

Ciclo reproductivo de la almeja roñosa *Chione undatella* en las costas de la región minera de Santa Rosalía, Baja California Sur, México

Reproductive cycle of venus clam *Chione undatella* in the coasts of the Santa Rosalía mining region, Baja California Sur, Mexico

Ce Acatl Arce-Peinado¹, Marcial Arellano-Martínez¹*, y Bertha Patricia Ceballos-Vázquez¹**

Recibido: 11 de septiembre de 2018.

Aceptado: 28 de noviembre de 2018.

Publicado: 18 de diciembre de 2018.

RESUMEN

Antecedentes: Los organismos responden a cambios en el medio ambiente, por ello el proceso reproductivo de un organismo puede verse afectado como consecuencia de la contaminación. *Chione undatella* es un recurso potencial pesquero y de cultivo que se ha explotado durante muchos años de forma intensiva en la costa del Pacífico mexicano. **Objetivos:** El principal objetivo del estudio fue caracterizar el ciclo reproductivo y la temporalidad del desove, así como la talla de primera madurez y determinar si existen daños tisulares que puedan tener efectos adversos en la reproducción de *C. undatella* provocados por la contaminación presente en el puerto minero de Santa Rosalía, Golfo de California. **Métodos:** A través del análisis histológico, del índice de condición (ICG) y de parámetros ambientales, se evaluaron aspectos de salud y de la biología reproductiva de la almeja roñosa en la zona costera del puerto de Santa Rosalía. **Resultados:** *C. undatella* presenta actividad reproductiva durante todo el año, sin que ello se asocie con la concentración de clorofila-a ni con la temperatura. Se encontró una correlación inversa entre el ICG y la fase de desarrollo de mayor frecuencia (madurez) en hembras. La talla de primera madurez es de 57 mm LC. En el tejido gonadal (> 80% de los individuos) se observó una infiltración de células eosinófilas en todas las fases de desarrollo gonádico, con una intensidad que osciló de intermedia a abundante (> 60% de los organismos). **Conclusiones:** A pesar de que *C. undatella* presenta actividad reproductiva todo el año, la gran prevalencia de infiltraciones hemocíticas en el tejido gonadal sugiere una potencial deficiencia en su reproducción. Es importante hacer más estudios para confirmarlo y para determinar su relación con la contaminación presente en la zona.

¹ Instituto Politécnico Nacional, Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas. Avenida Instituto Politécnico Nacional s/n, col. Playa Palo de Santa Rita. La Paz, Baja California Sur, 23096. México

*Author for correspondence:
bceballo@ipn.mx

To cite as:

Arce-Peinado C. A., M. Arellano-Martínez y B. P. Ceballos-Vázquez. 2018. Ciclo reproductivo de la almeja roñosa *Chione undatella* en las costas de la región minera de Santa Rosalía, Baja California Sur, México. *Hidrobiológica* 28 (3): 325-334.

DOI:

ABSTRACT

Background: The organisms respond to changes in the environment, hence the reproductive process of an organism can be affected as a result of contamination. *Chione undatella* is a potential resource for fishing and cultivation, which has been intensively exploited for many years on the Mexican Pacific coast. **Goals:** The main objective of this study was to characterize the reproductive cycle and spawning temporality, estimate the size at first maturity, and determine if there is tissue damage that may have adverse effects on reproduction of *C. undatella* because of the contamination found in the mining port of Santa Rosalía, Gulf of California. **Methods:** Through histological analysis, the general condition index (GCI), and environmental parameters, we evaluated aspects of the reproductive biology and health of the frilled venus clam from the coastal area of the port of Santa Rosalía. **Results:** *C. undatella* has reproductive activity throughout the year, unrelated to the concentration of chlorophyll-a, or to temperature. An inverse correlation was found between the GCI and the phase of development with higher frequency in females. The size at first maturity is 57 mm LC. In the gonadal tissue (> 80% of the individuals) an infiltration of eosinophilic cells was observed in all phases of gonadal development with an intermediate to abundant intensity (> 60% of the organisms). **Conclusions:** Although *C. undatella* has reproductive activity throughout the year, the high prevalence of hemocytic infiltration in the gonadal tissue suggests a potential deficiency in its reproduction. We recommend more studies be undertaken to confirm this preliminary finding and determine the relationship of the deficiency with the contamination present in the area.

Keywords: condition index, contamination, infiltration, reproductive biology, size at first maturity

INTRODUCCIÓN

Los estudios sobre biología reproductiva que abordan aspectos como la temporalidad del desove y la talla de madurez sexual aportan información muy útil para propiciar un mejoramiento en el manejo pesquero (Stearns, 2000), además, son de los aspectos de mayor importancia para profundizar en el conocimiento de la dinámica poblacional (Jennings *et al.*, 1999).

En general, los ciclos reproductivos de los invertebrados marinos responden a cambios en el medio ambiente; entre los más importantes, están la temperatura y la disponibilidad de alimento (Darriba *et al.*, 2004; Dridi *et al.*, 2007; Enríquez-Díaz *et al.*, 2009). Sin embargo, el proceso reproductivo también puede verse afectado como consecuencia de cambios en un medio marino contaminado (Vaschenko *et al.*, 2013). En la región costera del golfo de California el ambiente sedimentario del puerto de Santa Rosalía es receptor y fuente de contaminantes inorgánicos; se han comprobado anomalías positivas de concentración de elementos no esenciales en los sedimentos de dicha zona, con potencial de toxicidad y bio-concentración (Shumilin *et al.*, 2000; Rodríguez-Figueroa *et al.*, 2009; Shumilin *et al.*, 2011, Shumilin *et al.*, 2012, Shumilin *et al.*, 2013). Precisamente, en ese puerto minero se reportó recientemente una deteriorada condición de salud en las góndadas de la almeja chocolata *Megapitaria squalida* (Sowerby, 1835) (Yee-Duarte *et al.*, 2018). Lo anterior demuestra que es posible llegar a inducir cambios patológicos en los bivalvos, los cuales, por ser organismos filtradores, suelen ser más susceptibles a los agentes ambientales, donde las anomalías en los tejidos como la presencia de granulocitomas o lesiones constituidas principalmente por granulocitos (Lowe & Moore, 1979) tienen relevancia diagnóstica como biomarcadores de exposición a la contaminación (Neff *et al.*, 1987; Auffret, 1988; Villalba *et al.*, 1997; Usheva *et al.*, 2006; Kim & Powell, 2007; Garmendia *et al.*, 2011). Algo parecido ocurre con la inflamación, pues a pesar de ser parte funcional de la respuesta inmune de un organismo (Muller, 2003), también se ha analizado su posible uso como biomarcador en exposiciones a los contaminantes, tanto agudas como subletrales a largo plazo (Garmendia *et al.*, 2011).

