

La investigación reportada en esta tesis es parte de los programas de investigación del CICESE (Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California).

La investigación fue financiada por el SECIHTI (Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación).

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México). El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo o titular de los Derechos de Autor.

**Centro de Investigación Científica y de Educación
Superior de Ensenada, Baja California**



**Maestría en Ciencias
en Acuicultura**

**Efecto de dietas con diferentes niveles de ácidos grasos
omega-3 (DHA y EPA) sobre el crecimiento y la calidad gonadal
del erizo morado (*Strongylocentrotus purpuratus*)**

Tesis
para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
Maestro en Ciencias

Presenta:

Angélica Graciela Miranda Díaz

Ensenada, Baja California, México
2025

Tesis defendida por
Angélica Graciela Miranda Díaz

y aprobada por el siguiente Comité

Dra. Mónica Hernández Rodríguez
Codirectora de tesis

Dr. Juan Gabriel Correa Reyes
Codirector de tesis

Dra. Beatriz Cordero Esquivel

Dra. Ma. Elena Solana Arellano

Dr. Fernando Barreto Curiel



Dra. Fabiola Lafarga De la Cruz
Coordinadora del Posgrado en Acuicultura

Dra. Ana Denise Re Araujo
Directora de Estudios de Posgrado

Resumen de la tesis que presenta **Angélica Graciela Miranda Díaz** como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Acuicultura.

Efecto de dietas con diferentes niveles de ácidos grasos omega-3 (DHA y EPA) sobre el crecimiento y la calidad gonadal del erizo morado (*Strongylocentrotus purpuratus*)

Resumen aprobado por:

Dra. Mónica Hernández Rodríguez

Codirectora de tesis

Dr. Juan Gabriel Correa Reyes

Codirector de tesis

En la última década, el crecimiento poblacional del erizo morado *Strongylocentrotus purpuratus* ha ocasionado un deterioro significativo en el medio natural. Actualmente su captura se incluye junto con el erizo rojo *Mesocentrotus franciscanus*, sin embargo, por la baja calidad de sus gónadas en cuanto al color y tamaño, no son aceptadas en el mercado. Es importante buscar fuentes de alimento que permitan desarrollar el cultivo del erizo morado, especie con gran potencial para su cultivo. En el presente trabajo se evaluó el efecto de la inclusión de omega-3 en seis dietas formuladas para adultos de erizo morado (*S. purpuratus*) con distintas concentraciones de omega-3 (EPA y DHA): una dieta desgrasada A (0-) y B (0+), y otras con inclusión de omega-3 C (0.5%), D (1%), E (2%) y F (4%), respectivamente. Se evaluó la supervivencia, el crecimiento y la producción de gónadas. El experimento inició con 288 organismos de 28.17 ± 2.0 g y 40.5 ± 1.0 mm de longitud, los cuales fueron alimentados diariamente durante 115 días. Se utilizó un sistema de recirculación con 18 unidades experimentales (UE), en donde se colocaron 16 erizos por UE, para los seis tratamientos con sus tres repeticiones. Los resultados mostraron que no hubo diferencias significativas ($p > 0.05$) en supervivencia (89–100%), crecimiento total (7–8 g), calidad gonadal entre los tratamientos durante los 115 días de cultivo. El índice gonadal aumentó notablemente desde un valor inicial de 6.3% en organismos recolectados del medio natural, hasta valores de 15.8 % hasta 18.2 %. No obstante, se observó un incremento de EPA y DHA en las gónadas y una disminución en su firmeza conforme incrementó la concentración de omega-3 en la dieta. A pesar de los resultados obtenidos, aún es necesario profundizar en la evaluación de los parámetros relacionados con el crecimiento y la calidad gonadal, así como en el análisis detallado de las concentraciones de pigmentos presentes en las dietas.

Palabras clave: *Strongylocentrotus purpuratus*, calidad gonadal, ácidos grasos, omega-3, dietas, crecimiento

Abstract of the thesis presented by **Angélica Graciela Miranda Díaz** as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in Aquaculture.

Effect of diets with different levels of omega-3 fatty acids (DHA and EPA) on the growth and gonadal quality of the purple sea urchin (*Strongylocentrotus purpuratus*)

Abstract approved by:

Dra. Mónica Hernández Rodríguez

Thesis Co-director

Dr. Juan Gabriel Correa Reyes

Thesis Co-director

Over the last decade, the population growth of the purple sea urchin (*Strongylocentrotus purpuratus*) has led to significant deterioration of natural ecosystems. Currently, its harvest is grouped together with that of the red sea urchin (*Mesocentrotus franciscanus*); however, the gonads of *S. purpuratus* are not accepted in the market due to their low quality, primarily in terms of color and size. Therefore, it is important to identify food sources that can support the development of purple sea urchin aquaculture, as this species holds high potential for cultivation. In the present study, the effect of omega-3 inclusion in formulated diets for adult purple sea urchins (*S. purpuratus*) was evaluated on the survival, growth, and gonad production. The experiment began with 288 organisms weighing 28.17 ± 2.0 grams and measuring 40.5 ± 1.0 mm in length, which were fed daily for 115 days with six different diets containing varying concentrations of omega-3 (EPA and DHA): a defatted diet A(0-) and B(0+), and others including omega-3, C(0.5%), D(1%), E(2%), and F(4%), respectively. A recirculating system with 18 experimental units (EU) was used, with 16 sea urchins per EU, for the six treatments with their three replicates. The results showed no significant differences ($p > 0.05$) among treatments in terms of survival (ranging from 89% to 100%) or total growth (between 7 and 8 g) over the 115-day culture period. The gonadal index increased from an initial 6.3% in wild-caught individuals to values ranging from 15.8% to 18.2%, regardless of the dietary omega-3 concentration. Regarding gonad quality, no differences in color or texture were observed among sea urchins fed diets with different levels of omega-3. However, gonad firmness decreased as omega-3 inclusion increased. Despite these findings, further evaluation of the growth and gonadal quality parameters, as well as dietary pigment concentrations is still necessary.

Keywords: *Strongylocentrotus purpuratus*, gonads, fatty acids, diets, growth, quality

Dedicatoria

A mis padres Minerva Díaz Lam y José Guadalupe Miranda Márquez, por velar, cuidar de mí y apoyarme en cada una de mis decisiones. Gracias por todas sus enseñanzas y cariño incondicional, siempre dejando una puerta abierta en casa cada que decido volver. Son un gran ejemplo de padres y un amor de personas.

Esta tesis se las dedico con profundo amor y gratitud.

Agradecimientos

Al Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada, Baja California (CICESE) y al Departamento de Acuicultura, por permitirme realizar mis estudios de maestría y el presente proyecto.

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), por otorgarme la beca durante mi estancia en el posgrado.

A la Facultad de Ciencias Marinas y al Instituto de Investigaciones Oceanológicas por permitirme realizar la investigación dentro de sus instalaciones.

A la Dra. Mónica Hernández Rodríguez, por su valiosa enseñanza y dedicación a lo largo del desarrollo de este trabajo. Le agradezco su paciencia y todas sus observaciones, que fueron clave en mi formación durante mi estancia en el posgrado. Más allá del acompañamiento académico, valoro profundamente el apoyo personal que me brindó en los momentos en que más lo necesité. La admiro y respeto mucho, tanto como mentora como persona, muchas gracias.

Al Dr. Juan Gabriel Correa Reyes, por su enseñanza constante y motivación a lo largo de todos estos años. Gracias por mantener sus puertas abiertas cuando lo necesité y brindarme su apoyo ante cualquier duda o dificultad durante mi formación académica. Sus palabras de aliento fueron de gran ayuda en esta etapa de mi vida, lo cual valoro y aprecio profundamente. Extiendo también mi agradecimiento a su esposa, la Sra. Letty, por su calidez y acompañamiento en esos momentos.

Al Dr. Fernando Barreto Curiel, por su compromiso, entrega y amplio conocimiento del cual ha sido un pilar para mi formación profesional. Su guía y acompañamiento fue indispensable para el desarrollo del experimento, y su dedicación promueve una pasión a seguir aprendiendo. Le agradezco su tiempo, paciencia y la claridad con la que compartió su experiencia, marcando una diferencia en mi crecimiento académico y personal.

A la Dra. Beatriz Cordero Esquivel, por su valiosa enseñanza, motivación constante y por sus observaciones que enriquecieron el trabajo. Le agradezco por estar atenta a mi proceso, brindándome su apoyo durante la maestría. Me recibió siempre con los brazos abiertos en su laboratorio y me adoptó como una estudiante más, lo cual me ofreció no solo un espacio de trabajo, sino también un refugio donde buscaba tranquilidad. Su calidez y atención fue única, muchas gracias.

A la Dra. Elena Solana Arellano, por su tiempo, disposición y comentarios que contribuyeron positivamente a complementar este trabajo. Su claridad de resolver mis dudas y orientarme a enfocar las ideas con las herramientas necesarias fueron fundamentales, gracias.

Al grupo de buzos ANDI, que me aconsejaron y apoyaron en la extracción de los erizos morados, que, sin dudarlo, estuvieron dispuestos a participar en el proyecto, gracias.

Al M. en C. Raúl Herrera, por su tiempo y constante apoyo a lo largo de mis estudios. Gracias por su ayuda en la toma de fotografías de los organismos, por estar siempre disponible para resolver mis dudas sobre la evaluación de calidad y por su paciencia y disposición.

Al Dr. Julio Palleiro Nayar, por su asesoría y paciencia durante el experimento, al igual que su disponibilidad para aclarar mis dudas y participar en distintas etapas del trabajo, gracias.

