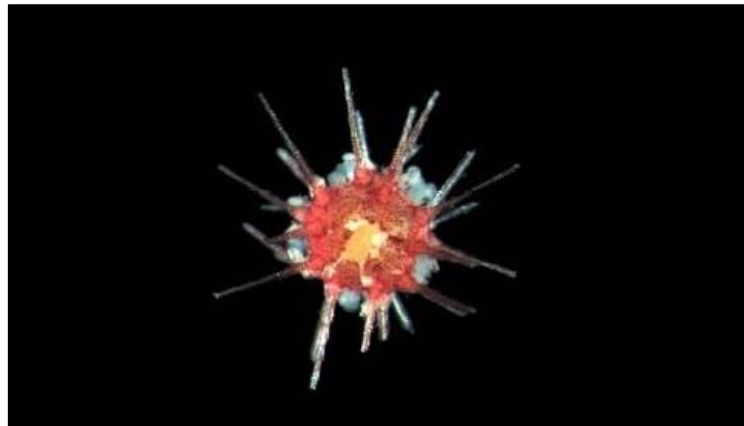


Departamento de Biología Animal, Edafología y Geología

Marine Community Ecology and Conservation

Asentamiento larvario del erizo de mar *Diadema africanum* (Rodríguez et al., 2013), post-mortalidad masiva de 2018.

Larval settlement of the sea urchin *Diadema africanum* (Rodríguez et al., 2013), after the mass mortality of 2018.



Trabajo de Fin de Grado

Abel Méndez Álvarez

Tutorizado por José Carlos Hernández y Sara González Delgado

Grado en Biología. Junio 2021

ÍNDICE

1. RESUMEN	3
2. ABSTRACT	3
3. INTRODUCCIÓN	4
4. OBJETIVO	6
5. MATERIAL Y MÉTODOS	7
Estudio del asentamiento del erizo de mar <i>Diadema africanum</i>	7
Análisis estadístico	11
6. RESULTADOS	12
Estudio del asentamiento mensual de 2020.....	12
Comparación temporal anual y relación con la temperatura	13
7. DISCUSIÓN	14
8. CONCLUSIONES	17
9. CONCLUSIONS	18
10. AGRADECIMIENTOS	18
11. BIBLIOGRAFÍA	19

1. RESUMEN

La mortalidad masiva de organismos marinos supone un problema cada vez más acuciante. El erizo de mar *Diadema africanum* ha sufrido en dos ocasiones la merma de sus poblaciones en la zona Este del océano Atlántico, desde las islas Canarias hasta Madeira. Éste es un herbívoro de gran relevancia ecológica, responsable de la alternancia de dos comunidades bentónicas como son los blanquizales y bosques de algas. Actualmente, las denominadas “tormentas asesinas” han sido relacionadas con los dos eventos de mortalidad masiva que han sido registrados en el Atlántico Este. En el presente estudio analizamos el asentamiento larvario de *D. africanum* en la isla de Tenerife tras sufrir sus poblaciones una reducción del 93% debida al último evento de mortalidad masiva registrado en 2018. Se utilizaron unos colectores artificiales específicos para estimar el asentamiento de equinoideos que fueron ubicados en los fondos rocosos de varias localidades de la isla de Tenerife. El análisis de los datos puso de manifiesto que dicho evento de mortalidad no comprometió el éxito reproductivo de la especie, ya que las larvas continúan asentándose con normalidad. Este resultado ha sido inesperado y plantea nuevas cuestiones como: ¿qué población de erizos está manteniendo ese nivel tan elevado de asentamiento? ¿son poblaciones de zonas más profundas o de otras localidades con mayor densidad? ¿cómo es la dinámica de corrientes de las costas de la Isla que favorece su asentamiento? ¿cuál es la estrategia reproductiva que han utilizado para contrarrestar esa disminución tan drástica de sus poblaciones? Con un escenario submarino cada vez más variable, el seguimiento del asentamiento de *D. africanum* es crucial.

2. ABSTRACT

The massive mortality of marine organisms is an increasingly pressing problem. The sea urchin *Diadema africanum* has suffered on two occasions the decline of its populations in the eastern part of the Atlantic Ocean, from the Canary Islands to Madeira. This is an herbivore of great ecological relevance, responsible for the alternation of two benthic communities such as urchin-grazed barren grounds and macroalgal beds. Currently, the so-called “killer storms” have been related to the two mass mortality events that have been recorded in the East Atlantic. In the present study we analyse the larval settlement of *D. africanum* on the island of Tenerife after its populations suffered a 93% reduction due to the last mass mortality event recorded in 2018. Specific artificial

collectors located on the rocky bottoms of various locations on the island of Tenerife were used to estimate the settlement of echinoids. The data analysis revealed that this mortality event did not compromise the reproductive success of the species, since the larvae continue to settle normally. This result has been unexpected and raises new questions such as: Which sea urchin's population is maintaining such a high level of settlement? Are those populations from deeper areas or from other locations with higher density? How is the dynamic of currents on the island's coasts that favors its settlement? What is the reproductive strategy that they have used to counteract this drastic decline in their populations? With an increasingly variable underwater scenario, monitoring the settlement of *D. africanum* is crucial.

3. INTRODUCCIÓN

Los eventos de mortalidad masiva producidos por patógenos suponen un problema acuciante en la actualidad (Lafferty et al., 2004; Burge et al., 2014). Los organismos marinos, tales como los erizos de mar, son huéspedes ideales para diferentes parásitos. Entre ellos se encuentran las amebas en erizos del género *Diadema* y *Strongylocentrotus* (Scheibling & Hatcher, 2007; Hernández et al., 2020), los nemátodos en *S. droebachiensis* (Scheibling & Hatcher, 2007) o los trematodos en *Paracentrotus lividus* (Boudouresque & Verlaque, 2013), además de otros patógenos, como bacterias de los géneros *Vibrio*, *Flavobacterium* o *Pseudomonas* (Wang et al., 2013; Clemente et al., 2014). Su enfermedad y posterior muerte no solo perjudica la distribución y abundancia de las poblaciones de las especies afectadas, sino que también puede generar efectos de cascada trófica que produzcan alteraciones a nivel ecosistémico (Ward & Lafferty, 2004). Las islas Canarias destacan por presentar una alternancia de sistemas o comunidades marinas estables donde el erizo de mar *Diadema africanum* (Rodríguez, Hernández, Clemente & Coppard, 2013) juega un papel ecológico muy importante (Hernández et al., 2008). Por un lado, el ramoneo intenso de estos erizos herbívoros genera zonas caracterizadas por la ausencia de macroalgas erectas, denominadas blanquiales; por otro, en aquellas zonas donde los erizos no se han asentado, la comunidad se ve dominada por diferentes macroalgas, formando lo que se denomina bosques de algas (Hernández et al., 2008).