La almeja roñosa *Chione undatella* (Sowerby, 1835) es un recurso potencial pesquero y de cultivo que se ha explotado intensivamente durante mucho tiempo con poca o ninguna regulación, en la costa del Pacífico mexicano (Arizpe-Covarrubias, 1992). Esta almeja forma bancos en áreas someras y se entierra a poca profundidad en fondos blandos de sedimentos finos (Fisher *et al.*, 1995), lo que la hace de fácil acceso. En este trabajo se estudió una población de la almeja roñosa y se determinó su ciclo reproductivo, su temporalidad de desove y su talla de primera madurez. Adicionalmente, se reporta una anomalía en el tejido gonadal que podría estar asociada con la exposición a los contaminantes presentes en el área costera de Santa Rosalía.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizaron muestreos mensuales en un ambiente costero adyacente al puerto minero de Santa Rosalía, localizado en la costa oriental del golfo de California ($27^{\circ} 20' N$ y $112^{\circ} 16' O$), durante el periodo de septiembre de 2014 a agosto 2015, excepto en marzo de 2015, cuando no fue posible obtener organismos. De cada organismo se registró la longitud de la concha (distancia en línea recta desde el margen anterior al margen posterior de la concha (LC; 0.1 mm de precisión), así como los pesos: total, sin concha y de la concha (0.1 g de precisión), y se calculó

el índice de condición general (ICG), como la razón porcentual del peso sin concha y el peso total (Góngora-Gómez *et al.*, 2016).

De cada organismo se extrajo tejido gonadal, el cual fue fijado en formaldehído al 10% en agua de mar. Después de lavar el exceso de fijador, el tejido se procesó histológicamente (Humason, 1979), se deshidrató por medio de una serie de alcoholes de concentraciones crecientes (70-100%) y se aclaró con HemoDe® y con inclusión en Paraplast®. Se realizaron cortes de 5 μm de grosor y se tiñeron con la técnica de hematoxilina-eosina, con la que se obtiene un contraste adecuado de las estructuras del tejido.

El sexo (macho o hembra) se identificó mediante el análisis microscópico. Para evaluar la proporción de sexos en la muestra se aplicó una prueba de ji-cuadrada con la corrección de continuidad de Yates (χ^2_c) bajo la hipótesis nula de que existe una proporción 1:1 (Zar, 1996). La regla de decisión se realizó con una confianza del 95%, sin aceptar la hipótesis cuando el valor de χ^2_c calculado fuera mayor a 3.86 (Sokal & Rohlf, 1979).

La descripción del ciclo reproductivo se realizó a través de la estimación de las frecuencias relativas mensuales de cada fase de desarrollo gonádico (Tabla 1). Durante el análisis microscópico se detectaron infiltraciones hemocíticas en el tejido gonadal y, al considerar el origen contaminado de las muestras, se aplicó el índice cualitativo propuesto por Bignell *et al.* (2011). Primero, con una estimación visual, se ubicaron las muestras en etapas (ausente, presente, intermedio o abundante) con base en la proporción de cobertura de células eosinófilas presentes en el tejido gonadal, de acuerdo con la clasificación que se presenta en la Tabla 2. Posteriormente, se clasificaron los organismos en cada etapa agrupándolos por sexo, mes y fase de desarrollo gonadal, para calcular los porcentajes y llevar a cabo las comparaciones entre ellas.

Mediante el modelo logístico $y = a/(1+be^{-cL})$, se obtuvo la talla de madurez sexual ($L_{50\%}$) al medir la longitud de la concha a la cual el 50% de los individuos son sexualmente maduros. Para esto se utilizó solamente a los organismos con actividad reproductiva, es decir, organismos en fase de madurez, desove/espermación y recuperación.

Se obtuvieron datos de la temperatura superficial del mar (TSM) y la concentración superficial de clorofila-a desde el navegador en línea de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) "Coast Watch Browser". Para ambas variables se calcularon los promedios mensuales de la zona aledaña a la dársena del puerto de Santa Rosalía, Baja California Sur, en el periodo de 2014 a 2015 en las coordenadas $27^{\circ} 20' 45.76'' N$, $-112^{\circ} 15' 49.28'' O$.

Análisis estadísticos. Al aplicar una prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov se encontró que los datos de tallas (KS = 0.14, $p = 0.01$), peso total (KS = 0.11, $p = 0.02$), peso sin concha (KS = 0.10, $p = 0.04$) e índice de condición (KS = 0.12, $p = 0.04$) no presentan una distribución normal, por lo que para detectar diferencias significativas de estas variables entre sexos se utilizó la prueba de Kruskal-Wallis. Debido a que los valores del índice de condición son porcentajes, se aplicó una transformación arcoseno (Zar, 1996) para normalizar la distribución de los datos y poder aplicar los análisis de correlación y cumplir con el supuesto de normalidad. Se utilizaron los promedios mensuales para realizar correlaciones de Spearman (análisis no paramétrico) entre las variables ambientales (temperatura superficial del mar y concentración superficial de clorofila a y el ICG, así como también con la fase de desarrollo de mayor frecuencia. Los análisis estadísticos se realizaron con un nivel de significancia de $p < 0.05$ con el programa Minitab 18.

Tabla 1. Fases de desarrollo de las gónadas y los correspondientes valores del índice de condición general (media \pm error estándar) de *Chione undatella* (Sowerby, 1835).

Hembras			Machos		
Estadio de desarrollo gonádico	ICG	Observación microscópica	Estadio de desarrollo gonádico	ICG	Observación microscópica
Indiferenciado	15.40 \pm 0.13	Presencia de acinos vacíos, no se observan gametos. No se puede diferenciar el sexo. El tejido conjuntivo es abundante.			
Desarrollo inicial	19.89 \pm 1.31	Ovocitos pedunculados unidos a las paredes de los folículos. En algunos casos se observan ovocitos residuales de un desove anterior (remaduración).	Desarrollo	20.90 \pm 0.62	Una capa gruesa de espermatogonias y espermatocitos en los túbulos seminíferos, separados por tejido conectivo.
Desarrollo final	20.30 \pm 0.81	Folículos con ovocitos en diferentes fases (vitelogénicos y pedunculados). Los ovocitos se encuentran unidos a la pared del folículo y unos pocos libres en el lumen. Una marcada reducción en la cantidad de tejido conectivo entre los folículos.			
Madurez	20.03 \pm 0.71	Folículos llenos de ovocitos libres en el lumen. Los núcleos y nucléolos de los ovocitos son visibles. Sin tejido conectivo entre folículos.	Madurez	19.95 \pm 0.56	Crecimiento de los túbulos seminíferos, sin espacio entre ellos. Reducción en la cantidad de espermatogonias y espermatocitos con un aumento en la cantidad de espermatozoides visibles en el centro de los túbulos.
Desove	20.52 \pm 0.88	Folículos parcialmente vacíos, con ovocitos libres en el lumen y presencia de fagocitos.	Espermiación	19.99 \pm 0.61	Algunos túbulos con espermatozoides abundantes y otros parcialmente vacíos con las paredes rotas.
Recuperación	19.77 \pm 0.67	Folículos vacíos, con algunos ovocitos residuales y actividad fagocitaria.	Recuperación	19.34 \pm 0.94	Los túbulos presentan gametos residuales, actividad fagocitaria y abundante tejido conectivo entre ellos.

RESULTADOS

Se analizaron 176 organismos, de los cuales, 2 fueron indiferenciados (1%), 82 fueron machos (47%) y 92 fueron hembras (52%). La proporción sexual total fue 1.1H:1M, y sólo fue significativamente diferente de la proporción 1:1 en julio ($\chi^2_c = 1.14$; $p < 0.05$), donde hubo más hembras que machos (6H:1M).