A los distintos profesionistas que participaron en la encuesta de evaluación gonadal, quienes formaron una parte esencial de este trabajo al brindarme información valiosa y observaciones acertadas para la finalización del experimento. En especial, agradezco al Dr. Luis Malpica y al M. César Patrón por su colaboración y disposición.

A la técnico Samantha Victoria Cota, muchas gracias por tu asesoramiento y apoyo a lo largo de mi trabajo de investigación. Siempre estuviste ahí para escucharnos con gusto y calidez, sobrellevando cualquier complicación de la forma más amena. Se te aprecia mucho.

Al Departamento de Acuicultura del CICESE y a sus maestros y técnicos por los aprendizajes que me transmitieron.

Al técnico Abelardo Campos, por su disposición y apoyo constante para resolver mis dudas, al igual por su enseñanza del correcto manejo de equipos del laboratorio. Tu entusiasmo por fomentar el aprendizaje en cada estudiante es único, gracias.

Al técnico Luis Murillo Valenzuela, por apoyarme en la realización de las biometrías y por recibirme siempre con una actitud entusiasta en el laboratorio.

A los laboratorios de Nutrición de la Facultad de Ciencias Marinas de la UABC y del CICESE, por facilitarme el uso de sus espacios y/o materiales, lo cual fue esencial para llevar a cabo este trabajo. Agradezco la colaboración brindada por ambas instituciones.

A las asistentes del Departamento de Acuicultura: Dalila, Cecilia y Bibiana por brindarme la información y apoyo en los procesos de trámites administrativos

A Aldo, que compartimos aprendizajes y laboratorios durante toda la maestría. Gracias por tu ayuda y disposición en el trabajo, a escuchar mis problemas, y los días de chismecitos.

A Christian Patarroyo, por ser más que un compañero de laboratorio; un amigo. Aprendimos juntos a manejar situaciones de estrés y a disfrutar estos últimos meses. Te aprecio bastante, a ti y a todos los chismecitos matutinos, gracias.

A Romario Reyes, siendo un gran amigo y excelente compañero en gran parte de mi vida académica. Te admiro y quiero con todo el corazón, y sin ti, este experimento no hubiera sido posible. ¡Por más logros, campeón!

A mis hermanas. Yisel, por siempre motivarme y estar dispuesta a levantarme el ánimo para salir adelante. A Olga, por preocuparse por mí, y escucharme sin importar la distancia. En los momentos que sentía como me ahogaba, estuvieron ahí tu y Carlos para apoyarme y escucharme siempre. Los quiero, muchísimas gracias.

A mis amistades de UABC, siempre estando a disposición de escucharme y apoyarme, principalmente a Charlie por sus consejos y tardes de chismecitos, eran curitas en el alma.

A mis compañeros del posgrado, que vivimos juntos este largo camino. Agradezco todos los momentos donde salimos y convivimos. En especial a Nayeli, Mayra y Evelyn, que se convirtieron en las amigas que siempre quise y necesitaba, gracias por su hermosa amistad.

A la Ing. Krishna Olvera. Usted y su familia me acogieron como una integrante más, creyó en mí y me apoyó en todo momento. No existen palabras con lo que demuestren mi eterno agradecimiento, la quiero con todo mi corazón.

A Andrea, por poder contar con su amistad desde la universidad. A pesar de que el tiempo ha separado nuestros caminos, tenemos esa bonita amistad irremplazable. Sé que puedo contar contigo, como sé que siempre estaré ahí para lo que necesites mujer, gracias.

A Enrique Contreras. La persona que me demostró el valor de la palabra amistad y me enseñó a superarme y disfrutar el proceso. Un amigo que me apoyó a motivarme a seguir estudiando y trabajando, levantándose en momentos oscuros de mi vida, gracias por todo.

En general, quiero agradecer a todos los que me apoyaron. Tanto a gente de Tijuana como Ensenada, que siempre estuvieron dispuestos a apoyarme, y me hicieron sentir como en casa.

Tabla de contenido

	Página
Resumen en español.....	ii
Resumen en inglés.....	iii
Dedicatoria	iii
Agradecimientos.....	iv
Lista de figuras.....	xi
Lista de tablas	xii
Capítulo 1. Introducción	1
1.1 Taxonomía del erizo morado y comportamiento en el medio natural	2
1.2 Antecedentes	6
1.2.1 Efecto de la alimentación en el crecimiento gonadal del erizo de mar	7
1.3 Justificación	9
1.4 Hipótesis.....	10
1.5 Objetivos	10
1.5.1 Objetivo general	10
1.5.2 Objetivos específicos.....	10
Capítulo 2. Metodología.....	12
2.1 Colecta y biometría inicial del erizo morado <i>Strongylocentrotus purpuratus</i> en el medio natural	12
2.2 Sistema experimental.....	13
2.3 Formulación y elaboración de dietas	16
2.4 Evaluación de la composición proximal de las dietas y gónadas de erizo	18
2.4.1 Proteínas	19
2.4.2 Lípidos	19
2.4.2.1 Identificación de lípidos en ingredientes de la dieta	20

2.4.3	Peso seco y cenizas.....	20
2.4.4	Transmetilación de muestras para la extracción de ácidos grasos.....	20
2.5	Condiciones de cultivo	21
2.6	Evaluación de variables de crecimiento y calidad gonadal.....	23
2.6.1	Supervivencia	23
2.6.2	Crecimiento (peso y diámetro de testa)	23
2.6.3	Tasa de conversión alimenticia (TCA)	24
2.6.4	Índice gonadal (IG)	24
2.6.5	Parámetros de calidad gonadal.....	24
2.7	Composición proximal y análisis de ácidos grasos de las gónadas de los erizos alimentados con las dietas experimentales y de los recolectados del medio natural.....	26
2.8	Análisis estadístico	27
Capítulo 3.	Resultados.....	28
3.1	Evaluación de la composición proximal de dietas formuladas	28
3.1.1	Proteínas totales	28
3.1.2	Lípidos totales	28
3.1.3	Cenizas, peso seco y peso orgánico	28
3.1.4	Extracto libre de nitrógeno (ELN).....	29
3.1.5	Concentración de ácidos grasos en la dieta	29
3.2	Crecimiento y calidad gonadal del erizo morado.....	32
3.2.1	Supervivencia	32
3.2.2	Crecimiento en peso y diámetro de testa	32
3.2.3	Tasa de conversión alimenticia (TCA)	32
3.2.4	Índice gonadal	32
3.2.5	Determinación de calidad de las gónadas.....	34
3.2.5.1	Evaluación mediante encuesta visual	35

3.3	Composición proximal de gónadas del erizo morado alimentados con las diferentes dietas	36
3.3.1	Proteínas de las gónadas de erizo morado	36
3.3.2	Lípidos totales en gónadas	36
3.3.3	Peso seco de gónadas	36
3.3.4	Extracto Libre de Nitrógeno	37
3.3.5	Identificación de ácidos grasos en las gónadas.....	37
Capítulo 4.	Discusión	41
Capítulo 5.	Conclusiones.....	51
5.1	Recomendaciones	51
Literatura citada	53
Anexos	63

Lista de figuras

Página

Figura 1. Anatomía del erizo de mar (Imagen tomada del DOF, 2012).	3
Figura 2. Zonas del litoral (recuperado de https://allyouneedisbiology.wordpress.com/tag/zona-supralitoral/).	5
Figura 3. Imagen satelital de la ubicación del área de muestreo en Campo Kennedy (círculo rojo) en Ensenada, B.C., México, de donde se extrajeron los juveniles de erizo morado (<i>S. purpuratus</i>). Imagen tomada de Google Maps 2024 (https://www.google.com/maps) y modificada.	13
Figura 4. Imagen de la configuración de las unidades experimentales donde se realizó el cultivo del erizo morado (<i>S. purpuratus</i>). A) entrada de agua de mar; B) tubo de nivel con filtro para remoción de sólidos; C) piedra de aireación.	14
Figura 5. Esquema del sistema experimental donde se mantuvieron los erizos durante el cultivo. Línea amarilla: Entrada de aire a cada unidad experimental. Línea azul: Entrada de agua de mar limpia y esterilizada por luz UV del reservorio del sistema de recirculación, pasada previamente por un biofiltro. Línea verde: Línea de salida de agua para transporte de sólidos al biofiltro externo del sistema. Cuadro rojo: Unidades experimentales.	15
Figura 6. Unidades experimentales en el laboratorio de la unidad de cuarentena del IIO - UABC, con abastecimiento de agua de mar de un sistema de recirculación.	15
Figura 7. Crecimiento total en peso de los erizos morados alimentados con las distintas dietas experimentales durante los 115 días del cultivo. Dieta A(0-): harina de pescado desgrasada sin inclusión de ácidos grasos (AG's) omega-3 (control negativo); Dieta B(0+): harina de pescado sin desgrasar y sin inclusión de AG's omega-3 (control positivo); Dieta C(0.5%): harina de pescado sin desgrasar con inclusión del 0.5% de AG's omega-3; Dieta D(1%): harina de pescado sin desgrasar con inclusión del 1% de AG's omega-3; Dieta E(2%): harina de pescado sin desgrasar con inclusión del 2% de AG's omega-3; Dieta F(4%): harina de pescado sin desgrasar con inclusión del 4% de AG's omega-3.	33
Figura 8. Ruta de biosíntesis de ácidos grasos de cadena larga (LC-PUFA) de precursores C18 AG poliinsaturados, aceptados en vertebrados.	64

