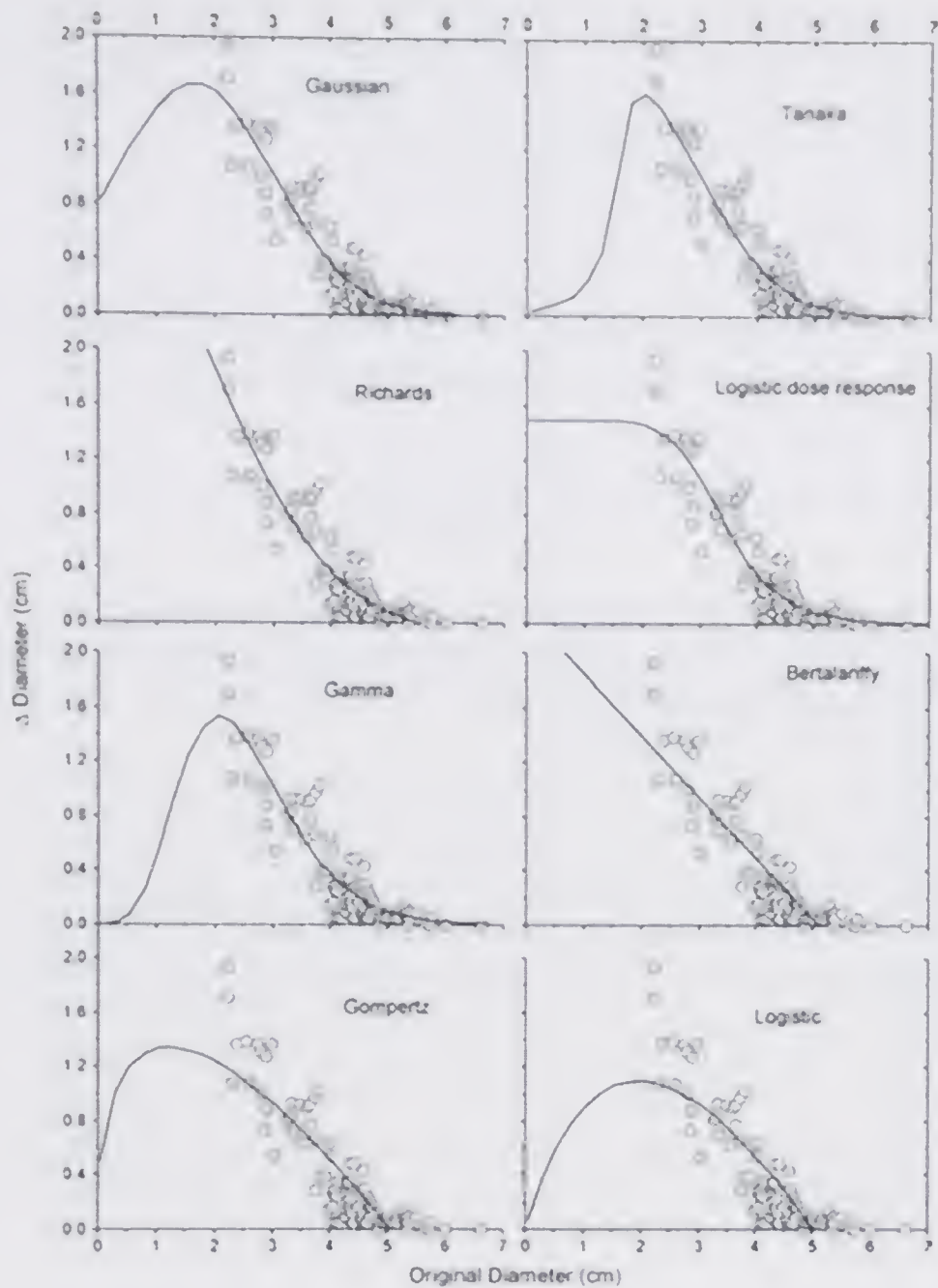


Figura 2.- Representación de las curvas de crecimiento para distintos modelos matemáticos. Los datos presentados corresponden a un estudio de crecimiento mediante marcaje y recaptura con el erizo de mar *Mesocentrotus franciscanus*. Figura tomada de EBERT (2013).