Los valores medios, error estándar y rango de las variables morfométricas y del índice de condición general por sexo, así como los resultados de las pruebas de Kruskal-Wallis se presentan en la Tabla 3. Las hembras fueron significativamente más grandes que los machos, tanto en longitud de la concha (LC) como en peso total; sin embargo, al comparar el peso sin concha, esta diferencia desapareció y, de forma similar, en el ICG se equilibró la diferencia entre sexos. Al analizar la

variabilidad mensual del ICG se observa la misma tendencia en ambos sexos, a pesar de que no hay una correlación significativa ($\text{Rho} = 0.77$; $p = 0.005$; $N = 11$; Fig. 1), ya que se registró un promedio alto en abril, tanto en hembras (23.4 ± 0.38) como en machos (21.45 ± 0.83), y otro en agosto en machos (23.37 ± 0.63) y en septiembre en hembras (24.55 ± 2.62), hasta alcanzar los menores valores en octubre (14.45 ± 0.94 y 15.29 ± 1.29 , hembras y machos respectivamente). Se encontró una correlación inversamente proporcional ($\text{Rho} = -0.633$; $p = 0.010$; $N = 11$) entre los promedios mensuales del ICG y la fase de desarrollo de mayor frecuencia en hembras, pero no en machos.

Se estimó la talla de madurez sexual ($L_{50\%}$) para machos en 57.01 mm LC ($r^2 = 0.98$) y para hembras en 57.09 mm LC ($r^2 = 0.99$), aunque la hembra más pequeña con actividad reproductiva fue de 42 mm LC y el macho de 50 mm LC (Fig. 2).

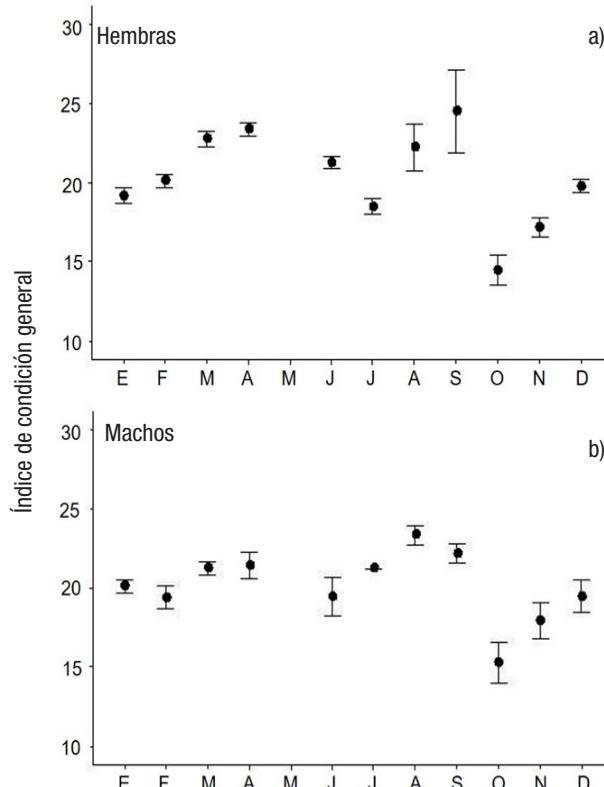
Análisis histológico. En el tejido gonadal se observó que al inicio del desarrollo la pared de los folículos estaba engrosada, las ovogonias y ovocitos se encontraban en crecimiento en las hembras, y los espermatocitos en los machos se hallaban embebidos en la pared de los folículos. Había tejido conectivo interfolicular muy evidente, el cual se reduce conforme se avanza en el proceso de maduración. De manera generalizada, se observan gametos en diferentes fases de desarrollo al mismo tiempo en un mismo individuo, lo que permite suponer que hay una producción continua de gametos y desoves parciales.

Se presenta actividad reproductiva durante todo el año, de manera más evidente en machos (Fig. 3). Las hembras maduras se presentan en mayor porcentaje de marzo a junio y en agosto (> 50%), y desovan en mayor porcentaje durante julio y septiembre (50 y 100%, respectivamente), pero presentan desove de menor intensidad durante enero y febrero (38 y 36%, respectivamente). Los machos maduros se observan prácticamente todo el año (excepto en septiembre y octubre) y registran un mayor porcentaje de espermación entre octubre y enero, con mayor intensidad en octubre y noviembre (> 80%). Los organismos indiferenciados se presentaron en julio y en diciembre con tallas de 61 mm LC y 57 mm LC, respectivamente.

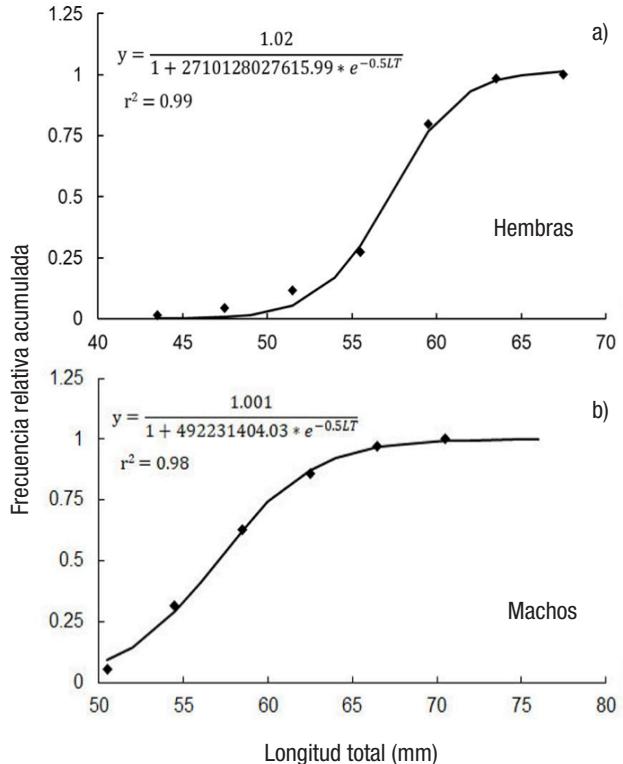
Infiltración hemocítica en el tejido gonadal. Esta condición se presentó tanto en hembras como en machos con intensidades similares ($\rho = 1.90$; $p = 0.168$; $N = 174$), por lo que se analizaron los datos en conjunto. Adicionalmente, esta condición estuvo acompañada de una reducción y desaparición del tejido conectivo. Durante la mayor parte

del año se observó una infiltración de células eosinófilas en el tejido gonadal en más del 80% de los individuos analizados (Fig. 4). La variación mensual de la prevalencia de organismos con infiltración de células eosinófilas en el tejido gonadal se presenta en la Figura 5a. Los meses cuando se observó una menor frecuencia de organismos con infiltración (53 y 47%) fueron agosto y octubre, mientras que la prevalencia de estas infiltraciones fue notable en enero y julio, cuando más del 85 % de los individuos presentaban infiltración con una intensidad en etapa 3 (abundante); mientras que en enero, marzo, julio, septiembre y noviembre el 100% de los organismos presentaban infiltraciones. Por otro lado, en las cuatro fases de desarrollo gonádico se presentó una intensidad de intermedia (etapa 2) a abundante (etapa 3) de infiltración de células eosinófilas en más del 60% de los organismos (Fig. 5b).