Lista de tablas

Tabla	Página
Tabla 1. Criterios para evaluar la calidad gonadal del erizo de mar propuestos por Pearce <i>et al.</i> (2002). Los valores menores de la escala corresponden a lo más deseados y determinan su mayor calidad en el mercado.....	8
Tabla 2. Relación y cantidad de ingredientes (g/100 g) utilizados para la formulación de las dietas experimentales utilizadas en el bioensayo de maduración de erizo morado (<i>S. purpuratus</i>) cultivado durante 115 días. Dieta A (0-): harina de pescado desgrasada sin inclusión de ácidos grasos (AG's) omega-3 (control negativo); Dieta B (0+): harina de pescado sin desgrasar y sin inclusión de AG's omega-3 (control positivo); Dieta C (0.5%): harina de pescado sin desgrasar con inclusión del 0.5% de AG's omega-3; Dieta D (1%): harina de pescado sin desgrasar con inclusión del 1% de AG's omega-3; Dieta E (2%): harina de pescado sin desgrasar con inclusión del 2% de AG's omega-3; Dieta F (4%): harina de pescado sin desgrasar con inclusión del 4% de AG's omega-3.....	17
Tabla 3. Composición proximal estimada en la formulación de las dietas experimentales utilizadas en el bioensayo de maduración de erizo morado (<i>S. purpuratus</i>) durante 115 días. Dieta A (0-): harina de pescado desgrasada sin inclusión de ácidos grasos (AG's) omega-3 (control negativo); Dieta B (0+): harina de pescado sin desgrasar y sin inclusión de AG's omega-3 (control positivo); Dieta C (0.5%): harina de pescado sin desgrasar con inclusión del 0.5% de AG's omega-3; Dieta D (1%): harina de pescado sin desgrasar con inclusión del 1% de AG's omega-3; Dieta E (2%): harina de pescado sin desgrasar con inclusión del 2% de AG's omega-3; Dieta F (4%): harina de pescado sin desgrasar con inclusión del 4% de AG's omega-3.....	17
Tabla 4. Valores promedio y desviación estándar de los parámetros fisicoquímicos de la calidad de agua de mar en el sistema de recirculación (SRA) donde los juveniles de erizo morado (<i>S. purpuratus</i>) fueron cultivados durante 115 días.	22
Tabla 5. Parámetros de evaluación y valor del grado para evaluar en la calidad gonadal para los erizos con base en la propuesta de Pearce <i>et al.</i> (2002). Valores menores significan una mejor evaluación y/o calidad gonadal.	25
Tabla 6. Valores promedio y desviación estándar del porcentaje de proteínas, lípidos, peso de cenizas (%), peso seco, peso orgánico ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$) y extracto libre de nitrógeno (ELN), en las dietas proporcionadas al erizo morado (<i>S. purpuratus</i>). Dieta A (0-): harina de pescado desgrasada sin inclusión de ácidos grasos (AG's) omega-3 (control negativo); Dieta B (0+): harina de pescado sin desgrasar y sin inclusión de AG's omega-3 (control positivo); Dieta C (0.5%): harina de pescado sin desgrasar con inclusión del 0.5% de AG's omega-3; Dieta D (1%): harina de pescado sin desgrasar con inclusión del 1% de AG's omega-3; Dieta E (2%): harina de pescado sin desgrasar con inclusión del 2% de AG's omega-3; Dieta F (4%): harina de pescado sin desgrasar con inclusión del 4% de AG's omega-3. Los valores de $p < 0.05$ representan diferencias significativas.....	29
Tabla 7. Concentración en $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ de la suma de los ácidos grasos saturados (AGS), monoinsaturados (AGMI), poliinsaturados (AGPI) y la suma total de los ácidos grasos en las dietas con distintas inclusiones de omega-3. Dieta A (0-): harina de pescado desgrasada sin inclusión de ácidos grasos (AG's) omega-3 (control negativo); Dieta B (0+): harina de pescado sin desgrasar y sin inclusión de AG's omega-3 (control positivo); Dieta C (0.5%): harina de pescado sin desgrasar con inclusión del 0.5% de	

AG's omega-3; Dieta D (1%): harina de pescado sin desgrasar con inclusión del 1% de AG's omega-3; Dieta E (2%): harina de pescado sin desgrasar con inclusión del 2% de AG's omega-3; Dieta F (4%): harina de pescado sin desgrasar con inclusión del 4% de AG's omega-3. Los valores de $p < 0.05$ representan diferencias significativas..... 30

Tabla 8. Concentración en $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ de EPA y DHA en las dietas formuladas para el erizo. Dieta A (0-): harina de pescado desgrasada sin inclusión de ácidos grasos (AG's) omega-3 (control negativo); Dieta B (0+): harina de pescado sin desgrasar y sin inclusión de AG's omega-3 (control positivo); Dieta C (0.5%): harina de pescado sin desgrasar con inclusión del 0.5% de AG's omega-3; Dieta D (1%): harina de pescado sin desgrasar con inclusión del 1% de AG's omega-3; Dieta E (2%): harina de pescado sin desgrasar con inclusión del 2% de AG's omega-3; Dieta F (4%): harina de pescado sin desgrasar con inclusión del 4% de AG's omega-3. Los valores de $p < 0.05$ representan diferencias significativas.... 30

Tabla 9. Concentración en $\text{mg}\cdot 100\text{g}$ y cambio neto (CN) de los ácidos grasos identificados en las dietas con distintas inclusiones de omega-3. Dieta A (0-): harina de pescado desgrasada sin inclusión de ácidos grasos (AG's) omega-3 (control negativo); Dieta B (0+): harina de pescado sin desgrasar y sin inclusión de AG's omega-3 (control positivo); Dieta C (0.5%): harina de pescado sin desgrasar con inclusión del 0.5% de AG's omega-3; Dieta D (1%): harina de pescado sin desgrasar con inclusión del 1% de AG's omega-3; Dieta E (2%): harina de pescado sin desgrasar con inclusión del 2% de AG's omega-3; Dieta F (4%): harina de pescado sin desgrasar con inclusión del 4% de AG's omega-3. 31

Tabla 10. Valores promedio y desviación estándar de la morfometría, índice gonadal y porcentaje de supervivencia de erizo morado (*S. purpuratus*) alimentados con las diferentes dietas durante los 115 días de cultivo. Dieta A (0-): harina de pescado desgrasada sin inclusión de ácidos grasos (AG's) omega-3 (control negativo); Dieta B (0+): harina de pescado sin desgrasar y sin inclusión de AG's omega-3 (control positivo); Dieta C (0.5%): harina de pescado sin desgrasar con inclusión del 0.5% de AG's omega-3; Dieta D (1%): harina de pescado sin desgrasar con inclusión del 1% de AG's omega-3; Dieta E (2%): harina de pescado sin desgrasar con inclusión del 2% de AG's omega-3; Dieta F (4%): harina de pescado sin desgrasar con inclusión del 4% de AG's omega-3..... 33

Tabla 11. Modas obtenidas de la encuesta visual de las variables de firmeza, textura y color de las gónadas de los erizos morados alimentados con las distintas dietas durante los 115 días de cultivo. Dieta A (0-): harina de pescado desgrasada sin inclusión de ácidos grasos (AG's) omega-3 (control negativo); Dieta B (0+): harina de pescado sin desgrasar y sin inclusión de AG's omega-3 (control positivo); Dieta C (0.5%): harina de pescado sin desgrasar con inclusión del 0.5% de AG's omega-3; Dieta D (1%): harina de pescado sin desgrasar con inclusión del 1% de AG's omega-3; Dieta E (2%): harina de pescado sin desgrasar con inclusión del 2% de AG's omega-3; Dieta F (4%): harina de pescado sin desgrasar con inclusión del 4% de AG's omega-3. 35

Tabla 12. Valores promedio y desviación estándar del porcentaje de proteínas, lípidos, peso de cenizas y ELN; así como el peso seco y orgánico (%) en las gónadas de los juveniles de erizo morado (*S. purpuratus*) alimentados con las dietas experimentales. Dieta A (0-): harina de pescado desgrasada sin inclusión de ácidos grasos (AG's) omega-3 (control negativo); Dieta B (0+): harina de pescado sin desgrasar y sin inclusión de AG's omega-3 (control positivo); Dieta C (0.5%): harina de pescado sin desgrasar con inclusión del 0.5% de AG's omega-3; Dieta D (1%): harina de pescado sin desgrasar con inclusión del 1% de AG's omega-3; Dieta E (2%): harina de pescado sin desgrasar con inclusión del 2% de AG's omega-3; Dieta F (4%): harina de pescado sin desgrasar con inclusión del 4% de AG's omega-3. Los valores de $p < 0.05$ representan diferencias significativas. 37

Tabla 13. Concentración en $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ de la suma de los ácidos grasos saturados (AGS), monoinsaturados (AGMI), poliinsaturados (AGPI) y del total de los ácidos grasos, de las gónadas de erizos alimentados con las distintas dietas. Dieta A (0-): harina de pescado desgrasada sin inclusión de ácidos grasos (AG's) omega-3 (control negativo); Dieta B (0+): harina de pescado sin desgrasar y sin inclusión de AG's omega-3 (control positivo); Dieta C (0.5%): harina de pescado sin desgrasar con inclusión del 0.5% de AG's omega-3; Dieta D (1%): harina de pescado sin desgrasar con inclusión del 1% de AG's omega-3; Dieta E (2%): harina de pescado sin desgrasar con inclusión del 2% de AG's omega-3; Dieta F (4%): harina de pescado sin desgrasar con inclusión del 4% de AG's omega-3. Valores de $p < 0.05$ indican diferencias significativas. 38