cial (D_1) y con los parámetros ajustados podemos obtener el crecimiento estimado (D_{est}), que variará en función del tamaño original del individuo, aplicando la fórmula del modelo de Logístico Dosis-Respuesta:

$$\Delta D = \Delta D_{max} / (1 + (D_1/b)^c)$$

Una vez hallado el crecimiento en diámetro que experimentó cada ejemplar en función de su tamaño podemos conocer la edad de los individuos. Para ello tomamos como edad 0 el erizo de menor diámetro de los capturados en el estudio (6,19 mm) y para el erizo de 1 año le atribuimos el diámetro inicial de caparazón del erizo recapturado más pequeño (22,57 mm),

cuyo incremento conocemos (17,6 mm). A partir del año 1 calculamos en primer lugar el incremento en diámetro que ocurre año tras año usando el modelo Logístico Dosis-Respuesta, que sumado al diámetro del año anterior nos dará el diámetro del erizo ese año. De este modo obtuvimos la gráfica que relaciona diámetro con edad.

2.5. Estructura de tallas-edad de la población

Por último, obtuvimos la estructura de tallas y edades de la población de erizos estudiada utilizando una gráfica de frecuencia de tallas o edades en cada caso.

3. RESULTADOS

El 2 de noviembre de 2012 se marcaron con calceína 442 ejemplares de *P. lividus*. Tras 368 días, el 5 de Noviembre de 2013, se realizó una nueva captura de 114 ejemplares de los cuales 14 resultaron ejemplares marcados. El porcentaje de recaptura de ejemplares marcados fue de un 12,28% (14 de 114 ejemplares).

El crecimiento en diámetro fue calculado a partir del crecimiento del diente. El coeficiente de determinación lineal (R^2) hallado resultó en un valor de 0,612 lo que indica que existe una buena relación lineal entre ambas variables (Fig. 3). Sin embargo, no es extrapolable para futuros estudios puesto que cambios de los parámetros del hábitat (condiciones ambientales, disponibilidad de alimentos, densidad de población,...) que controlan el crecimiento pueden modificar esta relación alométrica (EBERT, 2007; EBERT *et al.* 2014).

En relación al crecimiento observamos que el erizo recapturado de mayor tamaño (diámetro inicial del caparazón 52,15 mm) fue el ejemplar que presentó una menor variación del diámetro del caparazón, 1,28 mm. En contraposición, el erizo recapturado de menor tamaño (diámetro inicial del caparazón 22,57 mm), experimentó un incremento de 17,62 mm (Tabla 2).



Figura 3.- Relación alométrica entre el incremento en diámetro del caparazón y el incremento de la demipirámide de los individuos de *Paracentrotus lividus* marcados con calceína durante el estudio.

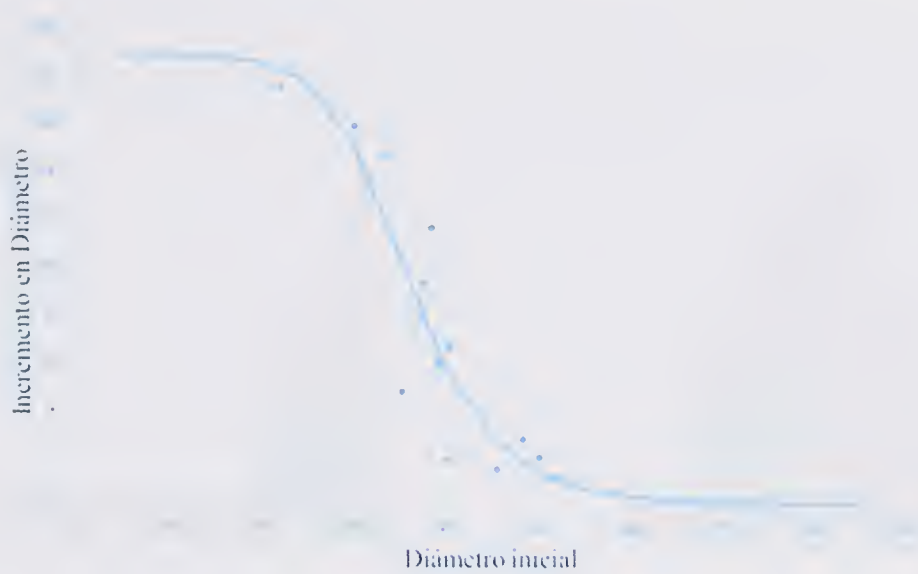


Figura 4.- Representación del incremento en diámetro del caparazón (mm) de *Paracentrotus lividus* en función del diámetro inicial para el periodo de un año según el modelo Logístico Dosis-Respuesta.