Si bien, debido a la sobrepesca, la depredación sobre esta especie de erizo de mar en los blanquiales canarios es tan baja que no altera el tamaño de sus poblaciones

(Clemente et al., 2007), los eventos de mortalidad masiva pueden ser, en cambio, relevantes para mediar la transición entre estas comunidades alternativas (Hernández et al., 2008). Tras la reducción parcial o la total desaparición de las poblaciones de este erizo de mar, los bosques de algas rebrotan. Sin embargo, los equinodermos mencionados son capaces de repoblar y ramonear nuevamente la zona por medio de la migración de adultos desde zonas más profundas o a través del asentamiento de sus larvas planctónicas de morfología “*Echinopluteus transversus*” (Feehan et al., 2012; Hernández et al., 2020).

Entre los posibles responsables del incremento de la frecuencia de estos eventos de mortalidad, encontramos desde causas relacionadas con el clima como tormentas o el calentamiento de los océanos, hasta la propia presión antrópica, que puede favorecer la expansión de enfermedades en el medio marino (Clemente et al., 2014). Estudios realizados en la última década, apoyan la hipótesis de las denominadas “tormentas asesinas”, encontrándose involucrados en dichos fenómenos las poblaciones de erizos de mar, los patógenos y las tormentas tropicales invernales (Scheibling & Hennigar, 1997; Feehan et al., 2012), procedentes del sur / suroeste en el caso de Canarias (Hernández et al., 2020). La falta de datos de referencia acerca de la mayoría de las enfermedades que sufren los organismos marinos, dificulta y limita nuestros conocimientos sobre cómo afectan a largo plazo y con qué intensidad (Feehan & Scheibling, 2014). No obstante, actualmente se ha demostrado gracias al estudio del fluido celómico de *D. africanum* enfermos que, entre los patógenos epizoóticos, la ameba *Paramoeba branchiphila* (Feehan et al., 2013), es la principal responsable de diezmar las poblaciones de estos erizos, dando pie posteriormente a la entrada de ciertos patógenos oportunistas como el *Vibrio alginolyticus* y otras bacterias (Dyková et al., 2011; Clemente et al., 2014; Hernández et al., 2020).

Las “tormentas asesinas” suponen, pues, un fenómeno cada vez más frecuente que influye y favorece la paramoebiasis, entendiéndose este término como cualquier enfermedad causada por amebas del género *Paramoeba* (Feehan et al., 2012; Nowak & Archibald, 2018). Las amebas son organismos bentónicos que habitan en ambientes arenosos estables (Dyková et al., 2005; Nowak & Archibald, 2018), como los presentes en las costas sureste y suroeste de las islas Canarias. Las tormentas remueven el sedimento, aumentando la cantidad de amebas en la columna de agua y desplazándolas hacia los fondos rocosos donde se encuentran los erizos de mar. Además, la propia deposición del sedimento puede causar heridas en la epidermis de los equinodermos en

cuestión. Una vez las amebas comienzan a dañar tanto la epidermis del lado oral, como las placas ambulacrales del erizo de mar, se acelera la infección y facilita a otros microorganismos patógenos el acceso a través de los poros ambulacrales (Hernández et al., 2020).

Debido a este fenómeno, en el este del océano Atlántico, en los archipiélagos de Canarias y Madeira, se han producido dos eventos importantes de mortalidad masiva del erizo *D. africanum*: uno entre los meses de marzo y abril del año 2010 y otro en febrero de 2018, coincidiendo con dos tormentas denominadas Xynthia y Emma, respectivamente (Hernández et al., 2020). En el primero, se produjo una reducción general de las poblaciones del 65% con respecto a la densidad previa al evento de mortalidad, afectando sobre todo a las costas sureste y suroeste de las islas de ambos archipiélagos (Clemente et al., 2014). Tras estudiar el asentamiento de los erizos seis meses después del evento en las islas de La Palma y Tenerife, se comprobó que parte de las poblaciones de *D. africanum* sobrevivieron y demostraron una pronta recuperación, lo que sugiere que la “tormenta asesina” no comprometió el éxito reproductivo de la especie (Clemente et al., 2014). En el segundo evento, las poblaciones madeirenses del erizo de mar *D. africanum* sufrieron una disminución del 90%, con una rápida recuperación en tan solo seis meses (Gizzi et al., 2020). Centrándonos en las islas Canarias, tuvo lugar una merma general de las poblaciones de *D. africanum* del 93.2% en Tenerife y del 93.1% en la Palma, en comparación a las densidades existentes antes del evento de mortalidad (Hernández et al., 2020).

4. OBJETIVO

Con el presente trabajo, se pretende estudiar el asentamiento larvario de las poblaciones actuales del erizo de mar *Diadema africanum* en dos localidades diferentes de la costa de Tenerife (Islas Canarias). El objetivo principal consiste en analizar los datos de asentamiento actuales y compararlos con datos previos al evento de mortalidad masiva de 2018 con el fin de determinar los efectos de tal evento sobre el pool larvario y la recuperación de las poblaciones de *D. africanum*.

5. MATERIAL Y MÉTODOS

Estudio del asentamiento del erizo de mar *Diadema africanum*

El asentamiento de las poblaciones del erizo de mar *Diadema africanum* ha sido monitoreado desde agosto hasta octubre de 2020 en la isla de Tenerife (Islas Canarias). Las postlarvas de erizos fueron recolectadas en las localidades de Boca Cangrejo (-16.31429627, 28.4061537) y La Jaca (-16.46111758, 28.12087153) (Figura 1). En este sentido, a pesar de que, en cómputo, el asentamiento de los erizos fue estudiado durante tres meses consecutivos (agosto, septiembre y octubre), queremos señalar que, en La Jaca, sólo se obtuvo muestras entre septiembre y octubre, dada la desaparición del material de la zona de estudio en los meses restantes.

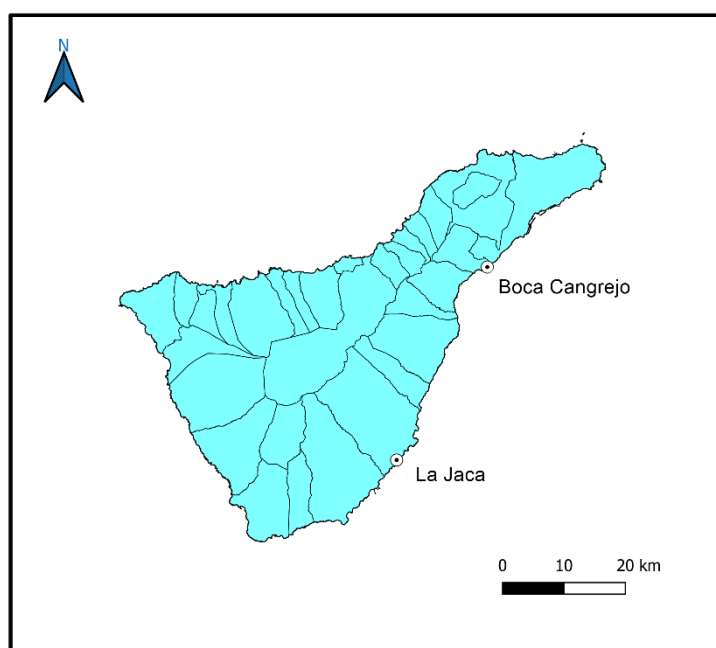


Figura 1. Localidades de estudio en las costas de Tenerife (Islas Canarias).