Tabla 14. Concentración en $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ de EPA y DHA en las gónadas de los erizos alimentados con las diferentes dietas que contenían la inclusión de omega-3. Dieta A (0-): harina de pescado desgrasada sin inclusión de ácidos grasos (AG's) omega-3 (control negativo); Dieta B (0+): harina de pescado sin desgrasar y sin inclusión de AG's omega-3 (control positivo); Dieta C (0.5%): harina de pescado sin desgrasar con inclusión del 0.5% de AG's omega-3; Dieta D (1%): harina de pescado sin desgrasar con inclusión del 1% de AG's omega-3; Dieta E (2%): harina de pescado sin desgrasar con inclusión del 2% de AG's omega-3; Dieta F (4%): harina de pescado sin desgrasar con inclusión del 4% de AG's omega-3. Valores de $p < 0.05$ indican diferencias significativas. 39

Tabla 15. Concentración en $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ y cambio neto (CN) de los ácidos grasos identificados en gónadas de erizo morado del medio natural (inicial) y de los alimentados con las diferentes dietas. Inicial: Muestra de gónadas de la biometría inicial (día 0), provenientes del medio natural, sin ser alimentados con algún tratamiento. Dieta A (0-): harina de pescado desgrasada sin inclusión de ácidos grasos (AG's) omega-3 (control negativo); Dieta B (0+): harina de pescado sin desgrasar y sin inclusión de AG's omega-3 (control positivo); Dieta C (0.5%): harina de pescado sin desgrasar con inclusión del 0.5% de AG's omega-3; Dieta D (1%): harina de pescado sin desgrasar con inclusión del 1% de AG's omega-3; Dieta E (2%): harina de pescado sin desgrasar con inclusión del 2% de AG's omega-3; Dieta F (4%): harina de pescado sin desgrasar con inclusión del 4% de AG's omega-3..... 40

Capítulo 1. Introducción

El erizo morado (*Strongylocentrotus purpuratus*) es una especie principalmente herbívora que ha causado gran parte del desequilibrio ecológico en las costas del Pacífico Norte (Watanabe y Harrold, 1991; Pearse, 2006; Palleiro-Nayar *et al.*, 2008; Ling *et al.*, 2015; Rogers y Catton, 2019). El crecimiento poblacional de la especie se infiere por la disminución de sus depredadores, como las nutrias (*Enhydra lutris nereis*), langostas (*Panulirus interruptus*), pez vieja (*Semicossyphus pulcher*) y estrellas de mar (*Pycnopodia helianthoides*, *Pisaster ochraceus*). El erizo morado se alimenta de los mantos de macroalgas, principalmente del Kelp gigante (*Macrocystis pyrifera*), de la cual, se consume su estipe y esporofitos, causando el desprendimiento del alga parda del sustrato, lo que también trae como consecuencia que exista una menor disponibilidad de alimento para otros organismos (Ebert, 1968; Elnor y Vadas, 1990; Sala y Graham, 2002; Beas Luna, 2005). Esta problemática se acentúa debido a que el alga también es afectada por los cambios de temperatura y la calidad del agua atribuido al cambio climático, así como a la competencia con algas invasoras, lo que representa una limitante para su recuperación en el medio natural (Gómez-Gómez, 2015; Vilalta-Navas, 2017).

En México, la pesquería del erizo inició en 1972 con el erizo rojo (*Mesocentrotus franciscanus*), debido a que la calidad de sus gónadas es de las más apreciadas por el mercado asiático (Palleiro-Nayar, *et al.*, 2013), y fue hasta el año 1993 cuando se incluyó la captura del erizo morado (*S. purpuratus*) por recomendación del Centro Regional de Investigaciones Pesqueras de Ensenada (CRIP), con el fin de controlar su crecimiento y densidad en el medio natural, así como ayudar a la recuperación del erizo rojo en Baja California (Palleiro-Nayar *et al.*, n.d.; Palleiro-Nayar *et al.*, 2008). Los bancos naturales de erizos con importancia pesquera han ido disminuyendo en todo el mundo, debido a la sobrepesca como ha ocurrido con el erizo rojo, lo que ha propiciado que el erizo morado se distribuya a mayores profundidades y consuma en mayor medida los mantos de macroalgas de las zonas donde antes se encontraba la presencia del erizo rojo (Salgado-Rogel *et al.*, 2003; Senaratna *et al.*, 2005; Palleiro-Nayar *et al.*, 2013). Esta situación ha generado otra problemática relacionada con la disminución de los bosques de macroalgas, y es el incremento poblacional de los erizos morados. El pastoreo de los erizos ha alterado los bosques marinos, siendo el hábitat y alimento de organismos bentónicos y pelágicos, como el erizo rojo, abulones, caracoles, langostas y algunos peces (Cota-Villavicencio *et al.*, 1996; Palleiro-Nayar, 2004). En las tasas de pastoreo del erizo rojo se ha documentado que consume 686 g/ m² de *Macrocystis pyrifera* al día, comparado con el erizo morado que consume 755 g/ m² en condiciones térmicas de 13 hasta 19 °C

(Jangoux y Lawrence, 1982). Estos datos indicarían que la diferencia en la tasa de pastoreo del erizo morado estaría teniendo un mayor impacto en el ecosistema donde se distribuye.

Para poder atender esta problemática, se ha planteado impulsar la pesquería del erizo morado y su engorda en sistemas de recirculación, lo cual constituye una propuesta que puede beneficiar a la economía local, el bienestar de los erizos y mejorar las condiciones en el medio natural (Bustos y Olave, 2001; Palleiro-Nayar *et al.*, 2008; Garcés, *et al.*, 2024). Además, la propuesta se vincula con los objetivos de desarrollo sostenible propuestos por la Organización de las Naciones Unidas (ONU), específicamente en el objetivo de vida submarina que busca conservar y utilizar los océanos, mares y recursos marinos de manera sostenible. La propuesta está orientada a proteger los hábitats más vulnerables, conservar la biodiversidad y garantizar un futuro sostenible en el sector pesquero, tal como lo demuestra la participación de la pesquería del erizo morado, al promover la captura de una especie con potencial comercial que ha proliferado y afectado negativamente los bosques marinos de California (Rogers y Catton, 2019).

Los erizos morados en el medio natural presentan un tamaño menor y baja calidad gonadal (coloración oscura y sin firmeza) para su comercialización. Esta condición se atribuye a la baja disponibilidad de alimento, provocada por el aumento en la densidad poblacional, lo cual representa una limitante importante para la pesquería de la especie. Para atender esta problemática, se ha propuesto realizar la captura del erizo morado para su comercialización, o mantenerlos en sistemas y alimentarlos con dietas naturales y formuladas hasta que puedan reunir las características para generar un valor en el mercado (Palleiro-Nayar *et al.*, 2008; García, 2022). Los estudios relacionados con la alimentación de erizos se han realizado con el objetivo de que en un futuro se pueda desarrollar su cultivo en México (George *et al.*, 2001; García-Chávez, 2012; García-Mendoza, 2015; Cuesta-Gomez, 2017).

1.1 Taxonomía del erizo morado y comportamiento en el medio natural

El erizo morado pertenece al grupo de los equinodermos, un conjunto de organismos con importancia ecológica y comercial, entre los que también se encuentran las estrellas de mar y los pepinos de mar. La presencia o disminución de estos organismos suele estar asociada a cambios en el medio marino, siendo el erizo de mar el que impacta más a los bosques de macroalgas por sus hábitos herbívoros (Watanabe y Harrold, 1991; Beas-Luna, 2005; Pearse, 2006; Beas-Luna *et al.*, 2019).

La clasificación taxonómica del erizo morado es la siguiente:

Phylum Echinodermata

Subphylum Eleutherozoa

Clase Echinoidea

Familia Strongylocentridae

Género *Strongylocentrotus*

Especie *S. purpuratus* (Stimpson, 1857)

El erizo morado *S. purpuratus* es un equinodermo dioico con simetría radial y no presenta un dimorfismo sexual, debido a que sus órganos reproductivos se encuentran dentro de su testa, y está compuesto por cinco gónadas (Secretaría de Agricultura, 2012). La testa (o caparazón) es un exoesqueleto compuesto de carbonato de calcio, que se encuentra cubierto de espículas o espinas moradas que utiliza como protección y para la locomoción. También cuentan con pies tubulares ambulacrales que les sirve para moverse, alimentarse, fijarse en superficies, y protegerse de sus depredadores (Fig. 1) (Workman, 1999; Beas-Luna, 2005; Carlton, 2007).

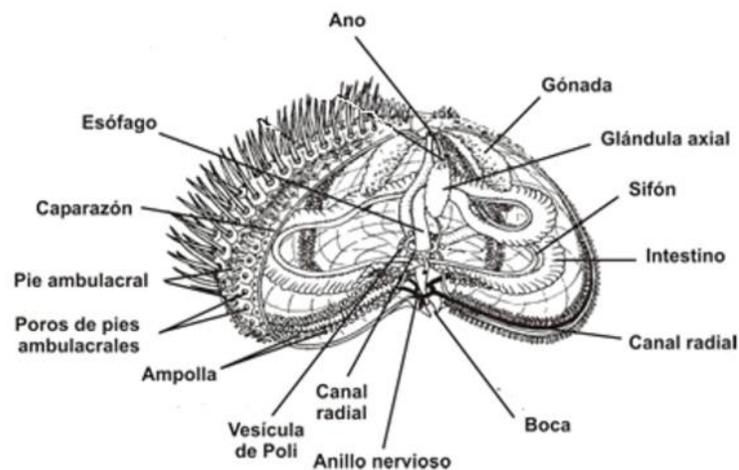


Figura 1. Anatomía del erizo de mar (Imagen tomada del DOF, 2012).

El erizo de mar es un organismo que se distribuye en todo el mundo, siendo un componente importante de las comunidades marinas (Arredondo y Mungaray, 1997; Pearse, 2006). Existen dos especies de erizo con importancia comercial y ecológica en Baja California, México; el erizo rojo (*Mesocentrotus franciscanus* antes conocido como *Strongylocentrotus franciscanus*) y el erizo morado (*Strongylocentrotus purpuratus*).