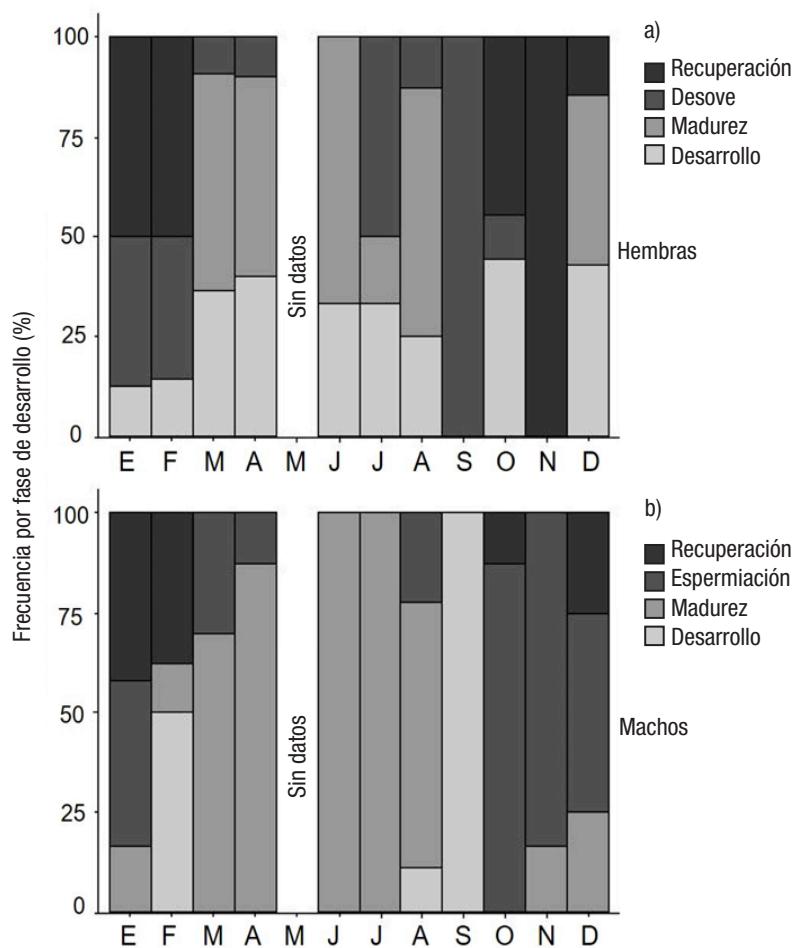
Variables ambientales. Las variaciones mensuales de la temperatura superficial del mar y clorofila *a* se presentan en la Figura 6. Se registraron temperaturas del agua mayores a 25 °C en el periodo de junio a octubre, agosto fue el mes más cálido con 30.2 °C, en noviembre la temperatura del agua empezó a disminuir hasta llegar al menor promedio mensual en enero con 18.4 °C. La concentración de clorofila-*a* mostró notables variaciones: tres períodos con valores altos, el máximo en marzo (47.66 mg/m³) seguido de septiembre (41.44 mg/m³) y el menor en junio (28.39 mg/m³). Julio fue el mes con la menor concentración de clorofila-*a*, ya que sólo alcanzó los 0.63 mg/m³. No se encontró correlación estadísticamente significativa entre el ICG con la concentración de clorofila *a* ($\rho = -0.08$; $p = 0.81$; $N = 11$), ni con la TSM ($\rho = -0.01$; $p = 0.98$; $N = 11$).



Figuras 1a-b. Variación estacional del índice de condición general de hembras (a) y machos (b) de *Chione undatella* (Sowerby, 1835) en Santa Rosalía, Baja California Sur, México.



Figuras 2a-b. Talla de madurez sexual (L_{50}) para hembras (a) y machos (b) de *Chione undatella* (Sowerby, 1835) en Santa Rosalía, Baja California Sur, México. Se incluyen los modelos ajustados.

Figuras 3a-b. Ciclo reproductivo de hembras (a) y machos (b) de *Chione undatella* (Sowerby, 1835) en Santa Rosalía, Baja California Sur, México.

DISCUSIÓN

En la región costera del golfo de California, el ambiente sedimentario del puerto de Santa Rosalía es receptor y fuente de contaminantes inorgánicos. En este sentido, se han reportado anomalías de concentración de elementos no esenciales en los sedimentos, que evidencian una potencial toxicidad y su bioconcentración en la macroalga *Padina durvillei* Bory Saint-Vincent, 1827 (Rodríguez-Figueroa *et al.*, 2009). La almeja roñosa *C. undatella*, al ser un organismo filtrador, está propensa a bioacumular metales pesados, como se ha documentado para otros organismos filtradores (Gutiérrez-Galindo *et al.*, 1999; Cadena-Cárdenas *et al.*, 2009), lo cual podría traer consecuencias adversas para el metabolismo. Asimismo, se reportó recientemente que en esta región minera la almeja chocolata *M. squalida* presenta indicios de una salud general deteriorada, que se observa en su menor tamaño y su baja condición ($ICG < 20\%$), en comparación con otras zonas no contaminadas o contaminadas en menor grado (Yee-Duarte *et al.*, 2017). En *C. undatella* los valores del ICG parecen estar relacionados con la fase de madurez (ver Tabla 1). En las hembras, por su parte, los valores mensuales de ICG estuvieron entre 24.5 ± 2.6 en septiembre y 14.4 ± 0.9 en octubre, pero esto parece estar más relacionado con el desove que con una mala condición de salud general. Al considerar específicamente

la condición histopatológica de la gónada, se reportaron, en la misma zona minera donde se realizó el presente estudio, algunas alteraciones en las gónadas de *M. squalida* (ovocitos atrésicos, células cafés, infiltración de hemocitos, granulocitomas y parásitos) y se evidenció una gran presencia de cobre (30%) y hierro (45%), que se midió como área de cobertura en el corte del tejido de la gónada (Yee-Duarte *et al.*, 2018). Lo anterior guarda estrecha concordancia con la exposición crónica a altos niveles de metales pesados. En *C. undatella* se observó una infiltración anormal de células eosinófilas dentro del tejido gonadal, lo cual se discute más adelante.

Los resultados mostraron que *C. undatella* presenta actividad reproductiva (madurez y desove) durante la mayoría de los meses con una producción continua de gametos (evidenciada por la presencia de gametos en diferentes fases de desarrollo al mismo tiempo) y desoves parciales. En el caso de los machos, es más marcada la actividad reproductiva continua (madurez o espermiación durante todo el año). De la misma forma, se ha reportado una actividad reproductiva continua en dos poblaciones de la misma especie en Bahía Falsa y El Cardenal, ambos lugares dentro de la bahía de La Paz (Baquero-Cárdenas & Masso-Rojas, 1988), lo cual indica que es parte de la estrategia reproductiva de la especie.

Tabla 2. Grado cualitativo utilizado para evaluar la intensidad de la infiltración de células eosinófilas en el tejido gonadal de *Chione undatella* (Sowerby, 1835) (modificado de Bignell *et al.*, 2011).