Para el estudio del asentamiento larvario de *D. africanum* procedimos a recolectar postlarvas y juveniles tempranos empleando colectores artificiales (Hernández et al., 2006; Balsalobre et al., 2016) durante el período anual de asentamiento. Este periodo va desde agosto a noviembre de cada año (Hernández et al., 2010). Hemos definido asentamiento como la aparición mensual de nuevos individuos del erizo de mar *D. africanum*. Cada colector es producto de la modificación de la técnica empleada por Keesing y colaboradores en 1993, consistiendo en un saco de malla de 2 m² con 50 bolas plásticas o “biobolas” de 4 cm de diámetro, originariamente utilizadas como biofiltros de

peceras (Figura 2A). Los colectores constaban asimismo de dos cuerdas, una en la parte superior atada a una botella de plástico y otra en la inferior con una manguera, de tal forma que podían ser anclados al sustrato marino a la vez que mantenían flotabilidad, suspendidos en la columna de agua a una profundidad de aproximadamente 4 ó 5 metros (Figura 2B y Figura 3).

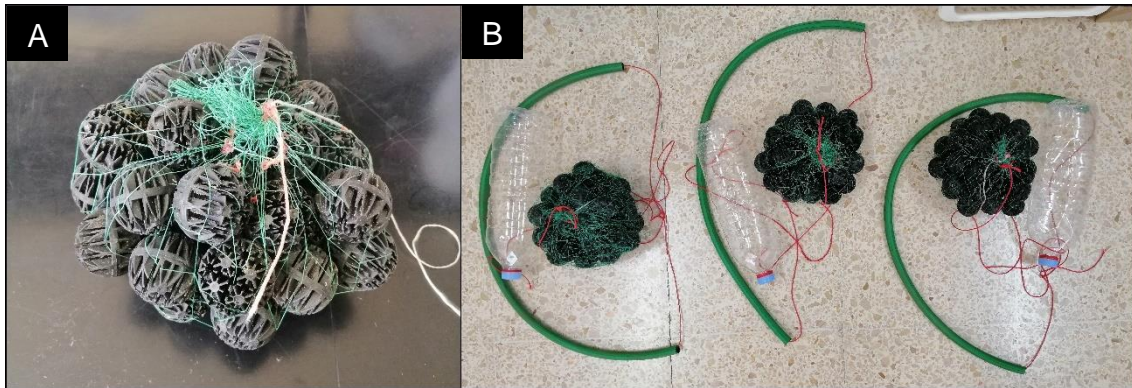


Figura 2. A) Detalle del saco de malla con “biobolas”. B) Colectores preparados para su inmersión y anclaje en las zonas de muestreo.

En cada zona de estudio, fueron mensualmente anclados mediante buceo con botella tres colectores a unos 25 metros de distancia entre sí, realizándose tres réplicas espaciales. A la hora de recuperar los colectores, se optó por introducirlos en bolsas plásticas y, a su vez, en cajas de plástico, asegurando el mantenimiento de la integridad de las muestras. Finalmente, cada colector fue debidamente limpiado, obteniendo las muestras deseadas y analizando su contenido por medio de una lupa binocular Leica EZ4.



Figura 3. Colector en la zona de estudio.

Una vez en el laboratorio, seguimos el protocolo de Hernández et al., 2006. Las bolas de plástico eran extraídas del saco de malla correspondiente y depositadas en la misma caja que contenía la bolsa con el colector, atendiendo siempre a que no quedaran organismos adheridos en la propia bolsa o en las redes del saco (Figura 4A). Seguidamente, cada una de las bolas debía ser lavada con agua a presión a fin de que todas las postlarvas y juveniles de erizo u otros organismos cayeran en la caja de plástico (Figura 4B). Para ello, se empleó una sulfatadora de 5 litros de volumen (Figura 4C). En aquellos casos en los que se encontraron animales fuertemente adheridos a la bolsa o las bolas, se usaron unas pinzas para su extracción. Las bolas ya examinadas, asimismo, fueron acumuladas en otro recipiente para su reutilización (Figura 4D).