Ambas especies suelen encontrarse desde Alaska hasta Isla de Cedros, B.C. (Morris *et al.*, 1980; Carlton, 2007; Palleiro-Nayar *et al.*, 2009).

Los ambientes bentónicos donde habitan los erizos juegan un papel fundamental en el flujo de materia y energía, siendo importante para la ecología de zonas costeras. Los erizos de mar son especies clave en el hábitat bentónico de las costas del Pacífico Norte, debido a que su comportamiento puede cambiar la estructura y distribución de los mantos de macroalgas (Watanabe y Harrold, 1991; Epherra *et al.*, 2017), ya que se alimentan de ellas hasta un 6.4 % de su peso total (Workman, 1999). Estos animales tienen la característica de tolerar distintas condiciones ambientales, y soportan periodos de escasez de alimento por competencia intraespecífica con otras especies, o por la desaparición de los mantos de macroalgas (Garrido-Sanahuja, 2003; Epherra *et al.*, 2017). La problemática se agrava cuando se generan los “desiertos o barreras de erizos”; un comportamiento característico de los erizos de mar cuando se presentan en abundancia y existe una baja productividad primaria, lo que causa la deforestación de las macroalgas por pastoreo, resultando en un cambio del ecosistema y en el asentamiento de algas coralinas (Filbee-Dexter y Scheibling, 2014; Melis *et al.*, 2019). En 1991, Watanabe y Harold reportaron que la deforestación de los bosques de macroalgas en arrecifes rocosos en California es afectada por la presencia de erizos de mar, aunado a la influencia de factores ambientales y reproductivos de las algas.

Los bosques de macroalgas son ecosistemas altamente productivos que proporcionan de alimento y hábitat a varias especies marinas (The University of Maine, n.d.). *M. pyrifera* constituye la mayor parte de los bosques de macroalga en las costas del Pacífico Norte y es la principal fuente de alimento del erizo morado. Esta macroalga habita comúnmente en ambientes de alta energía, caracterizados por un gran flujo de agua y nutrientes (Seymour *et al.*, 1989). Sin embargo, fenómenos como El Niño, el cambio climático, las etapas de alta voracidad del erizo morado y la competencia con algas invasoras han contribuido a la disminución de sus poblaciones (Tegner y Dayton, 2000; Beas-Luna *et al.*, 2019).

En la ausencia de alimento, el erizo de mar puede reducir su metabolismo, lo que les permite estar en un estado de inanición por meses (Dolinar y Edwards, 2021a, 2021b; Spindel *et al.*, 2021). Esta capacidad de adaptación ha contribuido a su dominio en los fondos marinos, ecosistemas que han estado afectados durante años. Los erizos de mar también toleran amplios rangos de temperatura entre los 2 hasta 23° C, debido a que se han adaptado a vivir en ambientes expuestos y cambiantes del intermareal rocoso en el que habitan. Estos animales suelen moverse en la columna de agua en busca de alimento, pero por competencia interespecífica con el erizo rojo, suelen mantenerse en el sublitoral (Fig. 2). En el caso de que exista escasez de alimento y otros erizos en la zona, puede desplazarse a zonas más profundas, donde se

han reportado erizos hasta 160 m de profundidad (Morris *et al.*, 1980; Workman, 1999; Tegner, 2001; Osovitz y Hofmann, 2005).

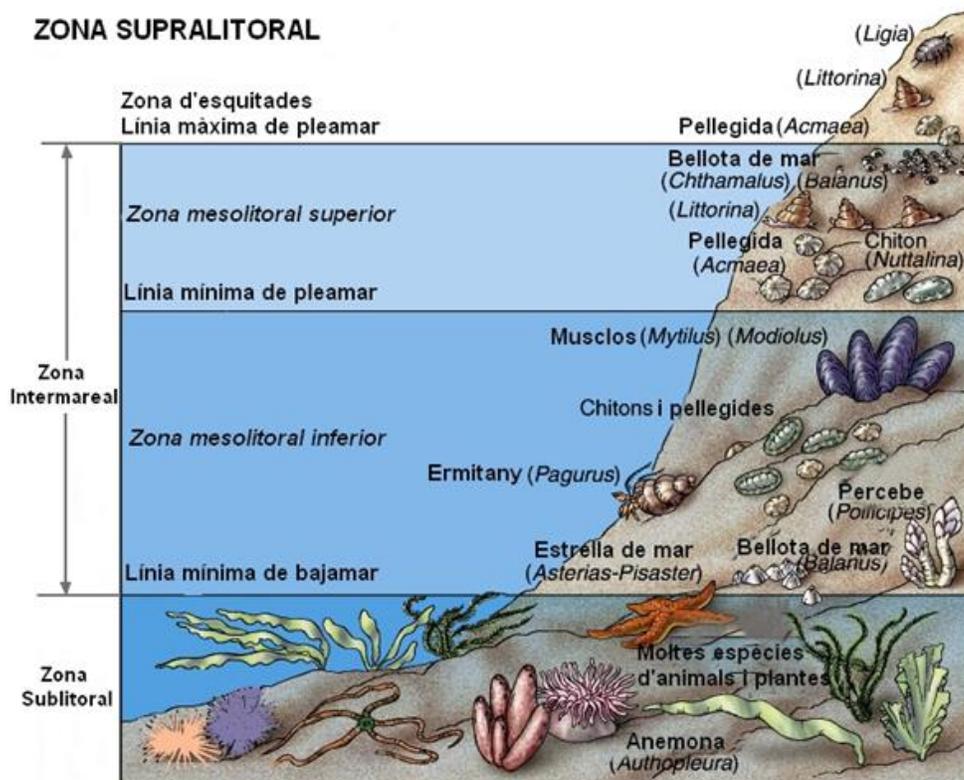


Figura 2. Zonas del litoral (recuperado de <https://allyouneedisbiology.wordpress.com/tag/zona-supralitoral/>).

El crecimiento y reproducción de los erizos depende principalmente de los parámetros del medio, como temperatura, profundidad, flujo de agua, fotoperiodo, florecimientos algales y alimento (Garrido Sanahuja, 2003; Basch y Tegner, 2007), al igual que la sobrepesca de sus competidores y depredadores, que en los últimos años han sido las causas que han propiciado su expansión y sobrepoblación en el medio natural (Tegner y Dayton, 2000; Nichols *et al.*, 2015; Wallner-Hahn *et al.*, 2015; Medellín-Ortiz *et al.*, 2022). El controlar y replicar algunos de los parámetros antes mencionados en un sistema de cultivo, facilitaría parte de su reproducción y crecimiento en cautiverio, con lo cual se les podría dar un valor en el mercado. Los estudios relacionados con los diseños y metodologías para un cultivo acuícola de erizo de mar, concluyen que el producirlo de una manera rentable es la principal limitante (Lawrence, 2007). Por lo anterior, mejorar la tecnología para su cultivo y eficientizar las dietas, es una opción para atender parte de la problemática.

1.2 Antecedentes

Los erizos al alimentarse principalmente de algas han ejercido una presión sobre su población natural. De ahí la importancia de utilizar dietas balanceadas para su acuicultura. Además, se ha comprobado que al utilizar estas dietas se aumenta el crecimiento de los organismos (40 a 65 mm), la producción y calidad de sus gónadas comparativamente al alimentarlos con macroalgas (Vidal Santana, n.d; Pearce *et al.*, 2002; Senaratna *et al.*, 2005). Sin embargo, es necesario profundizar en los requerimientos nutricionales y los efectos de ciertos componentes específicos de la dieta sobre las gónadas de los erizos de mar, debido a que los alimentos naturales que consumen estos organismos presentan variaciones en la composición nutricional, por lo que se requiere conocer la inclusión adecuada de nutrientes para el crecimiento somático y gonadal (Senaratna *et al.*, 2005; Cuesta-Gómez y Sánchez-Saavedra, 2014; Picay-Espinoza, 2023).

La composición bioquímica de las macroalgas varía conforme la temporada del año, en el caso de *M. pyrifera* mantiene de 46 % hasta 50% de carbohidratos y de 7 a 10 % de proteína cruda, en cambio en invierno aumentan los porcentajes de proteína, debido a que la temperatura altera su composición. Además, presentan un alto contenido de agua (hasta el 90 %), por lo anterior, los erizos requieren consumir mayor cantidad de alimento (Rodríguez-Montesinos y Hernández-Carmona, 1991; Castro-González *et al.*, 1994).

La Universidad de Maine, ha estudiado los alimentos formulados como una alternativa para la acuicultura del erizo de mar, siempre y cuando las dietas cumplan con los requerimientos nutricionales. En *Strongylocentrotus droebachiensis* (erizo de mar verde), se comparó la alimentación con macroalgas y dietas formuladas; los resultados demostraron que los organismos que recibieron la dieta de macroalgas mostraron índices gonadosomáticos menores (8.23%) comparado con los tratamientos de dietas formuladas (Eddy *et al.*, 2012). Las dietas con 16 a 20 % de contenido proteico y carbohidratos mayor a 40%, han mostrado buenos resultados en el crecimiento de los organismos, como el estudio realizado por Cuesta-Gómez en el 2017, donde se evaluó el nivel de macronutrientes en las dietas formuladas para el erizo morado, y su influencia en la calidad e índice gonadal. El autor determinó que la composición ideal para el crecimiento gonadal fue de 23% de proteína, 50% de carbohidratos, mientras que un 8% de lípidos podría ser ideal para la calidad gonadal en cuanto a la “cremosidad” de las gónadas.