Mediante SOLVER (función de Excel) por Mínimos Cuadrados ajustamos el modelo Logístico Dosis-Respuesta a nuestros datos (Tabla 3), representando el crecimiento observado (D_D) y el crecimiento estimado (D_{est}) (Fig. 4). De esta forma, y gracias al modelo, conociendo el tamaño inicial de un ejemplar podemos saber el incremento que experimentará en un tiempo estimado de un año. De modo que un erizo de, por ejemplo, 10 mm de diámetro experimentará un incremento de 19 mm mientras que otro de 50 mm crecerá aproximadamente 2 mm.

Los datos obtenidos en el estudio también nos permiten calcular la edad de un erizo según su diámetro y de igual forma conociendo la estructura de tallas de una población de *P. lividus* establecer la estructura de edades de la misma. La Figura 5 nos permite ver claramente

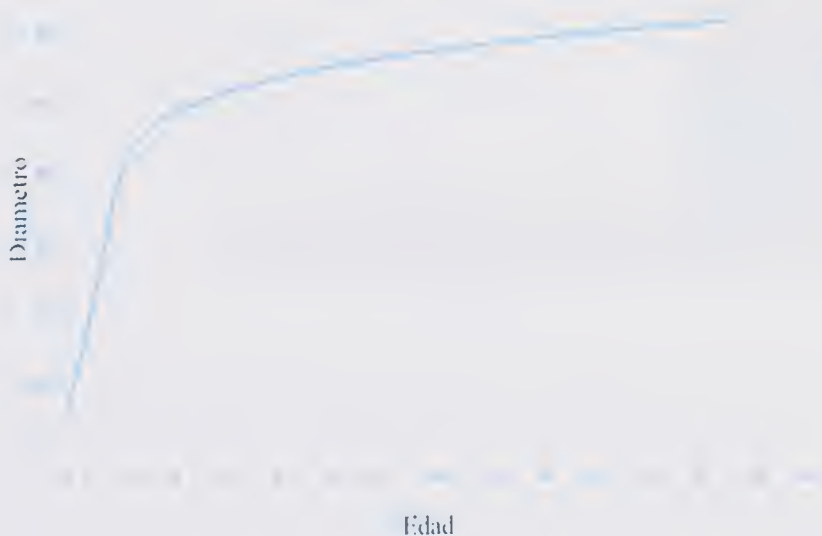


Figura 5.- Representación de la curva de crecimiento de *Paracentrotus lividus* según el modelo Logístico Dosis-Respuesta.