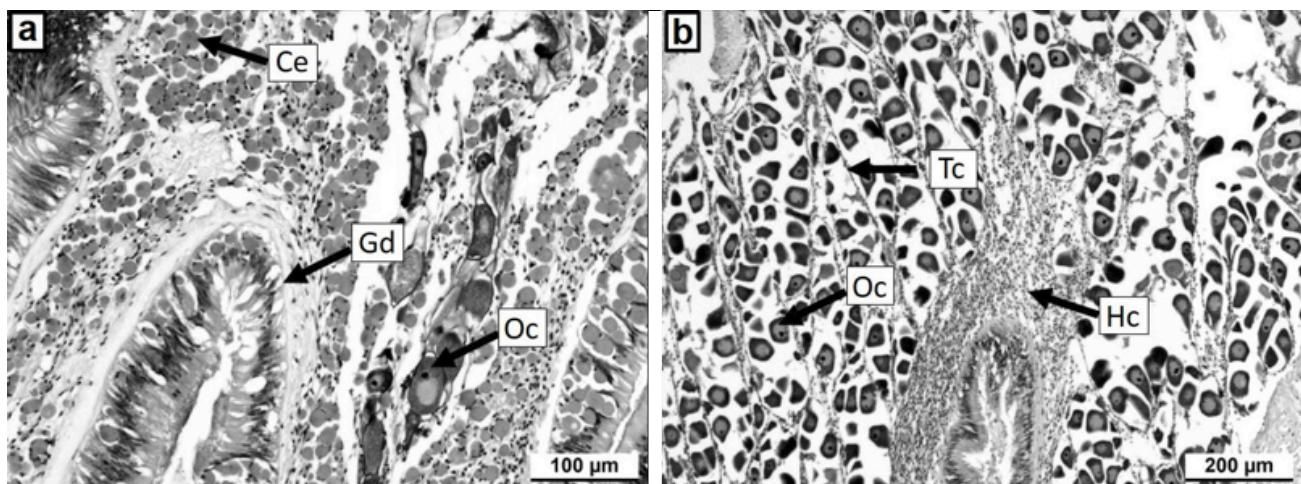
Etapa	Proporción de células eosinófilas
0 Ausente	Sin presencia de células eosinófilas en el tejido (0 %)
1 Presente	Presencia de algunas células eosinófilas en el tejido ($> 0 \% \leq 10 \%$)
2 Intermedio	Presencia notable de células eosinófilas en el tejido ($> 10 \% \leq 50 \%$)
3 Abundante	Presencia abundante de células eosinófilas en el tejido ($> 50 \%$)

Sin embargo, se detectan diferencias temporales en los períodos de mayor intensidad de desove entre las poblaciones. En este estudio, el mayor porcentaje de hembras en desove se presenta en julio (50%) y septiembre (100%), mientras que en Bahía Falsa es en abril (30%), junio (45%), enero y febrero (máximo de 37%), y finalmente, en El Cardonal su máximo se presenta en octubre (45%). En bivalvos se ha demostrado que la temperatura y disponibilidad de alimento son los factores más importantes que afectan su ciclo reproductivo (Cardoso *et al.*, 2007; Freites *et al.*, 2010) y, por lo tanto, las diferencias en la temporalidad de los desoves pueden ser atribuidas a las distintas condiciones ambientales que presenta cada zona (Laudien *et al.*, 2001; Rodríguez-Jaramillo *et al.*, 2001) o a variaciones interanuales en las condiciones ambientales. Es común que el desove en los bivalvos se lleve a cabo en concordancia con temperaturas cálidas y se dispare cuando excede de un nivel crítico característico (Maeda-Martínez, 2001). En *C. fluctifraga* (Sowerby, 1853) se detectó el desove principal durante julio y agosto, cuando la temperatura alcanzó sus máximos valores (29 y 30 °C, respectivamente) (Castillo-Durán *et al.*, 2013); mientras que en *C. californiensis* (Broderip, 1835) el desove se presentó cuando la temperatura fue mayor a 24 °C (García-Domínguez *et al.*, 1993). En contraste, también se ha reportado una reproducción continua inde-

pendientemente de la variación de la temperatura para *C. cancellata* (Linnaeus, 1767) en Florida (Moore & López, 1969).

De acuerdo con este estudio y con lo reportado por Baqueiro & Masso (1988), en Baja California Sur *C. undatella* se reproduce continuamente sin un efecto aparente originado de la variación estacional de la temperatura del agua o de la concentración de clorofila-a. Sin embargo, en Santa Rosalía encontramos que los períodos máximos de desove y espermatiación coinciden con los máximos valores en la temperatura superficial del mar. Por su parte, las mayores concentraciones de clorofila a podrían estar más relacionadas con los períodos de maduración gonádica y desove o con una mayor cantidad de alimento para la producción de gametos o para las larvas, respectivamente.

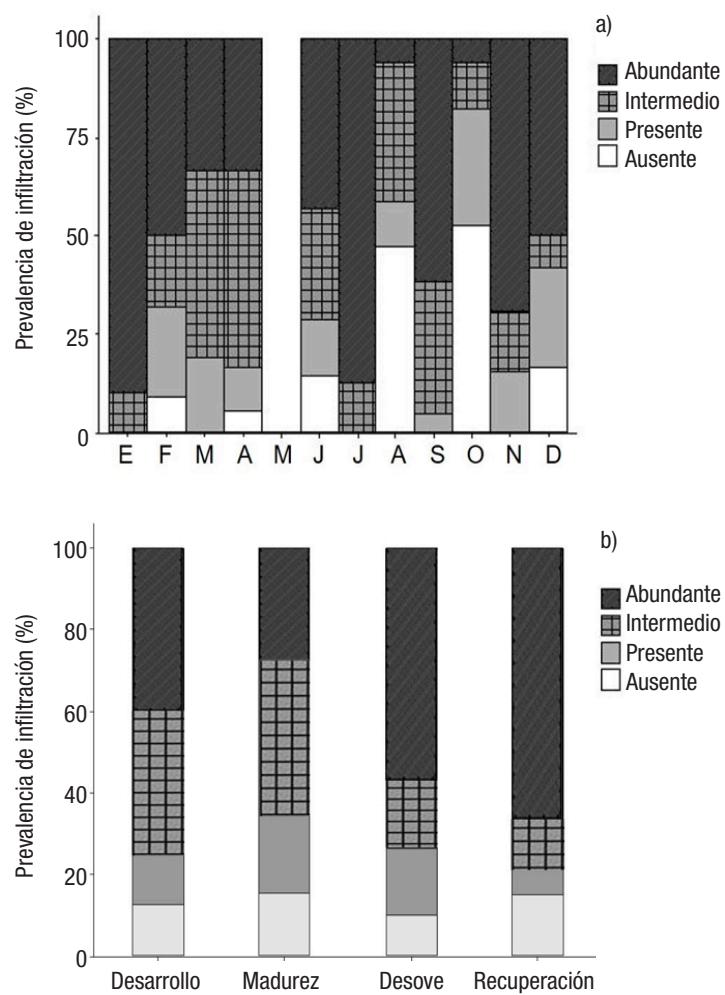
En *C. undatella* se encontraron células eosinófilas infiltradas en el tejido gonadal similares a las células hemocíticas relacionadas con la excreción de material extraño en *Cerastoderma edule* (Linnaeus, 1758) (Russell-Pinto *et al.*, 1994). En moluscos, los hemocitos (células inmunoefectoras) y células café son de los principales mecanismos de defensa involucrados en el proceso de inflamación y en la acumulación y desintoxicación de contaminantes (Ottaviani *et al.*, 2010; Ottaviani, 2011; Boscolo-Papo *et al.*, 2014).