En los estudios con erizo morado, se menciona que, con la dieta a base de macroalgas frescas se puede incrementar el tamaño de sus gónadas en un lapso de nueve semanas hasta 120 días (García-Mendoza,

2015; Cuesta-Gómez, 2017). Actualmente, el reto es desarrollar una dieta peletizada que se conserve por un mayor tiempo almacenada y sea estable en el agua de mar, para que la calidad del agua en el sistema se mantenga en intervalos que beneficien el desempeño de los animales (Senaratna *et al.*, 2005). Por otra parte, otros autores consideran importante mantener a los erizos en bajas densidades (4 erizos por m²), debido a que en esta condición se presenta un volumen gonadal mayor, comparado con los erizos que se encuentran en mayores densidades de hasta 40 erizos por m² (Andrew, 1986; Epherra, 2010).

Las investigaciones relacionadas con alimentos formulados para diferentes especies de erizos de mar como: *Evechinus chloroticus* (Barker *et al.*, 1998), *Helioidaris erythrogramma* (Senaratna *et al.*, 2005) *Loxechinus albus* (Lawrence *et al.*, 1997; Olave *et al.*, 2001), *Psammechinus miliaris* (Cook *et al.*, 1998; Kelly *et al.*, 1998;), *S. droebachiensis* (Jong-Westman *et al.* 1995a, 1995b; Pearce *et al.*, 2002) y *S. franciscanus* (McBride *et al.*, 1998, 1999), se enfocan en conocer los requerimientos de los macro y micronutrientes en la dieta, lo que favorece un mejor aprovechamiento por parte de los erizos. De esta manera se podría formular una dieta que pueda proporcionar los mejores resultados en el cultivo de los erizos de mar. En *P. miliaris* se evaluaron los requerimientos de ácidos grasos en la dieta, y se reportó un mayor crecimiento gonadal en erizos alimentados con dietas comerciales para salmón (Cook *et al.*, 1998), estos resultados fueron similares a lo reportado para el erizo *Paracentrotus lividus* cuando se alimentaron con dietas ricas en cereales (Lourenço *et al.*, 2021). En *S. purpuratus*, se han realizado diversos estudios sobre sus requerimientos nutricionales (García-Chávez, 2012, García-Mendoza, 2015, Cuesta-Gómez, 2017), los cuales constituyen avances fundamentales para perfeccionar el desarrollo de una dieta que pueda implementarse en el cultivo de la especie en la región.

1.2.1 Efecto de la alimentación en el crecimiento gonadal del erizo de mar

Existe un interés en determinar las dietas óptimas para los erizos de mar, ya que el crecimiento y calidad de sus gónadas varían conforme a la frecuencia, digestibilidad, absorción y composición del alimento que encuentren en el medio natural (Jangoux y Lawrence, 1982). Por lo anterior, es importante desarrollar la dieta ideal para lograr las características deseadas relacionadas con firmeza, color, textura y sabor (Tabla 1). Las gónadas del erizo de mar tienden a mostrar una buena coloración cuando se alimentan con algas frescas, y no se encuentre limitada su alimentación (University of Maine, n.d; McBride, 2005; Senaratna *et al.*, 2005), por lo que se busca obtener resultados similares en el uso de dietas formuladas para la engorda de erizo morado.

Tabla 1. Criterios para evaluar la calidad gonadal del erizo de mar propuestos por Pearce *et al.* (2002). Los valores menores de la escala corresponden a lo más deseado y determinan su mayor calidad en el mercado.

Criterio	Grado	Escala	Descripción
Firmeza	1-4	1	Muy firme
		2	Firme
		3	Suave
		4	Muy suave
Textura	1-4	1	Dos mitades (segmentos) diferenciados, muy suaves
		2	Dos mitades (segmentos) diferenciados, suaves (distinción y suavidad)
		3	Distinción de dos mitades (segmentos) posibles, granulares
		4	Sin distinción de dos mitades (segmentos), granulares
Coloración	1-4	1	Amarillo o anaranjado brillante (Grado A)
		2	Amarillo o anaranjado pálido (Grado A o B)
		3	Amarillo café, anaranjado café, rojo café o crema (Grado B o C)
		4	Amarillo café, anaranjado-café, rojo café o crema (Grado B o C)
Sabor	1-6	1	Excelente (muy dulce)
		2	Muy buena (muy dulce < 1)
		3	Buena (dulce)
		4	Satisfactorio (Ni dulce ni amarga-agria)
		5	Pobre (amarga-agria)
		6	Muy pobre (muy amarga-agria, din valor comercial)

En el erizo, el proceso de acumulación de nutrientes se lleva en las gónadas, esto se debe a que es un órgano de reserva de glucógeno, proteínas y lípidos, lo que depende de la cantidad y calidad de su alimentación (Lawrence y Lawrence, 2003). Los lípidos constituyen la principal reserva de nutrientes en los equinodermos, ya que representan una importante fuente de energía y están estrechamente relacionados con su condición reproductiva (Epherra, 2010; Cuesta-Gómez, 2017). Los ácidos grasos esenciales como el omega-3 y omega-6, son compuestos fundamentales en la mayoría de las dietas formuladas utilizadas para la maduración de gónadas de reproductores marinos en cultivos. Estos ácidos grasos suelen aumentar el grado de insaturación, mantener la fluidez y permeabilidad en las membranas de las células, siendo indispensable para organismos que habitan en aguas frías (Rodríguez y Pérez, 2022).

En la dieta de los erizos de mar, los lípidos son esenciales para el crecimiento y la ontogénesis, siendo

moléculas hidrofóbicas que participan en funciones fisiológicas, como reservas energéticas, formación celular, sistema nervioso, precursores hormonales, vitaminas, pigmentos y biosíntesis de ácidos grasos (Sewell, 2005; García-Chávez, 2012; Kabeya *et al.*, 2017). Los estudios revelan que las gónadas de los erizos contienen lípidos de importancia para la salud humana, presentándose en gran proporción los fosfolípidos y ácidos grasos poliinsaturados, como el ácido eicosapentaenoico (EPA). El EPA y el ácido docosahexanoico (DHA), son ácidos grasos poliinsaturados esenciales para el desarrollo y reproducción en animales marinos (Pearce *et al.*, 2002; García-Chávez, 2012; Zhou *et al.*, 2018; Rodríguez y Pérez, 2022). García-Chávez (2012), registró el efecto de la temperatura en la síntesis y acumulación de ácidos grasos en juveniles de erizo morado (*S. purpuratus*) y negro (*Arbacia stellata*), en los cuales se observó un incremento de peso y sobrevivencia del 100% a 16°C, así como aumentos importantes en ácidos grasos C18:1n9 (ácido oleico), C18:2n6 (ácido linoleico) y C18:3n3 (ácido alfa-linolénico).

Diferentes autores sugieren que los erizos poseen enzimas con la capacidad de convertir los ácidos grasos poliinsaturados C18 en los poliinsaturados de cadena larga (LC-PUFA). Es decir, que pueden realizar la biosíntesis de ácidos grasos *de novo* mediante procesos de elongación y desaturación (Bell *et al.*, 2001; García-Chávez, 2012; Cuesta Gómez, 2017; Kabeya *et al.*, 2017; Wang *et al.*, 2019). Estas características se han reportado en varios invertebrados marinos (Jangoux y Lawrence, 1982; Monroig *et al.*, 2013).

Actualmente, las poblaciones de erizo morado *S. purpuratus* presenta un crecimiento acelerado, por este motivo se ha planteado como alternativa realizar un cultivo de engorda, con el objetivo de generar el crecimiento gonadal, el incremento en tamaño y su producción comercial con un control de calidad, de costos y la rentabilidad en sistemas controlados (Lawrence y Lawrence, 2003; Lawrence, 2007), y al mismo tiempo, disminuir la problemática ecológica. Los alimentos formulados actualmente han sido adecuados para el máximo crecimiento y calidad deseable de las gónadas, sin embargo, es necesario generar las dietas con los requerimientos de macronutrientes y micronutrientes especie-específicos para cada etapa de vida de esta especie (Pearce y Giese, 1966; Lawrence *et al.*, 2001; Cuesta-Gómez, 2017). Por lo anterior, es importante desarrollar la formulación de dietas específicas para el erizo morado, que incrementen el crecimiento gonadal en menor tiempo para poder desarrollar cultivos de engorda de esta especie en la región (Lawrence y Lawrence, 2003; Watts *et al.*, 2013; Cuesta-Gómez, 2017).

1.3 Justificación

Actualmente, las poblaciones de erizo morado (*Strongylocentrotus purpuratus*) han aumentado, lo que ha

provocado la disminución de los bosques de macroalgas y de las especies que dependen de ellos en las costas del Pacífico Norte. Ante esta situación, resulta fundamental buscar fuentes de alimento no solo provenientes del medio natural, sino también mediante dietas formuladas, con el fin de impulsar el cultivo del erizo morado, una especie con gran potencial. De acuerdo con lo señalado anteriormente, el perfeccionamiento de dietas formuladas con concentraciones óptimas de ácidos grasos omega-3 EPA y DHA podría contribuir significativamente al avance en la nutrición de esta especie, al mejorar su crecimiento y la calidad gonadal. A su vez, esto podría ayudar a mitigar la problemática ambiental asociada con la degradación de los bosques marinos y fortalecer la pesquería del erizo morado.

1.4 Hipótesis

El erizo morado *S. purpuratus* alimentado con dietas formuladas con porcentajes mayores del 1% de ácidos grasos omega-3 EPA y DHA, presentará una composición proximal y calidad gonadal diferente con respecto a los organismos alimentados con dietas no enriquecidas.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

Evaluar el efecto de las dietas formuladas y enriquecidas con omega-3 en la supervivencia, crecimiento y producción gonadal del erizo morado (*Strongylocentrotus purpuratus*).