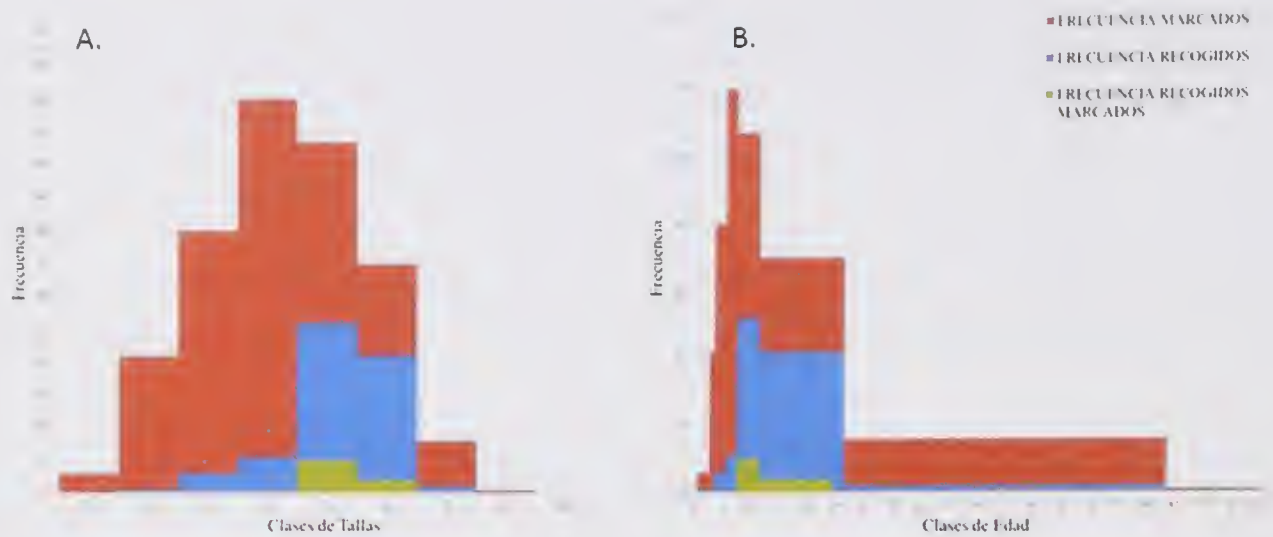


Figura 6.- A. Estructura en clases de tallas de la población de *Paracentrotus lividus* estudiada. Se distingue entre la frecuencia de tallas de la población inicialmente marcada, de la posteriormente recapturada y de la fracción de individuos recapturados que estaban marcados con calceína. **B.** Estructura en clases de edades de la población de *Paracentrotus lividus* estudiada. Se distingue entre la frecuencia de edades de la población inicialmente marcada, de la posteriormente recapturada y de la fracción de individuos recapturados que estaban marcados con calceína.

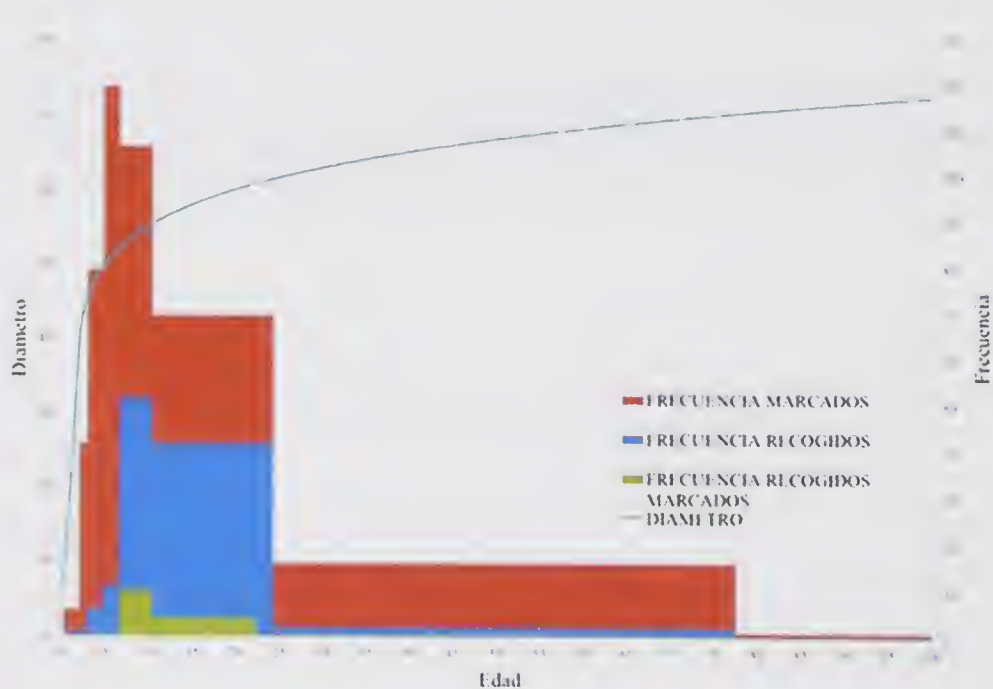


Figura 7.- Resumen de resultados obtenidos en el estudio de crecimiento de una población del crizo *Paracentrotus lividus* en Canarias. Representación de la curva de crecimiento en diámetro (mm) en función de la edad según el modelo de Respuesta a la Dosis Logística y de la estructura de la población en clases de edad. Se distingue entre la frecuencia de edades de la población inicialmente marcada, de la posteriormente recapturada y de la fracción de individuos recapturados que estaban marcados con calceína.

como el crecimiento en diámetro del caparazón es mucho más acusado en los 2 primeros años de vida de *P. lividus* tras los cuales el crecimiento se reduce considerablemente.

Por último, al conocer las tallas de la población podemos conocer su estructura y composición de tallas. Si nos fijamos en la Tabla 4 observamos que al clasificar los diámetros en clases de tallas algunas tienen frecuencias muchos mayores que otras. Vemos como dentro de los individuos marcados, el grueso de la población se encuentra entre los 30 y los 50 mm comprendiendo más del 50% de la población (Fig. 6A). Sin embargo, al estudiar el total de los individuos recogidos vemos que el grueso de la población, más del 80%, se concentra entre las tallas 40-60 mm (Fig. 6A). Por lo tanto, podemos deducir que la población ha madurado durante el año que estuvieron en el medio natural. Esto se puede comprobar fácilmente en las gráficas resultado (Fig. 6A) donde se observa que la estructura de los dos grupos no coinciden y la moda se ve desplazada hacia tallas superiores al comparar la frecuencia de marcados frente a la de recogidos.