Figuras 4a-b. Microfotografía de tejido gonadal de *Chione undatella* (Sowerby, 1835), teñido con hematoxilina-eosina. a) Tejido gonadal con infiltración de células eosinófilas (Ce), con algunos ovocitos (Oc), y parte de la glándula digestiva (Gd). b) Tejido gonadal en estado normal con abundantes ovocitos (Oc), con tejido conectivo (Tc) y células hemocíticas (Hc).

Tabla 3. Comparación de las variables morfométricas y del índice de condición general por sexo de *Chione undatella* (Sowerby, 1835) en Santa Rosalía, Baja California Sur, México. Se presentan media \pm error estándar y el rango entre paréntesis.

	Machos N = 82	Hembras N = 92	Kruskal-Wallis g.l. 1
Longitud de la concha (mm)	57.94 \pm 0.50 (48-70)	58.85 \pm 0.47 (42-66)	H = 4.73 <i>p</i> = 0.029
Peso total (g)	62.81 \pm 1.62 (38.5-112.5)	65.44 \pm 1.44 (23.9-94.4)	H = 5.57 <i>p</i> = 0.018
Peso sin concha (g)	12.59 \pm 0.31 (7.6-20.3)	13.30 \pm 0.35 (4.1-20.3)	H = 3.47 <i>p</i> = 0.063
Índice de condición general	20.31 \pm 0.33 (10.25-25.94)	20.47 \pm 0.43 (11.68-44.23)	H = 0.18 <i>p</i> = 0.669



Figuras 5a-b. Variación mensual (a) y por fase de desarrollo gonádico (b) de la prevalencia por etapa de intensidad de infiltración de células eosinófilas en el tejido gonadal de *Chione undatella* (Sowerby, 1835) (ambos sexos) en la zona costera de la región minera de Santa Rosalía, Baja California Sur, México.

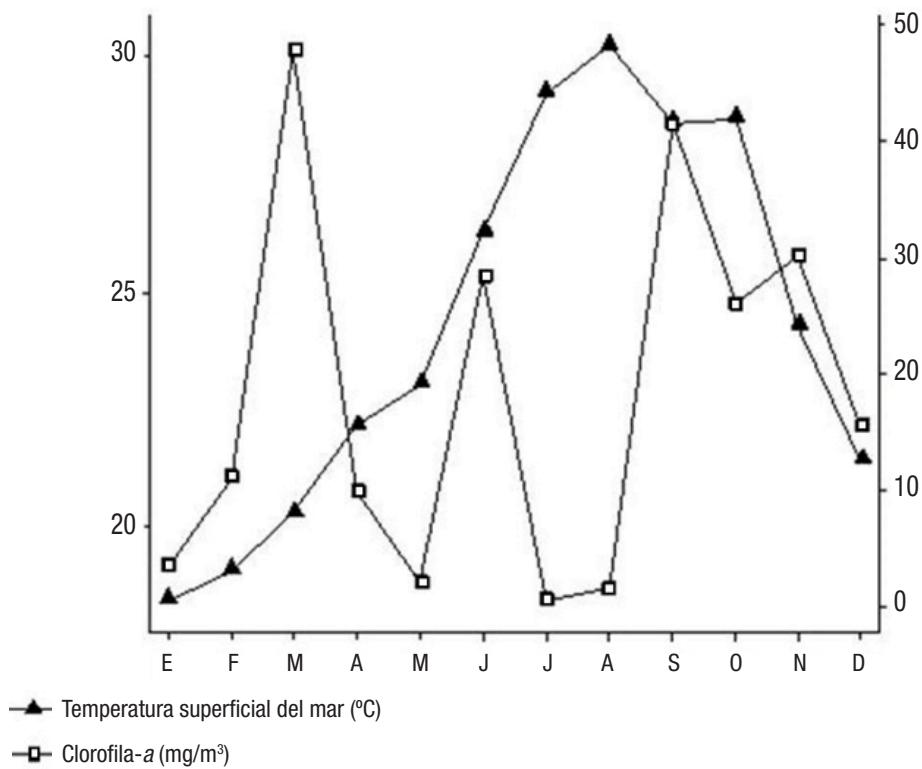


Figura 6. Variación mensual de temperatura superficial del mar y de la concentración de clorofila-a en las coordenadas 27° 20' 45.76" N, 112° 15' 49.28" O.

Cuando consideramos que el tejido gonadal de *C. undatella* muestra una infiltración de células eosinófilas con una prevalencia alta (intermedia y abundante) en todos los meses y fases de desarrollo gonádico, podemos descartar dos causas: presencia de alguna infección por parásitos (no se encontró evidencia de su presencia) o que se deba al proceso de recuperación natural de la gónada (se presentó en el desarrollo y la madurez con > 80% de prevalencia). Por lo tanto, se podría hipotetizar que, debido a que estos organismos están expuestos crónicamente a un ambiente contaminado por metales (Shumilin *et al.*, 2013), estas células están relacionadas con la reacción celular a estrés abiótico, el cual resulta en un proceso de inflamación inmune innato (Bouallegui *et al.*, 2017).

Distintos autores mencionan que después del transporte de hemocitos y células cafés, algunos tejidos se identifican como blancos de acumulación o desintoxicación de contaminantes en moluscos (Boscolo-Papo *et al.*, 2014). Estas infiltraciones se presentan acompañadas de alteraciones morfológicas a nivel celular, como un decremento en el volumen de una célula o un órgano, así como una pérdida de grosor del epitelio o atrofia (Bouallegui *et al.*, 2017). Esta pérdida de la arquitectura normal del tejido gonadal en *C. undatella* fue evidente con la reducción y desaparición del tejido conectivo. Dicho fenómeno ha sido descrito previamente por Villalba *et al.* (2001).

A pesar de que *C. undatella* presenta actividad reproductiva todo el año, la alta prevalencia de infiltraciones hemocíticas y la pérdida de la arquitectura normal del tejido gonadal sugieren una potencial deficiencia en su reproducción. Es importante hacer más estudios (gasto

energético, fecundidad y viabilidad de los huevos) para confirmarlo y para determinar su relación con la contaminación presente en la zona.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue financiada por los proyectos SIP 20150117, 20160467, 20171428, SIP 20170262 y 20180442. C. A. Arce-Peinado es un estudiante becario CONACyT; los resultados presentados aquí son parte de su tesis doctoral.

REFERENCIAS

- ARIZPE-COVARRUBIAS, O. 1992. Los moluscos y su importancia comercial en el Pacífico mexicano. Libros universitarios 1, Serie Didáctica. Universidad Autónoma de Baja California Sur, La Paz, México. 219 p.
- AUFFRET, M. 1988. Histopathological changes related to chemical contamination in *Mytilus edulis* from field and experimental conditions. *Marine Ecology Progress Series* 46: 101-107.
- BAQUEIRO-CARDENAS, E. & J. A. MASSÓ-ROJAS. 1988. Variaciones poblacionales y reproducción de dos poblaciones de *Chione undatella* (Sowerby, 1835), bajo diferentes regímenes de pesca en la Bahía de La Paz, B.C.S., México. *Ciencia Pesquera* 6: 51-68.
- BIGNELL, J. P., G. D. STENTIFORD, N. G. H. TAYLOR & B. P. LYONS. 2011. Histopathology of mussels (*Mytilus sp.*) from the Tamar estuary, UK. *Marine Ecology Progress Series* 428: 111-122.