1.5.2 Objetivos específicos

- Evaluar el efecto de las dietas formuladas sin enriquecer A (0-) y B (0+) y enriquecidas con omega-3, C (0.5%), D (1%), E (2%) y F (4%) en la supervivencia, crecimiento, índice gonadal y calidad de la gónada (firmeza, textura y coloración) del erizo morado.

- Evaluar la composición proximal (proteínas, lípidos, cenizas, ELN y ácidos grasos) de gónadas del erizo morado alimentados con las dietas formuladas sin enriquecer A (0-) y B (0+) y enriquecidas con omega-3, C (0.5%), D (1%), E (2%) y F (4%).
- Comparar el contenido de ácidos grasos de los erizos provenientes del medio natural y de los alimentados con las diferentes dietas para establecer cual proporciona la mejor calidad gonadal.

Capítulo 2. Metodología

2.1 Colecta y biometría inicial del erizo morado *Strongylocentrotus purpuratus* en el medio natural

Se realizaron tres salidas de campo entre los meses de noviembre a diciembre de 2023 para recolectar aproximadamente 600 organismos adultos de *S. purpuratus* del medio natural. El buceo se realizó a una profundidad promedio de 20 m, en Campo Kennedy, sitio que se localiza al suroeste de la ciudad de Ensenada, Baja California, México (31°42'09.0"N, 116°41'03.1"W) (Fig. 3). La extracción de los erizos morados se realizó con equipo de Buceo Autónomo (SCUBA), a una profundidad promedio de 20 m y con ayuda de rastrillos de mano y mallas de pesca. Una vez colectados los organismos, estos fueron transportados en húmedo dentro de hieleras con esponjas con agua de mar y dentro de redes cubiertas con macroalgas, hasta las instalaciones de la unidad de cuarentena del Instituto de Investigaciones Oceanológicas (IIO) de la Universidad Autónoma de Baja California (UABC). Una vez en el laboratorio, los organismos fueron colocados aleatoriamente en 18 tanques de cultivo conectados a un sistema de recirculación con agua de mar filtrada (se describirá en la sección 2.2) y a una temperatura de 16.0 ± 2.0 °C (controlada con ayuda del aire acondicionado del laboratorio) hasta su reacondicionamiento, el cual fue por un periodo de dos semanas.

Al segundo día de su extracción, se realizó una biometría para conocer las tallas y condiciones de los erizos obtenidos del medio natural. Para ello, se registró el diámetro de testa, el peso total y en los organismos que fueron sacrificados (muestra de 23 erizos), se evaluó su estado de maduración y el peso de la gónada, esto se realizó con la ayuda de un vernier marca Jectse y una balanza analítica marca *Sartorius* modelo M-prove. Los erizos registraron una talla promedio de 4.0 ± 2.5 cm de diámetro de testa, los cuales fueron separados por tallas y permanecieron en un periodo de inanición de 15 a 18 días antes de iniciar la fase experimental con base en lo establecido por Cuesta-Gómez (2017). Esta fase de inanición se llevó a cabo con la finalidad de que los organismos eliminaran todos los detritos de su intestino y reabsorbieran las gónadas, de esta manera todos los organismos comenzaron en las mismas condiciones. Diariamente y a lo largo de la fase de aclimatación, los organismos que se veían enfermos o murieron fueron removidos inmediatamente del sistema. Los dos últimos días de la aclimatación, los organismos fueron alimentados “*ad Libitum*” con macroalgas.



Figura 3. Imagen satelital de la ubicación del área de muestreo en Campo Kennedy (círculo rojo) en Ensenada, B.C., México, de donde se extrajeron los juveniles de erizo morado (*S. purpuratus*). Imagen tomada de Google Maps 2024 (<https://www.google.com/maps>) y modificada.

2.2 Sistema experimental

Los organismos se mantuvieron en un sistema de recirculación ubicado en la unidad de cuarentena del Instituto de Investigaciones Oceanológicas (IIO-UABC). El sistema fue reacondicionado para contener 18 jivas plásticas rectangulares de 60 cm x 30 cm x 25 cm de largo, ancho y altura, respectivamente, y con una capacidad total de 45 litros, con un volumen útil de agua de 36 L y una altura de 20 cm; cada unidad experimental presentaba una superficie de fondo de 0.54 m² (Fig. 4).

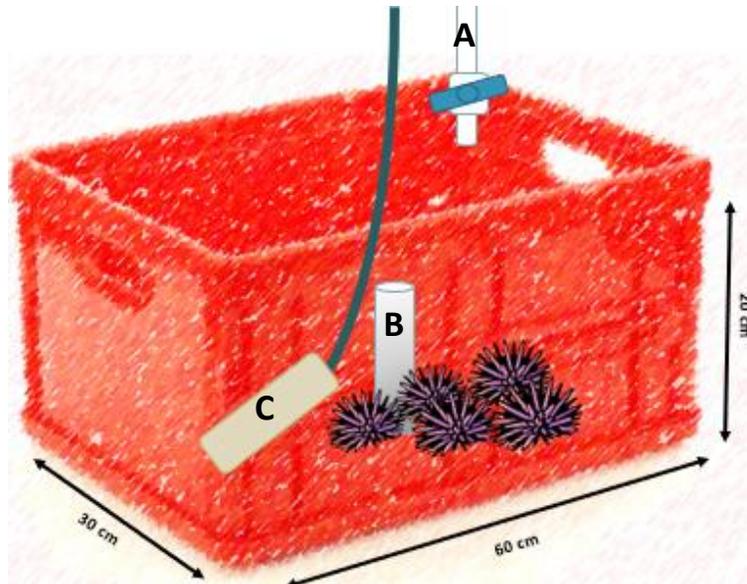


Figura 4. Imagen de la configuración de las unidades experimentales donde se realizó el cultivo del erizo morado (*S. purpuratus*). A) entrada de agua de mar; B) tubo de nivel con filtro para remoción de sólidos; C) piedra de aireación.

El sistema de recirculación consistía en: 1) tanque de compensación (Sump), cuadrado de plástico e insulated de 1m³ de capacidad; 2) bomba de agua marca Sweetwater modelo SHE3.0; 3) biofiltro de lavado de burbuja de 2ft³ de “Beads” (cuentas plásticas) marca Aquaculture Systems Technologies; 4) Filtro ultravioleta marca Smart Modelo EU40 de 40 watts; 5) Bomba de calor de 1.5 Hp de potencia marca Aqualogic modelo DSHP-10 y 6) Protein Skimmer genérico de 40 gal·min⁻¹. Todos estos componentes estaban conectados por medio de una tubería de línea principal de PVC cédula 40 de 2” para la distribución y suministro del agua de mar en cada una de las unidades experimentales. La línea de agua se reducía y se controlaba con una tubería y válvula bola de PVC cédula 40 de 0.5” de diámetro. Cada unidad experimental estaba provista de una línea de desagüe de PVC cédula 40 de 3” que retornaba al tanque de compensación, de esta manera el agua se desplazaba cerrando el ciclo de recirculación en el sistema (Fig. 5 y 6).

Para activar el filtro biológico del sistema de recirculación, 45 días antes de recibir a los organismos se le agregó cloruro de amonio (grado fertilizante agrícola) en una concentración de 10 mg•L⁻¹. Cada tercer día se cuantificaron los parámetros fisicoquímicos del agua de mar del sistema (nitrógeno amoniacal total [NAT], nitritos [NO₂⁻], nitratos [NO₃⁻], alcalinidad (KH), temperatura [°C], potencial del ion hidrógeno [pH] y oxígeno disuelto [OD]), esto con la finalidad de evaluar la estabilización del biofiltro. Cada vez que la concentración de amonio disminuyó, se agregó una cantidad de cloruro de amonio suficiente para volver a mantener la concentración inicial en 10 mg•L⁻¹. Los cambios en la alcalinidad fueron ajustados agregando

bicarbonato de sodio al sistema, con la finalidad de mantener una concentración entre los 120 y 140 mg•L⁻¹.

1.

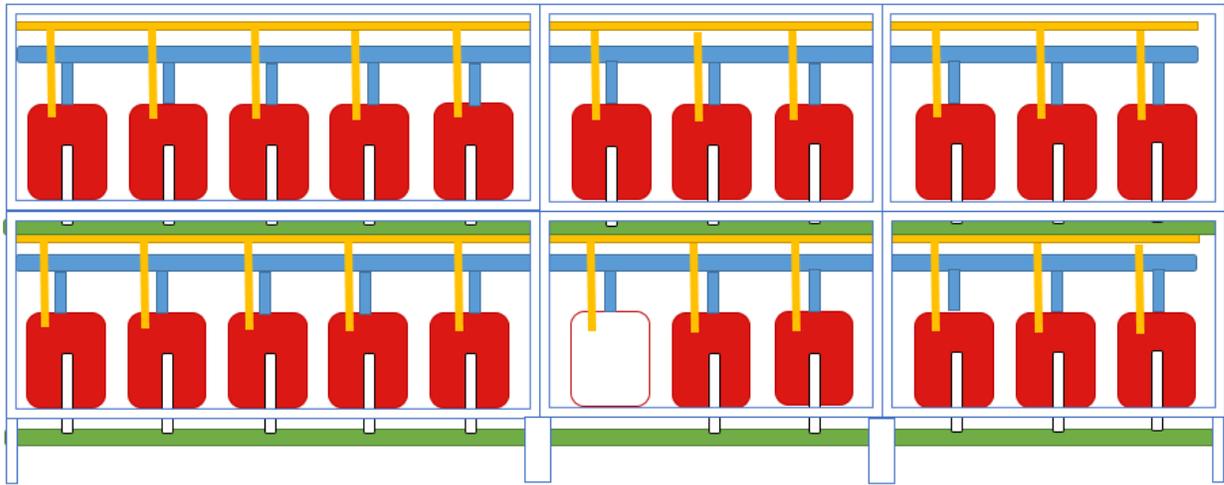


Figura 5. Esquema del sistema experimental donde se mantuvieron los erizos durante el cultivo. Línea amarilla: Entrada de aire a cada unidad experimental. Línea azul: Entrada de agua de mar limpia y esterilizada por luz UV del reservorio del sistema de recirculación, pasada previamente por un biofiltro. Línea verde: Línea de salida de agua para transporte de sólidos al biofiltro externo del sistema. Cuadro rojo: Unidades experimentales.