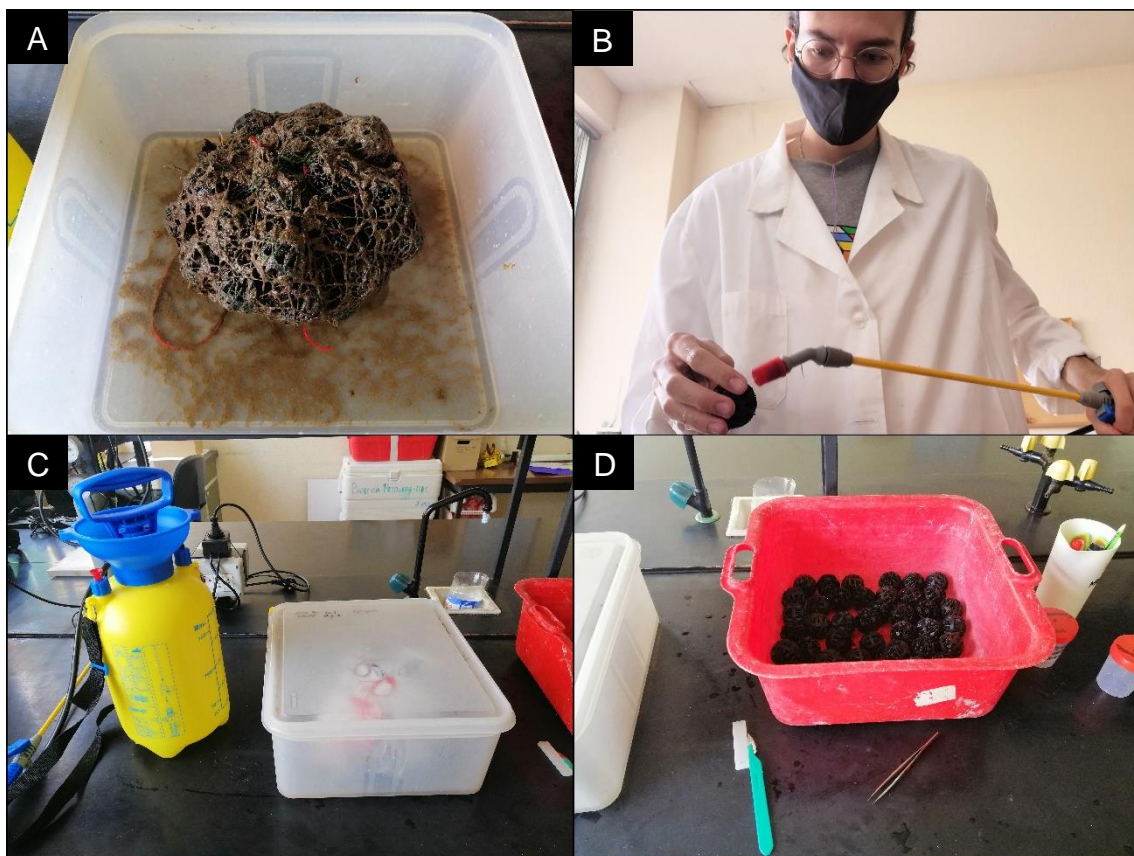


Figura 4. A) Detalle del colector tras ser recuperado de la zona de muestreo. B) Proceso de lavado a presión. C) Sulfatadora y caja empleada para contener la bolsa con el colector. D) “Biobolas” dispuestas en otro recipiente tras su lavado a presión con la sulfatadora.

Tras limpiar debidamente las bolas del colector en cuestión, procedimos a retirar el exceso de agua de la caja de plástico con una pequeña manguera, tratando de no afectar al sedimento, dado que contenía los organismos que se habían asentado en el colector. A continuación, se hacía pasar el contenido del recipiente a través de un tamiz de malla de

200 micras. De esta manera, se lograba retener las postlarvas de *D. africanum*, dado que suelen medir $718 \pm 54 \mu\text{m}$ (Hernández et al., 2005). El sedimento filtrado fue depositado en un bote de muestra, relleno con etanol y etiquetado para su análisis en la lupa binocular (Figura 5).



Figura 5. Botes con la muestra final, proveniente del filtrado del lavado del colector.

Finalmente, se realizó un trillado de las muestras. Haciendo uso de pinzas, se tomaba el sedimento del bote de muestra a analizar y se depositaba en una placa, añadiendo un poco de etanol. Por medio de la lupa, se procedió a observar y separar los organismos por grupo animal en tubos independientes. Para la correcta identificación de las larvas de erizo de mar, atendimos a la descripción realizada por Hernández y colaboradores en 2005 (Figura 6).

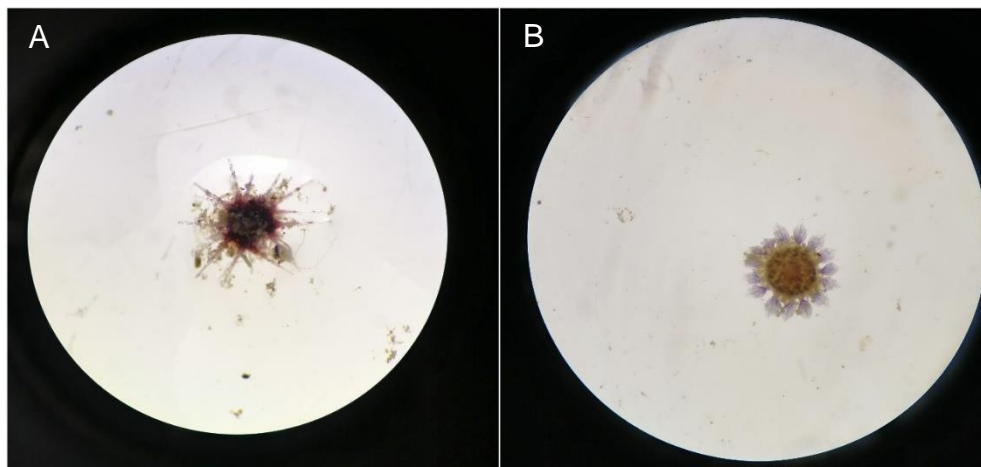


Figura 6. A) Detalle de juvenil temprano de *Diadema africanum* recuperado de un colector. B) Detalle de juvenil temprano de *Arbacia lixula* recuperado de un colector.

Análisis estadístico

A partir de los datos obtenidos tras el estudio de las muestras en el laboratorio, se procedió a evaluar las diferencias mensuales en el asentamiento de los erizos *Diadema africanum*. Sólo se escogieron los datos de la localidad de Boca Cangrejo por ser esta la única localidad en la que se tomaron muestras durante los tres meses de manera continua; en La Jaca solo se consiguió recolectar datos durante un mes. Se realizó un análisis de la varianza con permutaciones (PERMANOVA), empleando el software PRIMER 6 & PERMANOVA + v.1.0.1. (Anderson & Braak, 2003). Para ello, se tomó el factor “Mes”, siendo este tratado como un factor fijo con 3 niveles (“Agosto”, “Septiembre” y “Octubre”). Se usaron distancias euclídeas, 4999 permutaciones y se acordó significación cuando el p-valor fue < 0.05 (Anderson, 2004). El término significativo en el modelo se examinó utilizando comparaciones por pares *a posteriori* por permutaciones (Anderson, 2004). Siempre que no hubo suficientes permutaciones posibles para una prueba razonable, se obtuvieron p-valores corregidos mediante extracciones aleatorias de Monte Carlo de la distribución de permutación asintótica (Anderson & Robinson, 2003). Para apoyar este análisis, se realizó un gráfico donde se mostró el asentamiento/m² por mes en la localidad de Boca Cangrejo.

Posteriormente, se realizó una comparación histórica de asentamiento/m² medio. Para ello, se elaboró simplemente otro gráfico de medias a fin de comparar las abundancias medias (\pm SE) de erizos de mar recién asentados en Boca Cangrejo y La Jaca, atendiendo a nuestros resultados para el año 2020 y a los obtenidos por Hernández et al. (2010) y Clemente et al. (2014) para los años 2004 a 2007 y 2010, respectivamente. Dada la cercanía de las localidades de la Jaca y Abades (localidad muestreada en años anteriores), se consideraron como una misma localidad para su comparación. Asimismo, se hizo un gráfico de la temperatura media (°C) del agua en el mes de septiembre (años 2004, 2005, 2006, 2007, 2010 y 2020). Este dato fue tomado a través de www.puertos.es (última entrada el 14 de abril de 2021), con el objetivo de determinar si el asentamiento de los erizos anual se correlaciona con la temperatura. Se tomó el mes de septiembre por ser este el mes con mayor asentamiento, coincidiendo con el período con las temperaturas más altas registradas durante todo el año.