Al transformar las clases de tallas de la población en clases de edad (Fig. 6B) podemos estudiar la estructura de la población desde otra perspectiva. De nuevo, podemos observar como el grueso de la población recolectada se encuentra entre los 2 y los 20 años de edad.

Finalmente, a modo de resultado final la Figura 7 muestra el patrón de crecimiento en diámetro de *P. lividus* en función de la edad y la estructura de la población estudiada en clases de edad, observándose la mayor tasa de crecimiento de los individuos juveniles (~hasta 10 mm de diámetro de caparazón). Esta tasa de crecimiento va disminuyendo de forma paulatina con la edad de los erizos, de forma que individuos de más de 50 mm de diámetro crecen a un ritmo muy lento, aunque incluso los individuos de mayor edad registrados (~80 años) siguen creciendo.

4. DISCUSIÓN

Los resultados muestran que el crecimiento de *P. lividus* no es lineal y es función de la edad de los individuos. Así, los individuos jóvenes experimentan un crecimiento exponencial y los adultos un crecimiento muy lento, por lo que encontrarnos con individuos de diámetros grandes, por encima de los 50 mm, es indicativo de poblaciones muy longevas y bien conservadas puesto que los individuos mayores no han desaparecido de la población. En nuestro caso la población presentó una estructura con un rango de tallas grande, sobre todo en el año de marcaje. Esto es indicativo de poblaciones bien conservadas ya que los adultos tienen la posibilidad de permanecer en el hábitat natural por muchos años.

Durante la recaptura hubo una escasez de individuos jóvenes y adultos que puede deberse a diversos motivos, como la extracción de individuos debido a la alta presión de depredación antrópica, en el caso de los adultos. Y la escasez de juveniles durante el segundo año de estudio puede deberse a que no se dieron las condiciones propicias para el reclutamiento durante ese año o a un menor esfuerzo de recolecta durante la recaptura.

Uno de los puntos flojos del presente estudio es debido al bajo porcentaje de recaptura. Existen, al menos, cuatro posibles explicaciones:

1. La emigración de ejemplares marcados hacia otras zonas. No obstante, como ya hemos comentado, *P. lividus* se caracteriza por su comportamiento gregario de escasa movilidad. Su tasa de movimiento es baja y aunque se pueden producir movimientos hacia zonas cercanas suelen volver a sus cavidades. Sin embargo, se ha

observado que tienden a realizar migraciones hacia zonas más profundas cuando alcanzan los 40 mm de diámetro (aproximadamente 3 años de edad) (OURÉNS, 2013). Lo que podría explicar el bajo número de individuos adultos de gran talla recapturados en nuestro estudio.

2. Bajo porcentaje de éxito del marcaje con calceína. Aunque el uso de la calceína está bastante extendido y numerosos estudios avalan su éxito, ciertas variables ambientales y biológicas (temperatura, cantidad de alimento, reproducción, concentración de magnesio,...) afectan al proceso de calcificación, y por lo tanto al marcaje de las diferentes especies (EBERT, 2007) pudiendo haber afectado en cierta medida al éxito del marcaje en nuestro caso. Este problema de éxito de marcaje de *P. lividus* no está resuelto y requiere de estudios adicionales de laboratorio como el realizado por RODRÍGUEZ *et al.* (en prensa).
3. Mortalidad durante el proceso de marcaje. Se ha demostrado que las concentraciones utilizadas en este estudio no tienen ningún efecto nocivo sobre el crecimiento y la supervivencia de los erizos (HAAG *et al.* 2013; RODRÍGUEZ *et al.* en prensa). Sin embargo, debemos remarcar que debido a las dificultades para la extracción de alguno de los erizos de sus cavidades éstos sufrieron daños, lo que pudo afectar a los posteriores índices de recaptura.
4. Alta tasa de mortalidad de ejemplares en el medio por extracción pesquera durante el periodo de crecimiento. La recolección humana de erizos puede haber afectado en gran medida a la población marcada ya que, aun siendo una localidad relativamente remota y aislada de grandes núcleos urbanos, es muy frecuentada por pescadores furtivos que los utilizan como carnada. Siendo esta la explicación más plausible para la baja tasa de recaptura de *P. lividus*.