- rine Environmental Research 72: 25-32. DOI:10.1016/j.marenvres.2011.05.004
- BOSCOLO-PAPO, M., D. BERTOTTO, F. PASCOLI, L. LOCATELLO, M. VASCELLARI, C. POLTRONIERI, F. QUAGLIO & G. RADELLI. 2014. Induction of brown cells in *Venerupis philippinarum* exposed to benzo(a)pyrene. *Fish and Shellfish Immunology* 40: 233-238. DOI: 10.1016/j.fsi.2014.07.006
- BOUALLEGUI, Y., R. BEN-YOUNES, H. BELLAMINE & R. QUESLATI. 2017. Histopathology and Analyses of inflammation intensity in the gills of mussels exposed to silver nanoparticles: role of nanoparticle size, exposure time and uptake pathways. *Toxicology Mechanisms and Methods* 27 (8): 582-591. DOI: 10.1080/15376516.2017.1337258
- CADENA-CÁRDENAS, L., L. MÉNDEZ-RODRÍGUEZ, T. ZENTENO-SAVÍN, J. GARCÍA-HERNÁNDEZ & B. ACOSTA-VARGAS. 2009. Heavy metal levels in marine mollusks from areas with, or without, mining activities along the Gulf of California, Mexico. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* 57: 96-102. DOI: 10.1007/s00244-008-9236-0
- CARDOSO, J. M. F. M., D. LANGLET, J. F. LOFF, A. R. MARTINS, J. I. J. WITTE, P. T. SANTOS & H. W. VAN DER VEER. 2007. Spatial variability in growth and reproduction of the Pacific oyster *Crassostrea gigas* (Thunberg, 1793), along the west European coast. *Journal of Sea Research* 57 (4): 303-315. DOI: 10.1016/j.seares.2006.11.003
- CASTILLO-DURÁN, A., A. CASTRO-ACEDO, J. A. ARREOLA-LIZÁRRAGA, F. HOYOS-CHAIRES, C. CÁCERES-MARTÍNEZ, R. MENDOZA-SALGADO & J. CHÁVEZ-VILLALBA. 2013. Ciclo gametogénico e índice de condición de la almeja *Chione fluctifraga* en Bahía San Jorge, Golfo de California, México. *Revista de Biología Marina y Oceanografía* 48: 59-72. DOI: 10.4067/S0718-19572013000100006
- DARRIBA, S., F. SAN JUAN & A. GUERRA. 2004. Reproductive cycle of the razor clam *Ensis arcuatus* (Jeffreys, 1865) in northwest Spain and its relation to environmental conditions. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 311 (1): 101-115. DOI: 10.1016/j.jembe.2004.05.004
- DRIDI, S., M. S. ROMDHANE & M. ELCAFSI. 2007. Seasonal variation in weight and biochemical composition of the Pacific oyster, *Crassostrea gigas* in relation to the gametogenic cycle and environmental conditions of the Bizert lagoon, Tunisia. *Aquaculture* 263: 238-248. DOI: 10.1016/j.aquaculture.2006.10.028
- ENRÍQUEZ-DÍAZ, M., S. POUVREAU, J. CHÁVEZ-VILLALBA & M. LE PENNEC. 2009. Gametogenesis, reproductive investment, and spawning behavior of the Pacific giant oyster *Crassostrea gigas*: evidence of an environment-dependent strategy. *Aquaculture International* 17 (5): 491-506. DOI: 10.1007/s10499-008-9219-1
- FISHER, W., F. KRUPP, W. SCHNEIDER, C. SOMMER, K. E. CARPENTER & V. H. NIEM. 1995. *Guía FAO para la identificación de especies para los fines de la pesca. Pacífico centro oriental. Volumen I. Plantas e invertebrados*. FAO. Roma. 646 p.
- FREITES, L., C. CORDOVA, D. ARRIEche, L. MONTERO, N. GARCÍA & J. H. HIMMELMAN. 2010. Reproductive cycle of the penshell *Atrina seminuda* (Mollusca: Bivalvia) in northern waters of Venezuela. *Bulletin of Marine Science* 86 (4): 785-801. DOI: 10.5343/bms.2009.1077
- GARCÍA-DOMÍNGUEZ, F. A., G. GARCÍA-MELGAR & P. GONZÁLEZ-RAMÍREZ. 1993. Ciclo reproductivo de la almeja roñosa, *Chione californiensis* (Broderip, 1835), en Bahía Magdalena, Baja California Sur, México. *Ciencias Marinas* 19 (1): 15-28.
- GARMENDIA, L., M. SOTO, M. ORTIZ-ZARRAGOITIA, A. ORBEA, M. P. CAJARAVILLE & L. MARIGÓMEZ. 2011. Application of a battery of biomarkers in mussel digestive gland to asses long-term effects of the Prestige oil spill in Galicia and Bay of Biscay: correlation and multivariate analysis. *Journal of Environmental Monitoring* 13: 933-942. DOI: 10.1039/C0em00704h
- GÓNGORA-GÓMEZ, A., M. GARCÍA-ULLOA, M. ARELLANO-MARTÍNEZ, S. ABAD, A. DOMÍNGUEZ & J. PONCE-PALAFIX. 2016. Annual reproductive cycle and growth of the pen shell *Atrina maura* (Pterioidea: Pinnidae) on sand-bottom culture in the Ensenada Pabellones lagoon system, Gulf of California, Mexico. *Invertebrate Reproduction and Development* 60 (1): 28-38. DOI: 10.1080/07924259.2015.1126535
- GUTIÉRREZ-GALINDO, E. A., J. A. VILLAESCUSA-CELAYA & A. ARREOLA-CHIMAL. 1999. Bioaccumulation of metals in mussels from four sites of the coastal region of Baja California. *Ciencias Marinas* 25: 557-578.
- HUMASON, G. L. 1979. *Animal Tissue Techniques*. 3rd ed. W.H. Freeman & Co Ltd. San Francisco. 641 p.
- JENNINGS, S., S. P. R. GREENSTREET & J. D. REYNOLDS. 1999. Structural change in an exploited fish community: A consequence of differential fishing effects on species with contrasting life histories. *Journal of Animal Ecology* 68: 617-627. DOI: 10.1046/j.1365-2656.1999.00312.x
- KIM, Y. & E. N. POWELL. 2007. Distribution of parasites and pathologies in sentinel bivalves: NOAA status and trends "mussel watch" program. *Journal of Shellfish Research* 26: 1115-1151. DOI: 10.2983/0730-8000(2007)26[1115:dopapi]2.0.co;2
- LAUDIEN, J., T. BREY & W. E. ARNTZ. 2001. Reproduction and recruitment patterns of the surf clam *Donax serra* (Bivalvia, Donacidae) on two Namibian sandy beaches. *South African Journal of Marine Science* 23: 53-60. DOI: 10.2989/025776101784528980
- LOWE D. M. & N. M. MOORE. 1979. The cytology and occurrence of granulocytomas in mussels. *Marine Pollution Bulletin* 10: 137-141. DOI: 10.1016/0025-326x(79)90081-x
- MAEDA-MARTÍNEZ, A. N. (ed). 2001. *Los moluscos pectinídos de Iberoamérica: ciencia y acuicultura*. Editorial Limusa, México. 501 p.
- MOORE, H. B. & N. N. LÓPEZ. 1969. The ecology of *Chione ancellata*. *Bulletin of Marine Science* 19: 131-148.
- MULLER, W. A. 2003. Leukocyte-endothelial-cell interactions in leukocyte transmigration and the inflammatory response. *Trends in Immunology* 24: 326-333. DOI: 10.1016/S1471-4906(03)00117-0
- NEFF, J. M., R. E. HILLMAN, R. S. CARR, R. L. BUHL & J. I. LAHEY. 1987. Histopathologic and biochemical responses in arctic marine bivalve molluscs exposed to experimentally spilled oil. *Arctic* 40 (Supp. 1): 220-229.
- OTTAVIANI, E. 2011. Immunocyte: the invertebrate counterpart of the vertebrate macrophage. *Invertebrate Survival Journal* 8: 1-4. Disponible en línea en: <http://www.isj.unimo.it/articoli/ISJ224.pdf>
- OTTAVIANI, E., A. FRANCHINI & D. MALAGOLI. 2010. Inflammatory Response in Molluscs: Cross-Taxa and Evolutionary Considera-