6. RESULTADOS

Estudio del asentamiento mensual de 2020

Durante los meses de agosto, septiembre y octubre de 2020, las larvas de *D. africanum* se asentaron en mayor o menor medida en los colectores dispuestos en la localidad de Boca Cangrejo. En el mes de octubre, concretamente, sólo se recuperó uno de los tres colectores debido a la desaparición de los dos restantes. En La Jaca, en cambio, y por el mismo motivo mencionado anteriormente, sólo se obtuvo muestras para el mes de septiembre. No obstante, el asentamiento por metro cuadrado de los erizos fue mayor en la localidad de La Jaca que en la de Boca Cangrejo en septiembre (Tabla 1).

Tabla 1. Asentamiento por metro cuadrado de larvas de *Diadema africanum* durante los meses de agosto, septiembre y octubre de 2020 en las dos localidades de muestreo, Boca Cangrejo y La Jaca.

Localidad	Mes 2020	Larvas de <i>D. africanum</i>	Asentamiento/m ²
Boca Cangrejo	Agosto	10	5
Boca Cangrejo	Agosto	2	1
Boca Cangrejo	Agosto	1	0.5
Boca Cangrejo	Septiembre	35	17.5
Boca Cangrejo	Septiembre	46	23
Boca Cangrejo	Septiembre	20	10
Boca Cangrejo	Octubre	2	1
La Jaca	Septiembre	57	28.5
La Jaca	Septiembre	23	11.5
La Jaca	Septiembre	104	52

El análisis PERMANOVA del asentamiento de *D. africanum* según el mes mostró una interacción significativa en el factor “Mes” (Tabla 2A). Las comparaciones por pares *a posteriori* encontraron diferencias significativas entre los meses de agosto y septiembre (Tabla 2B), destacando este último mes por presentar un pico de asentamiento larvario notable (Figura 7).

Tabla 2. A) Resultados del PERMANOVA unifactorial evaluando las diferencias en el asentamiento/m² de *Diadema africanum* entre los niveles del factor fijo “Mes” (“Agosto” “Septiembre” y “Octubre”). B) Comparaciones por pares *a posteriori* para el factor significativo “Mes” (* p < 0.05).

(A) Source of variation	df	SS	MS	Pseudo-F	p (MC)
Mes (2020)	2	1671.1	835.57	9.2386	0.0334*
Residual	4	361.77	90.443		
Total	6	2032.9			
(B) Pairwise analyses	t			p (MC)	
Agosto, Septiembre	3.9682			0.02*	
Agosto, Octubre	0.418			0.7184	
Septiembre, Octubre	2.1487			0.1744	

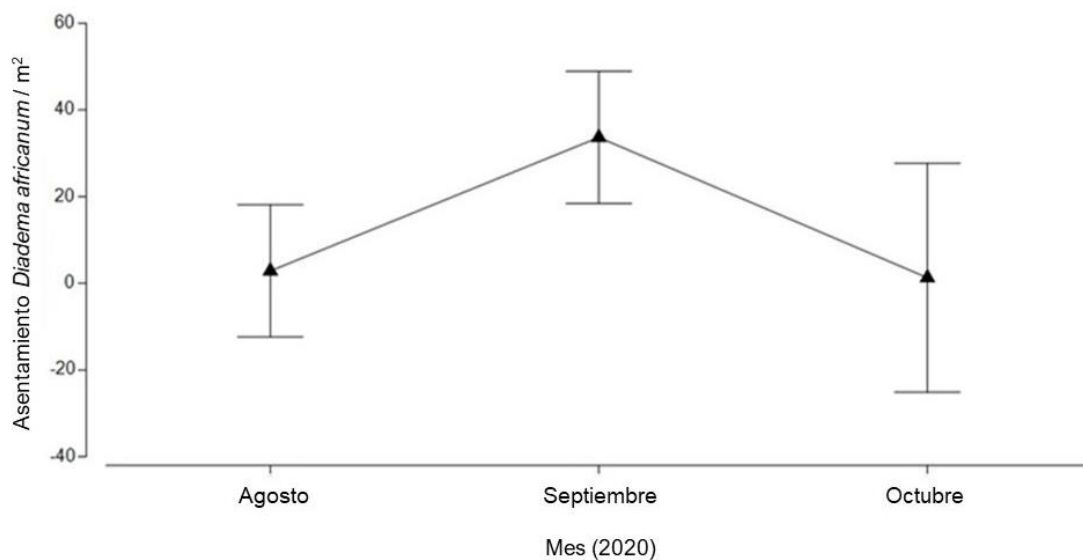


Figura 7. Diagrama de medias de asentamiento/m² de *D. africanum* de los tres meses muestreados en la localidad de Boca Cangrejo.

Comparación temporal anual y relación con la temperatura

El asentamiento larvario de *D. africanum* ha ido variando a lo largo de los años, encontrando diferencias según la localidad de muestreo. En Abades/La Jaca, el asentamiento siempre ha resultado ser mucho mayor que en Boca Cangrejo. Cabe destacar que se observa una tendencia anual oscilante en el sentido de que, por ejemplo, en el año 2004, el asentamiento/m² de los erizos de mar fue mayor que al año siguiente,

disminuyendo, pues, en 2005, para volver a aumentar en 2006, y así sucesivamente. A pesar de los eventos de mortalidad masiva ocurridos, el gráfico muestra un gran asentamiento larvario en 2010 y otro en 2020, sobre todo en la localidad de Abades/La Jaca, por lo que podemos afirmar que estos eventos no han afectado al reclutamiento larvario de *D. africanum*. Atendiendo a la temperatura media de septiembre y siendo este mes tomado como referencia por ser aquel en el que se produce el pico de asentamiento larvario de la especie de erizo de mar que nos compete, vemos que también existen oscilaciones anuales de temperatura. No obstante, a partir de 2007, en el que se registraron las temperaturas más bajas (23,21°C), se observa un aumento en la temperatura media (Figura 8).