Las principales conclusiones que se extraen de este estudio son las siguientes:

- Se presenta por primera vez un modelo de crecimiento para el erizo de mar *Paracentrotus lividus* (Lamarck, 1816) en Canarias. La especie presenta un crecimiento con una fase inicial de crecimiento exponencial hasta aproximadamente los cuatro años de edad (~50 mm de diámetro), seguida de un periodo ilimitado de crecimiento lento.
- El fluorocromo calceína es un método fiable para el marcaje de estructuras calcáreas duras permitiendo estudiar las estructuras de crecimiento y con ello la edad de los individuos de *Paracentrotus lividus*.
- La curva del modelo Logístico Dosis-Respuesta predice correctamente el crecimiento de los erizos estudiados. La población presenta un crecimiento que se ajusta a la siguiente expresión matemática:

$$\Delta D = \Delta D_{max} / (1 + (D^1/b)^c)$$

Con un valor ΔD_{max} de 18,8 mm para $t = 1$ año.

- El estudio de la estructura de poblaciones muestra que la población de erizos estudiada está conformada principalmente por individuos de entre 1,3 y 5 años de edad (entre 30 y 50 mm de diámetro). Además, los resultados evidencian que la pobla-

ción ha madurado durante el periodo de estudio sin que se haya producido una entrada de nuevos individuos, lo que se ha traducido en una disminución brusca del tamaño de la población.

A pesar de la novedad de estos resultados y su relevancia para el estudio de la dinámica de las poblaciones de *P. lividus* en Canarias, se requiere una mayor representación de la población por lo que se hace necesario la mejora del porcentaje de recaptura en futuros estudios. Además, los resultados extraídos han sido obtenidos del estudio de una única población en unas condiciones ambientales específicas, por ello, se hacen necesarios más estudios de estimaciones de crecimiento y estructuras de población de *P. lividus* en otros puntos de Canarias.

5. AGRADECIMIENTOS

Estamos en deuda con todos los integrantes del grupo de investigación en Biodiversidad, Ecología Marina y Conservación por el tiempo y la dedicación empleados para el desarrollo de este trabajo de Grado en Biología.

6. BIBLIOGRAFÍA

- ALLAIN, J.Y. 1972. Structure des populations de *Paracentrotus lividus* (Lamarck, 1816) (Echinodermata: Echinoidea) soumises a la peche sur les côtes nord de Bretagne. *Revue travaux des pêches maritimes*. 39: 171-212.
- BESTEIRO, C. & V. UGORRI. 1988. *Inventario dos equinodermos de Galicia (Echinodermata)*. Edición do Castro, A coruña, España, 51 pp.
- CLEMENTE, S. & J.C. HERNÁNDEZ. 2008. Influence of wave exposure and habitat complexity in determining spatial variation of the sea urchin *Diadema* aff. *antillarum* (Echinodermata: Diadematidae) populations and macroalgal cover (Canary Islands – Eastern Atlantic Ocean). *International Journal of Tropical Biology and Conservation*. 56: 229-254.
- CLEMENTE, S. 2007. Evolución de las poblaciones del erizo *Diadema* aff. *antillarum* en Canarias y valoración de la depredación como factor de control. Tesis Doctoral. Universidad de La Laguna. España.
- DUGGAN, R.E. & R.J. MILLER. 2001. External and internal tags for the green sea urchin. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*. 258:115-122.
- EBERT, T.A. 2007. Chapter 6: Growth and Survival of Postsettlement Sea Urchins. En: *Edible Sea Urchins: Biology and Ecology*. Ed. Lawrence J.M. Corvallis, OR, USA, 95-134pp.
- EBERT, T.A. 2013. Use of diverse growth models to estimate annual survival from mean size in a sample: examples using sea urchins. *Cahiers d Biologie Marine*. 54: 605-613.
- EBERT, T.A., J.C. HERNÁNDEZ & S. CLEMENTE. 2014. Annual reversible plasticity of feeding structures: cyclical changes of jaw allometry in a sea urchin. *Proceedings of the Royal Society B: Biological sciences*. doi: 10.1098/rspb.2013.2284
- EBERT, T.A., M.P. RUSSELL, G. GAMBÀ & A. BODNAR. 2008. Growth, Survival and Longevity estimates for the rock-boring sea urchin *Echinometra lucunter lucunter* (Echinodermata, Echinoidea) in Bermuda. *Bulletin of Marine Science*. 82:381-403.