- tions. *Current Pharmaceutical Design* 16: 4160-4165. DOI: [10.2174/138161210794519084](https://doi.org/10.2174/138161210794519084)
- RODRÍGUEZ-FIGUEROA, G. M., E. SHUMILIN & I. SÁNCHEZ-RODRÍGUEZ. 2009. Heavy metal pollution monitoring using the brown seaweed *Padina duri-villaei* in the coastal zone of the Santa Rosalía mining region, Baja California Peninsula, Mexico. *Journal of Applied Phycology* 21: 19-26. DOI: [10.1007/s10811-008-9346-0](https://doi.org/10.1007/s10811-008-9346-0)
- RODRÍGUEZ-JARAMILLO, C., A. N. MAEDA-MARTÍNEZ, M. E. VALDEZ, T. REYNOSO-GRA-NADOS, P. MONSALVO-SPENCER, D. PRADO-ANCONA, F. CARDOZA-VELASCO, M. ROBLES-MUNGARAY & M. T. SICARD. 2001. The effect of temperature on the reproductive maturity of the penshell *Atrina maura* (Sowerby, 1835) (Bivalvia: Pinnidae). *Journal of Shellfish Research* 20: 39-47.
- RUSSELL-PINTO, F., R. REIMÃO & M. DE SOUSA. 1994. Haemocytes in *Cerastoderma edule* (Mollusca, Bivalvia): distinct cell types engage in different responses to sheep erythrocytes. *Fish and Shellfish Immunology* 4: 383-397. DOI: [10.1006/fsim.1994.1033](https://doi.org/10.1006/fsim.1994.1033)
- SHUMILIN, E., G. M. RODRÍGUEZ-FIGUEROA, O. M. MORTON-BERMEA, E. LOUNEJ-VA-BATURINA, E. HERNÁNDEZ & D. RODRÍGUEZ-MEZA. 2000. Anomalous trace element composition of coastal sediments near the copper mining district of Santa Rosalía, Peninsula of Baja California, Mexico. *Bulletin of Environment Contamination and Toxicology* 65: 261-268. DOI: [10.1007/s0012800123](https://doi.org/10.1007/s0012800123)
- SHUMILIN, E., V. GORDEEV, G. RODRÍGUEZ-FIGUEROA, L. DEMINA & K. CHOUMLINE. 2011. Assessment of geochemical mobility of metals in surface sediments of the Santa Rosalía mining region, western Gulf of California. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* 60: 8-25. DOI: [10.1007/s00244-010-9532-3](https://doi.org/10.1007/s00244-010-9532-3)
- SHUMILIN, E., G. RODRÍGUEZ-FIGUEROA, D. SAPOZHNIKOV, Y. SAPOZHNIKOV & K. CHOUMLINE. 2012. Anthropogenic and authigenic uranium in marine sediments of the Central Gulf of California adjacent to the Santa Rosalía mining region. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* 63 (3): 309-322. DOI: [10.1007/s00244-012-9776-1](https://doi.org/10.1007/s00244-012-9776-1)
- SHUMILIN, E., A. JIMÉNEZ-ILLESCAS & S. LÓPEZ-LÓPEZ. 2013. Anthropogenic contamination of metals in sediments of the Santa Rosalía Harbor, Baja California Peninsula. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* 90: 333-337. DOI: [10.1007/s00128-012-0923-1](https://doi.org/10.1007/s00128-012-0923-1)
- SOKAL R. R. & F. J. ROHLF. 1979. *Biometría: Principios y métodos estadísticos en la investigación biológica*. H. Blume Ediciones, Madrid. 832 p.
- STEARNS, S. C. 2000. Life history evolution: successes, limitations, and prospects. *Naturwissenschaften* 87: 476-486. DOI: [10.1007/s001140050763](https://doi.org/10.1007/s001140050763)
- USHEVA, L. N., M. A. VASCHENKO & V. B. DURKINA. 2006. Histopathology of the digestive gland of the bivalve mollusk *Crenomytilus grayanus* (Dunker, 1853) from southwestern Peter the Great Bay, Sea of Japan. *Russian Journal of Marine Biology* 32: 166-172. DOI: [10.1134/s1063074006030047](https://doi.org/10.1134/s1063074006030047)
- VASCHENKO, M. A., H. L. HSIEH & V. I. RADASHEVSKY. 2013. Gonadal state of the oyster *Crassostrea angulata* cultivated in Taiwan. *Journal of Shellfish Research* 32: 471-482. DOI: [10.2983/035.032.0227](https://doi.org/10.2983/035.032.0227)
- VILLALBA, A., S. G. MOURELLE, M. J. CARBALLAL & C. LÓPEZ. 1997. Symbionts and diseases of farmed mussels *Mytilus galloprovincialis* throughout the culture process in the Rías of Galicia (NW Spain). *Diseases of Aquatic Organisms* 31: 127-139.
- VILLALBA, A., M. J. CARBALLAL & C. LÓPEZ. 2001. Disseminated neoplasia and large foci indicating heavy haemocytic infiltration in cockles *Cerastoderma edule* from Galicia (NW Spain). *Diseases of Aquatic Organisms* 46: 213-216.
- YEE-DUARTE, J. A., B. P. CEBALLOS-VÁZQUEZ, E. CHOUMLINE, K. KIDD & M. ARELLANO-MARTÍNEZ. 2017. Evidence of health impairment of *Megapitaria squalida* (Bivalvia: Veneridae) near the "hot spot" of a mining port, Gulf of California. *Hidrobiológica*, 27: 391-398.
- YEE-DUARTE, J. A., B. P. CEBALLOS-VÁZQUEZ, E. URIBE, O. LÓPEZ & M. ARELLANO-MARTÍNEZ. 2018. Histopathological alterations in the gonad of *Megapitaria squalida* (Mollusca: Bivalvia) inhabiting a heavy metals polluted environment. *Journal of Aquatic Animal Health* 30:144-154. DOI: [10.1002/aaah.10015](https://doi.org/10.1002/aaah.10015)
- ZAR, J. H. 1996. *Biostatistical analysis*. 3rd ed. Prentice Hall Inc., New Jersey. 662 p.