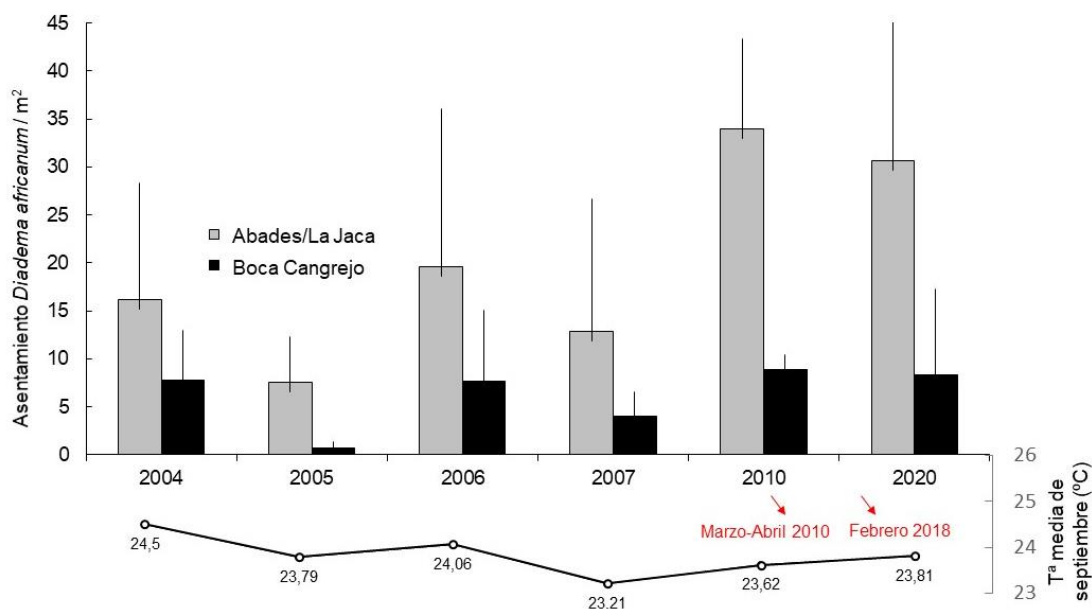


Figura 8. Abundancias medias (\pm SE) de erizos de mar recién asentados en 2 localidades de estudio en Tenerife, islas Canarias. Se muestran las tasas de asentamiento de 6 años (antes de los eventos de mortalidad: 2004, 2005, 2006, 2007; después de los eventos de mortalidad: 2010, 2020). Datos de Hernández et al. (2010) para los años 2004 a 2007 y de Clemente et al. (2014) para el año 2010. La fecha de los eventos de mortalidad ha sido señalada mediante flechas rojas. Se ha tomado asimismo la temperatura media del mes de septiembre para los años 2004, 2005, 2006, 2007, 2010 y 2020 a través de www.puertos.es (última entrada el 14 de abril de 2021).

7. DISCUSIÓN

El presente estudio registra y analiza el asentamiento del erizo de mar *Diadema africanum* en la isla de Tenerife, tras un segundo evento de mortalidad masiva. Del mismo

modo que ocurre para otras especies de equinodermos como *Strongylocentrotus droebachiensis*, el asentamiento larvario del erizo *Diadema* se produce durante los meses de verano, cuando la temperatura del mar está en o cerca del máximo anual (Balch & Scheibling, 2000). Concretamente, tal y como sucede siempre, se ha dado hacia finales de verano y principios de otoño, comprendiendo los meses de agosto, septiembre y octubre. Datos previos muestran que este periodo de asentamiento tiene lugar poco después del periodo de desove, momento en el cual el índice gonadal está decreciendo tras haber alcanzado su pico entre los meses de abril y junio (Hernández et al., 2006; Hernández et al., 2010; Hernández et al., 2020). Se ha comprobado además que el evento de mortalidad masiva acaecido a principios de 2018 no ha comprometido el éxito reproductivo de las poblaciones de *D. africanum*, encontrando un pico de asentamiento en el mes de septiembre de magnitud similar a los registrados en años anteriores.

Hernández y colaboradores, en 2010, ya señalaron una fuerte variabilidad temporal y espacial en el asentamiento de esta especie, lo cual se ve reiterado atendiendo a nuestros resultados. Por una parte, hemos observado que el asentamiento/m² de *D. africanum* difiere entre años consecutivos. Por otra, este asentamiento siempre ha sido mayor en la zona de Abades y La Jaca, ubicada al sureste de la isla, superando con creces al obtenido en la localidad de Boca Cangrejo, que se localiza más al norte a lo largo de la vertiente este de Tenerife. Parece que las corrientes o las temperaturas de cada zona pueden estar jugando un papel clave aquí. Queremos señalar que la zona de la Jaca y Abades presenta unas aguas más calmadas que Boca Cangrejo, lo que parece estar jugando a favor del asentamiento de *Diadema* en esta zona (Hernández et al., 2010).

Desde hace un par de décadas, se reconoce ampliamente que las tasas de desarrollo larvario de los erizos de mar se ven afectadas por la temperatura, aunque hasta hace poco sólo se disponían de datos para una especie dentro del género *Diadema* (*D. antillarum*: Amy, 1983; Eckert, 1998). Como ya se comentó anteriormente, las oscilaciones anuales de temperatura coinciden con las oscilaciones anuales en el asentamiento/m² de *D. africanum*, de tal forma que, a mayores temperaturas, mayor asentamiento. Recientemente, la correlación entre ambos factores ha sido demostrada para la especie que nos concierne. A partir de los experimentos de Hernández y colaboradores (2020), se concluyó que las larvas de *D. africanum* se desarrollan más rápidamente a temperaturas más altas y probablemente tengan un período planctónico más corto.

La larva “*E. transversus*” de *D. africanum* presenta una serie de características que la hacen única. Morfológicamente, destacan dos brazos de gran longitud, que combinados con una tasa de desarrollo lenta, un temblor distintivo que le permite separarse de otras larvas en caso de entrar en contacto y la habilidad de sobrevivir en ambientes pobres en alimentos, hacen que pueda recorrer largas distancias y persistir en entornos cambiantes. Por ende, estas larvas pueden ser consideradas formas resistentes que permiten a esta especie extender el estadio planctónico cuando las condiciones no son favorables (Hernández et al., 2020).

El primer evento de mortalidad masiva fue observado desde octubre de 2009 hasta abril de 2010, afectando a las poblaciones de *D. africanum* existentes en los archipiélagos de Canarias y Madeira. Este evento es considerado de gran importancia por ser la primera muerte generalizada documentada de diademátidos por enfermedad (Clemente et al., 2014). Por su parte, el segundo evento de mortalidad generalizada que nos ocupa fue registrado en febrero de 2018, siendo relacionado con el cambio climático por Hernández y colaboradores en 2020. Concretamente, se vinculó con las denominadas “tormentas asesinas”, fenómenos invernales responsables de los movimientos de sedimento submarino que impulsan a las amebas patógenas hacia las costas donde residen los erizos de mar *D. africanum* afectados (Hernández et al., 2020). En ambos eventos de mortalidad, el efecto ecológico a corto plazo fue una disminución brusca de la densidad media de *D. africanum* (Clemente et al., 2014; Hernández et al., 2020). No obstante, al igual que Clemente y colaboradores (2014), hemos comprobado que el asentamiento larvario no se ha visto afectado. El hecho de que no exista una dependencia lineal entre las densidades de adultos y el asentamiento larvario de *D. africanum*, plantea una serie de nuevas cuestiones muy interesantes. Por ejemplo, ¿dónde están las poblaciones fuente de erizos que generan esas larvas? ¿son las poblaciones de zonas más profundas las que mantienen las poblaciones someras? ¿se han asentado larvas que ya se habían generado antes de la mortalidad masiva?.