- ESPINO, F., A. BOYRA, F. TUYA & R. HARUON. 2006. Guía Visual de Especies Marinas de Canarias. Oceanográfica, Las Palmas de Gran Canaria, España, 194-197pp.
- GIRARD, D. 2008. Cultivo y Gestión del erizo de mar. Informe de actividades realizadas en Tenerife. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.
- GONZÁLEZ, J.M. 2009. Contribución al conocimiento del erizo de mar *Paracentrotus lividus* (Lamarck, 1816) en el mar Cantábrico: ciclo gonadal y dinámica de poblaciones. Tesis Doctoral. Universidad de Cantabria. España.
- GONZÁLEZ, J.M., J.C. CANTERAS & F.J. ANSORENA, 2007. El erizo de mar común (*Paracentrotus lividus*) en Cantabria: Estudio para una explotación sostenible. *Loxostella*. 5: 58-67.
- GUIDETTI, P. 2004. Consumers of sea urchins, *Paracentrotus lividus* and *Arbacia lixula*, in shallow Mediterranean rocky reef. *Helgoland Marine Research*. 58: 110-116.
- HAAG, N., M.P. RUSSELL, J.C. HERNÁNDEZ & N. DOLLAHON. 2013. Assessing fluorescence-staining efficacy in the green sea urchin, *Strongylocentrotus droebachiensis* (Müller, 1776). *Cahiers de Biologie Marine*. 54: 625-631.
- HAYA DE LA SIERRA, D. 1990. Biología y Ecología de *Paracentrotus lividus* en la zona intermareal. Tesis Doctoral. Universidad de Oviedo. España.
- HYMAN, L.H. 1955. *Echinodermata; The Coelomate Bilateria Vol IV. The Invertebrates*. McGraw-Hill. Nueva York. Estados Unidos de América. 763pp.
- KOBAYASHI, S. & J. TAKI. 1969. Calcification in sea urchins I: A tetracycline investigation of growth of the mature test in *Strongylocentrotus intermedius*. *Calcified Tissue Research*. 4: 210-223.
- LAUZON-GUAY, J. & R.E. SCHEIBLING. 2008. Evaluation of passive integrated transponder (PIT) tags in studies of sea urchins: caution advised. *Aquatic Biology*. 2: 105-112.
- LOZANO, J., J. GALERA, S. LÓPEZ, X. TURON, C. PALACÍN & G. MORERA. 1995. Biological cycles and recruitment of *Paracentrotus lividus* (Echinodermata: Echinoidea) in two contrasting habitats. *Marine Ecology Progress Series*. 122: 179-191.
- MÄRKEL, K. 1979. Structure and growth of the cidaroid socket-joint lantern of Aristotle of non-cidaroid regular echinoids (Echinodermata, Echinoidea). *Zoomorphologie*. 94: 1-32.
- MOORE, H.B. 1935. A comparison of the biology of *Echinus esculentus* in different habitats. *Journal of the Marine Biological Association of the UK*. 20: 52-54
- MORGAN, L.E., L.W. BOTSFORD, S.R. WING & B.D. SMITH. 2000. Spatial variability in growth and mortality of the red sea urchin, *Strongylocentrotus franciscanus*, in northern California. *Canarian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. 57: 980-992.
- OURÉNS, R. 2013. Estrategia vital y dinámica poblacional del erizo *Paracentrotus lividus*. Tesis Doctoral. Universidad de La Coruña. España.
- RODRÍQUEZ, A., J.C. HERNÁNDEZ & S. CLEMENTE. En prensa. Efficiency of calcein tagging on juveniles of the sea urchins *Diadema affricanum* and *Paracentrotus lividus*. *Marine Ecology*.
- ROGER-BENNET, L., D.W. ROGERS, W.A. BENNETT & T.A. EBERT. 2003. Modeling red sea urchin (*Strongylocentrotus franciscanus*) growth using six growth functions. *Fishery Bulletin*. 101: 614-626.
- SALA, E. 1997. Fish predators and scavengers of the sea urchin *Paracentrotus lividus* in protected areas of the North-West Mediterranean Sea. *Marine Biology*. 129: 531-539.

- SMITH, A.B. 1980. Stereom microstructure of the echinoid test. *Special Papers In Palaeontology*. 25: 1-81.
- TURON, X., G. GIRIBET, S. LÓPEZ & C. PALACÍN. 1995. Growth and population structure of *Paracentrotus lividus* (Echinodermata: Echinoidea) in two contrasting habitats. *Marine Ecology Progress Series*. 122: 193-204.
- VEGA, W. & V. ROMERO. 2011. Patrón de distribución espacial de *Paracentrotus lividus*. *Anales Universitarios de Etología*. 5: 21-30.