El asentamiento larvario de *D. africanum*, como ocurre con la mayoría de los invertebrados marinos, comprende y requiere tres pasos: suficiente densidad de larvas competentes en las proximidades de un hábitat adecuado, asentamiento de estas en dicha zona y, finalmente, supervivencia y crecimiento de los juveniles recién asentados (Harrold et al., 1991). Dado que, como ya se ha comentado, las larvas planctónicas pueden vivir durante bastante tiempo de forma libre, sería acertado pensar que aunque la mayoría

de los erizos de mar adultos murieran a causa del evento de mortalidad masiva en invierno, las larvas producto de la reproducción de estos previamente a su muerte u otras larvas de individuos que habiten en zonas no afectadas (mayor profundidad, otras islas, etc.), podrían asentarse una vez se dieran las condiciones propicias en verano-otoño. De hecho, hemos comprobado que esto ocurre, dado que continúan asentándose entre agosto-octubre, destacando el mes de septiembre, cuando tiene lugar el pico de asentamiento. No obstante, no podemos confirmar que se trate de larvas de la misma población de erizos, por lo que sería interesante realizar estudios genéticos de las poblaciones cierto tiempo después de los eventos de mortalidad masiva a fin de despejar tal incógnita.

A pesar de que la repoblación de *D. africanum* tras los eventos de mortalidad puede deberse al asentamiento de las larvas, también cabe la posibilidad de que se produzca gracias a la migración de individuos adultos de otras zonas no afectadas (Brady & Scheibling, 2005). Por ejemplo, en nuestro caso puede deberse a erizos de zonas más profundas o a erizos de zonas no afectadas por la mortalidad. Sería deseable, por tanto, un estudio en profundidad utilizando herramientas de genética de poblaciones para esclarecer los mecanismos de repoblación de la especie tras los eventos de mortalidad masiva.

8. CONCLUSIONES

1. Este estudio aporta un poco más de información acerca del asentamiento de los erizos de mar *D. africanum* en Tenerife tras uno de los eventos de mortalidad masiva más importantes de la década.

2. Del mismo modo que se observó al analizar los datos referentes al primer evento de esta índole, la capacidad reproductiva de *D. africanum* no se ha visto comprometida, mostrando incluso valores superiores a los registrados en décadas anteriores.

3. Esto sugiere que la repoblación de las zonas afectadas puede ser rápida y debida al asentamiento larvario, sin descartar las migraciones de individuos adultos desde otras zonas o una suma de ambos procesos.

4. Futuras investigaciones se hacen necesarias para comprender los mecanismos de repoblación, así como la capacidad de asentamiento de *D. africanum* en un océano cambiante bajo la sombra del cambio climático, motor de las “tormentas asesinas”.

9. CONCLUSIONS

1. This study provides a little more information about the settlement of sea urchin *D. africanum* in Tenerife after one of the most important mass mortality events of the decade.

2. In the same way that was observed when analyzing the data referring to the first event of this nature, the reproductive capacity of *D. africanum* has not been compromised, showing even higher values than those registered in previous decades.

3. This suggests that the repopulation of the affected areas may be rapid and due to larval settlement, without ruling out the migrations of adult individuals from other areas or a sum of both processes.

4. Future research is necessary to understand the repopulation mechanisms, as well as the settlement capacity of *D. africanum* in a changing ocean under the shadow of climate change, the engine of “killer storms”.

10. AGRADECIMIENTOS

Llegado este punto, es momento de dar las gracias a las personas que han estado ahí tanto durante la realización de este Trabajo de Fin de Grado como de la carrera en su conjunto.

Requieren especial mención mis tutores José Carlos Hernández y Sara González Delgado. Al primero, debo la oportunidad de aportar mi granito de arena en el conocimiento del asentamiento del erizo *Diadema* en Canarias tras un evento tan importante como el acontecido en 2018. Asimismo, gracias por tus clases de Biología Marina; al igual que el océano mismo, no pueden ser más dinámicas. A la segunda, mi más sincero agradecimiento por guiarme en este proceso creativo que supone la redacción del TFG, así como por todo el apoyo prestado durante la parte experimental del mismo (incluidas las galletas gomeras para hacer más amenos los arduos días de trillado).

Por supuesto, gracias a mi familia, que siempre ha estado ahí en los buenos y malos momentos, acompañándome a través de todas mis etapas. Igualmente, a mi mejor amiga Alba, cuya amistad es el mejor elixir para los días grises. Y por qué no, a mi perra Laika, por hacerme compañía durmiendo en mi regazo durante largas horas, tanto en estos meses como en los últimos años.

Finalmente, pero en absoluto menos importante, quiero agradecer a las postlarvas y juveniles de erizo el haber seleccionado nuestros colectores. Sin ustedes esto no sería posible (literalmente).

11. BIBLIOGRAFÍA

- Amy, R. L. (1983). Gamete sizes and developmental time tables of five tropical sea urchins. *Bulletin of Marine Science*, 33, 173–176.
- Anderson, M. J., & Braak, C. T. (2003). Permutation tests for multi-factorial analysis of variance. *Journal of Statistical Computation and Simulation*, 73 (2), 85-113. DOI: 10.1080/00949650215733.
- Anderson, M. J., & Robinson, J. (2003). Generalized discriminant analysis based on distances. *Australian & New Zealand Journal of Statistics*, 45 (3), 301-318. DOI: 10.1111/1467-842X.00285
- Anderson, M. J. (2004). PERMANOVA 2factor: a FORTRAN computer program for permutational multivariate analysis of variance using permutation tests. University of Auckland.
- Balch, T., & Scheibling, R. E. (2000). Temporal and spatial variability in settlement and recruitment of echinoderms in kelp beds and barrens in Nova Scotia. *Marine Ecology Progress Series*, 205, 139-154. DOI: 10.3354/meps205139
- Balsalobre, M., Wangenstein, O. S., Palacín, C., Clemente, S. & Hernández, J. C. (2016). Efficiency of artificial collectors for quantitative assessment of sea urchin settlement rates. *Scientia Marina*, 80 (2), 207-216. DOI: 10.3989/scimar.04252.13A
- Boudouresque, C.F., & Verlaque, M. (2013). *Paracentrotus lividus*. En: Miller Lawrence, J (ed), *Sea Urchins: Biology and Ecology*, (pp. 297-327). Elsevier. DOI: 10.1016/B978-0-12-396491-5.00021-6
- Brady, S. M., & Scheibling, R. E. (2005). Repopulation of the shallow subtidal zone by green sea urchins (*Strongylocentrotus droebachiensis*) following mass mortality in Nova Scotia, Canada. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 85 (6), 1511-1517. DOI: 10.1017/S0025315405012713
- Burge, C. A., Eakin, C. M., Friedman, C. S., Froelich, B., Hershberger, P. K., Hofmann, E. E., Petes, L. E., Prager, K. C., Weil, E., Willis, B. L., Ford, S. E. & Harvell, C. D. (2014). Climate change influences on marine infectious diseases: implications for management and society. *Annual Review of Marine Science*, 6, 249-277. DOI: 10.1146/annurev-marine-010213-135029
- Clemente, S., Lorenzo-Morales, J., Mendoza, J. C., López, C., Sangil, C., Alves, F., Kaufmann, M., & Hernández, J. C. (2014). Sea urchin *Diadema africanum* mass mortality in the subtropical eastern Atlantic: role of waterborne bacteria in a warming ocean. *Marine Ecology Progress Series*, 506, 1-14. DOI: 10.3354/meps10829