Tabla 1.- Modelos matemáticos utilizados para el estudio del crecimiento en erizos de mar.

Modelo	ΔD vs Tamaño inicial
Gaussian	$\Delta D = \Delta D_{max} e^{-(Dt-D\infty)^2} / 2\sigma^2$
Gamma	$\Delta D = K e^{-Dt/\lambda} D^{\alpha-1}$
Tanaka	$\Delta D = Dt + \ln [2G + 2\sqrt{G^2 + fa}] / \sqrt{f}$
Respuesta a la Dosis Logística	$\Delta D = \Delta D_{max} / [1 + (Dt/b)^c]$
Richards	$\Delta D = -Dt + D\infty(1 - e^{-K\Delta t})^{-n}$
Bertalanffy	$\Delta D = (D\infty - Dt)(1 - e^{-K\Delta t})$
Gompertz	$\Delta D = -Dt + D\infty(Dt/D\infty)e^{-K\Delta t}$
Logistic	$\Delta D = -Dt + D\infty / (1 - (1 - D\infty/Dt) + e^{-K\Delta t})$

Tabla 2.- Resumen de datos de los individuos de *Paracentrotus lividus* marcados y recapturados en el estudio. Se señala en gris los ejemplares que presentaron una menor y mayor variación de diámetro.

Código del erizo.	Talla diente recaptura	Crecimiento del diente	Talla inicial del diente	Diámetro recaptura (D2)	Diámetro inicial (D1)	Variación de diámetro (DD)	Crecimiento estimado (Dest)	Error de estimación
5	11,6	0,24	11,36	53,43	52,15	1,28	1,02	0,07
13	9,72	1,55	8,17	45,54	37,46	8,08	8,26	0,03
23	10,19	1,80	8,39	47,31	37,89	9,42	7,84	2,49
32	8,82	0,93	7,90	40,2	35,42	4,78	10,34	30,86
36	8,4	3,50	4,90	40,19	22,57	17,62	18,42	0,63
38	9,54	1,15	8,39	45,25	39,25	6,00	6,60	0,37
42	9,17	1,30	7,87	47,34	40,60	6,74	5,51	1,52
44	10,15	2,25	7,90	50,34	38,60	11,74	7,18	20,79
55	10,41	0,28	10,13	47,15	45,65	1,50	2,65	1,32
78	9,63	0,38	9,25	52,2	50,19	2,01	1,35	0,43
79	9,75	3,10	6,65	46,38	30,39	15,99	15,13	0,74
97	11,65	2,80	8,85	48,67	33,85	14,82	11,96	8,17
108	11,1	0,53	10,58	51,27	48,47	2,80	1,74	1,12
109	9,21	0,37	8,84	42,28	40,37	1,91	5,69	14,24

Tabla 3.- Parámetros del modelo de crecimiento de la Respuesta de Dosis Logística para el erizo *Paracentrotus lividus*, ajustados mediante SOLVER por el método de Mínimos Cuadrados.

Dmax	18,846332
b	36,3007459
c	7,90248918

Tabla 4.- Número y porcentaje (entre paréntesis) de ejemplares marcados y recapturados del erizo de mar *Paracentrotus lividus* presentes en cada una de las clases de tallas-edad. Se incluye la frecuencia de recaptura para dichas clases de tallas- edades. Se encuentran señaladas en gris las clases que mayor frecuencia relativa de individuos acumularon.

Clases de tallas (mm)	Clases de edad (años)	Frecuencia de marcados	Frecuencia de recogidos	Frecuencia de recogidos marcados
0 - 10	0 - 0,5	6 ($\leq 1\%$)	0	0
10 - 20	0,5 - 0,8	42 (10%)	1 ($\leq 1\%$)	0
20 - 30	0,8 - 1,3	80 (18%)	6 (5%)	0
30 - 40	1,3 - 2	120 (27%)	11 (10%)	0
40 - 50	2 - 5	107 (24%)	52 (46%)	10 (71%)
50 - 60	5 - 20	70 (16%)	42 (37%)	4 (29%)
60 - 70	20 - 76	16 (4%)	2 (2%)	0
70 - 80	76 - 131	1 ($< 1\%$)	0	0
Total ejemplares		442	114	14