- Clemente, S., Hernández, J. C., Toledo, K., & Brito, A. (2007). Predation upon *Diadema* aff. *antillarum* in barren grounds in the Canary Islands. *Scientia Marina*, 71 (4), 745-754. DOI: 10.3989/scimar.2007.71n4745
- Dyková, I., Lorenzo-Morales, J., Kostka, M., Valladares, B., & Pecková, H. (2011). *Neoparamoeba branchiphila* infections in moribund sea urchins *Diadema* aff. *antillarum* in Tenerife, Canary Islands, Spain. *Diseases of Aquatic Organisms*, 95 (3), 225-231. DOI: 10.3354/dao02361
- Dyková, I., Nowak, B. F., Crosbie, P. B. B., Fiala, I., Pecková, H., Adams, M. B., Macháčková, B., & Dvořáková, H. (2005). *Neoparamoeba branchiphila* n. sp., and related species of the genus *Neoparamoeba* Page, 1987: morphological and molecular characterization of selected strains. *Journal of Fish Diseases*, 28 (1), 49-64. DOI: 10.1111/j.1365-2761.2004.00600.x
- Eckert, G. L. (1998). Larval development, growth and morphology of the sea urchin *Diadema antillarum*. *Bull. Mar. Sci.*, 63, 443-451.
- Feehan, C. J., & Scheibling, R. E. (2014). Effects of sea urchin disease on coastal marine ecosystems. *Marine Biology*, 161. DOI: 10.1007/s00227-014-2452-4
- Feehan, C. J., Scheibling, R. E., & Lauzon-Guay, J. S. (2012). An outbreak of sea urchin disease associated with a recent hurricane: Support for the “killer storm hypothesis” on a local scale. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 413, 159-168. DOI: 10.1016/j.jembe.2011.12.003
- Gizzi, F., Jiménez, J., Schäfer, S., Castro, N., Costa, S., Lourenço, S., José, R., Canning-Clode, J., & Monteiro, J. (2020). Before and after a disease outbreak: Tracking a keystone species recovery from a mass mortality event. *Marine Environmental Research*, 156. DOI: 10.1016/j.marenvres.2020.104905
- Harrold, C., Lisin, S., Light, K. H., & Tudor, S. (1991). Isolating settlement from recruitment of sea urchins. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 147 (1), 81-94. DOI: 10.1016/0022-0981(91)90038-X
- Hernández, J. C., Brito, A., Cubero, E., García, N., Girard, D., González-Lorenzo, G., & Falcón, J. M. (2006). Temporal patterns of larval settlement of *Diadema antillarum* (Echinodermata: Echinoidea) in the Canary Islands using an experimental larval collector. *Bulletin of Marine Science*, 78 (2), 271-279.
- Hernández, J. C., Clemente, S., García, E., & McAlister, J. S. (2020). Planktonic stages of the ecologically important sea urchin, *Diadema africanum*: larval performance under near future ocean conditions. *Journal of Plankton Research*, 42 (3), 286-304. DOI: 10.1093/plankt/fbaa016
- Hernández, J. C., Clemente, S., Girard, D., Pérez-Ruzafa, Á., & Brito, A. (2010). Effect of temperature on settlement and postsettlement survival in a barrens-forming sea urchin. *Marine Ecology Progress Series*, 413, 69-80. DOI: 10.3354/meps08684
- Hernández, J. C., Clemente, S., Sangil, C., & Brito, A. (2008). The key role of the sea urchin *Diadema* aff. *antillarum* in controlling macroalgae assemblages throughout the Canary

- Islands (eastern subtropical Atlantic): An spatio-temporal approach. *Marine Environmental Research*, 66 (2), 259-270. DOI: 10.1016/j.marenvres.2008.03.002
- Hernández, J. C., Sangil, C., & Lorenzo-Morales, J. (2020). Uncommon southwest swells trigger sea urchin disease outbreaks in Eastern Atlantic archipelagos. *Ecology and Evolution*, 10, 7963– 7970. DOI: 10.1002/ece3.6260
- Hernández, J. C., Toledo, K., Girard, D., Clemente, S., & Cubero, E. (2005). Descripción de la post-larva y primeras fases juveniles de tres equinoideos presentes en las Islas Canarias: *Diadema antillarum* Philippi, 1845, *Paracentrotus lividus* (Lamarck, 1816) y *Arbaciella elegans* Mortensen, 1910. *VIERAEA*, 33, 385-397.
- Keesing, J. K., Cartwright, C. M., & Hall, K. C. (1993). Measuring settlement intensity of echinoderms on coral reefs. *Marine Biology*, 117 (3), 399-407. DOI: 10.1007/BF00349315
- Lafferty, K. D., Porter, J. W. & Ford, S. E. (2004). Are diseases increasing in the ocean? *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 35, 31-54. DOI: 10.2307/annurev.ecolsys.35.021103.300000034
- Nowak, B. F., & Archibald, J. M. (2018). Opportunistic but Lethal: The Mystery of Paramoebae. *Trends in Parasitology*, 34 (5), 404-419. DOI: 10.1016/j.pt.2018.01.004
- Scheibling, R. E., & Hatcher, B. G. (2007). *Ecology of Strongylocentrotus droebachiensis*. En: Miller Lawrence, J (ed), *Edible Sea Urchins: Biology and Ecology*, (pp. 353-392). Elsevier Science. DOI: 10.1016/S0167-9309(07)80082-2
- Scheibling, R., & Hennigar, A. (1997). Recurrent outbreaks of disease in sea urchins *Strongylocentrotus droebachiensis* in Nova Scotia: Evidence for a link with large-scale meteorologic and oceanographic events. *Marine Ecology Progress Series*, 152 (1), 155-165. DOI: 10.3354/meps152155
- Wang, Y. N., Chang, Y. Q., & Lawrence, J. M. (2013). *Disease in Sea Urchins*. En: Miller Lawrence, J (ed), *Sea Urchins: Biology and Ecology*, (pp. 179-186). Elsevier. DOI: 10.1016/B978-0-12-396491-5.00012-5
- Ward, J. R., & Lafferty, K. D. (2004). The Elusive Baseline of Marine Disease: Are Diseases in Ocean Ecosystems Increasing? *PLoS Biology*, 2 (4), 542-547. DOI: 10.1371/journal.pbio.0020120