Figura 6. Unidades experimentales en el laboratorio de la unidad de cuarentena del IIO - UABC, con abastecimiento de agua de mar de un sistema de recirculación.

2.3 Formulación y elaboración de dietas

La formulación de las dietas experimentales (0.5, 1, 2 y 4 %) y controles (0- y 0+) se realizó conforme a la dieta que presentó el mejor rendimiento para el erizo morado en el estudio de Cuesta-Gómez (2017), la cual contenía un 23% de proteína, 50% de carbohidratos y el 8% de lípidos. Los niveles de inclusión de carbohidratos, proteínas y lípidos reportados son similares a lo mencionado por otros autores en diferentes especies de erizo (Lawrence *et al.*, 1997; Olave *et al.*, 2001; Pearce *et al.*, 2002), al tener los mejores resultados en crecimiento gonadal cuando la dieta contenía una mayor concentración de carbohidratos.

Los seis tratamientos de las dietas experimentales fueron denominados de la siguiente forma: Dieta Control Negativo A(0-): dieta formulada con harina de pescado desgrasada y sin adición de ácidos grasos omega-3; Dieta Control Positivo B(0+): dieta formulada con harina de pescado sin desgrasar y sin adición de ácidos grasos omega-3; Dieta C(0.5%): dieta formulada con harina de pescado sin desgrasar y adición de 0.5% de ácidos grasos omega-3; Dieta D(1%): dieta formulada con harina de pescado sin desgrasar y adición del 1% de ácidos grasos omega-3; Dieta E(2%): dieta formulada con harina de pescado sin desgrasar y adición del 2% de ácidos grasos omega-3 y Dieta F(4%): dieta formulada con harina de pescado sin desgrasar y adición del 4% de ácidos grasos omega-3 (Tabla 2). Todas las dietas fueron isolipídicas (con 8% de lípidos) y una concentración de proteína menor al 30% (Tabla 3), esto para llevar un control de los macronutrientes suministrados.

Para tener un control de la composición lipídica y de ácidos grasos suministrados en la formulación, las harinas de cerdo y harina de pescado fueron desgrasadas con hexano industrial al 95 % (4 lavados) y alcohol etílico industrial al 98 % (3 lavados). En el primer lavado (hexano o etanol) se utilizó una proporción de 2:1 de reactivo:harina, y del segundo al cuarto lavado la relación fue 1:1 de reactivo:harina según lo recomendado por Belmonte (2025). El lavado con hexano eliminó la mayor concentración de lípidos totales, mientras que los lavados con etanol removieron la mayor cantidad de ácidos grasos esenciales. Entre cada uno de los lavados se dejaron reposar las harinas por 24 h en refrigeración a 4 °C, y posteriormente los solventes fueron retirados, en cada uno de los lavados, con ayuda de un tamiz con luz de malla de 42 µm. Al finalizar todos los lavados, las harinas se secaron en una campana de extracción por un periodo de 24 h. La harina de pescado desgrasada se utilizó para la formulación del primer tratamiento A (0-) (control negativo), que consistió en mantener las concentraciones similares a 0% de ácidos grasos omega-3, mientras que la harina de cerdo desgrasada se utilizó para formular los demás tratamientos, B (0+) (control positivo), esto para controlar el nivel de inclusión de lípidos en la dieta.

A las cuatro dietas experimentales se les modificó la concentración de inclusión de ácidos grasos omega-3, quedando C (0.5%), D (1%), E (2%) y F (4%). Para esto se utilizó el omega-3 MEG-3 de la marca DSM, compuesto en su mayoría por ácido eicosapentaenoico (EPA, C20:5n3) y ácido docosahexaenoico (DHA, C22:6n3). Los valores de omega 6 se mantuvieron en concentraciones similares en todos los tratamientos experimentales conforme a lo encontrado en la harina de pescado.

La preparación de las diferentes dietas se realizó de manera artesanal, con ayuda de una batidora de alimentos marca KitchenAid™ para mezclar los ingredientes, primero se colocaron y mezclaron los ingredientes secos por un periodo de 5 minutos y después se añadieron los ingredientes líquidos y aceites a la mezcla, dejando otros 5 minutos para su mezcla. Por último, se añadió la gelatina previamente disuelta en agua caliente (>70 °C), y el almidón de maíz previamente disuelto en agua tibia. Todos los ingredientes se mezclaron por más de 3 minutos hasta tener una consistencia homogénea sin ser pegajosa. Posteriormente, en el procesador de alimentos (KitchenAid™ Aditamento Molino) y por medio de una matriz se peletizaron los alimentos de 5 mm de grosor, de forma cilíndrica y alargada. El alimento se distribuyó de forma manual en charolas metálicas y se colocó en una estufa marca Lindberg Blue M® a 60 °C por un periodo de 24 horas para su secado. Al término del periodo de secado las dietas fueron almacenadas por separado en bolsas Ziploc® previamente etiquetadas y almacenadas a -20.0 °C hasta su posterior análisis y uso en el bioensayo de alimentación. La ración de alimento de cada tratamiento se pesaba por semana y era almacenado en oscuridad a temperatura ambiente en botes de plástico de 100 mL en el laboratorio seco, ubicado cerca de la unidad de cuarentena.

Previamente al inicio del bioensayo de maduración, 100 g de las dietas experimentales fueron analizados para determinar su perfil de ácidos grasos con la técnica de transmetilación descrita por Parrish *et al.* (2015). Una vez analizado el contenido de ácidos grasos en las pre-dietas y de que estas cumplían con un incremento de ácidos grasos, se continuó con la preparación de las dietas de los diferentes tratamientos que se utilizaron en el bioensayo de maduración del erizo morado.

2.4 Evaluación de la composición proximal de las dietas y gónadas de erizo

Los análisis de las muestras de las dietas y gónadas de erizo para conocer la composición proximal y de ácidos grasos se realizaron conforme a los siguientes protocolos: micro-Kjeldahl (1883) para determinar proteínas, la metodología descrita por Folch *et al.* (1957) para conocer la cantidad de lípidos totales, las cenizas con el procedimiento de incineración con la mufla a 450 °C por 6 horas. El extracto libre de

nitrógeno (ELN) siendo conformado principalmente por carbohidratos digeribles y vitaminas, se calculó conforme Joblin (2001) con la diferencia de los análisis antes mencionados, el cual se obtiene con la siguiente fórmula:

$$\% \text{ELN} = 100 - (\% \text{proteína} + \% \text{lípidos} + \% \text{cenizas}) \quad (1)$$

2.4.1 Proteínas

El análisis de las proteínas se realizó con la metodología reportada por micro-Kjeldahl (1883) para determinar el porcentaje de nitrógeno total en forma de amonio (NH_4^+), mediante tres procesos de la muestra: digestión, destilación y titulación. La digestión se produce con un digestor en matraces micro-kjeldahl con sulfato de potasio, sulfato cúprico pentahidratado y ácido sulfúrico al 93-95 %. La destilación se realizó con ácido bórico al 3% e hidróxido de sodio al 40% en un destilador TECNAL TE-0364. En la titulación se utilizó una solución Shiro-Toshiro como indicador, y una solución de ácido clorhídrico al 0.02 N para calcular la concentración proteica por titulación (cambio de color de la muestra). En el análisis, se utilizó lisina y grenetina como proteína estándar (80-85 %). El porcentaje de proteínas de las muestras se obtuvo mediante un cálculo del volumen de mililitros de ácido utilizados en la titulación y el factor establecido de 6.25 de acuerdo con la AOAC (1995) para las dietas experimentales.

2.4.2 Lípidos

La metodología descrita por Folch *et al.* (1957) se utilizó para determinar los lípidos, y como estándar se empleó tripalmitina Sigma®, con aprox. 90 % de lípidos. La concentración de lípidos se conoció al mezclar las muestras con la solución extractora diclorometano:metanol (2:1), y después de 5 horas se pasó la solución por filtros Whatman #4 y se agregó cloruro de potasio al 1.75 %, dejando reposar por 4 horas. Posteriormente, se extrajeron 2 mL de la fase inferior, y se evaporó a 60 °C en viales previamente pesados en un Termoblock StableTemp. Para conocer el porcentaje de lípidos totales de la muestra, se utilizó la siguiente fórmula:

$$\% \text{Lípidos totales} = \left(\frac{\text{Peso final} - \text{Peso inicial}}{\text{Peso muestra}} \times 100 \right) \times 2 \quad (2)$$

2.4.2.1 Identificación de lípidos en ingredientes de la dieta

Los análisis de la harina de pescado se realizaron previamente al elaborar la dieta, con el propósito de conocer la proporción de lípidos totales que se suministrarían a los erizos. Los ingredientes analizados fueron los ácidos grasos de la marca DSM (MEG -3), que fueron utilizados en las dietas formuladas del experimento. En el caso del MEG-3, se analizó la concentración de los lípidos totales, donde resultaron los ácidos grasos omega 3 con una proporción de 47.96 % de lípidos, y los ácidos grasos omega-6 con una proporción de 37.26 % de lípidos.

En la harina de sardina se encontró que un 11.22 % fueron lípidos, mientras que la misma harina desgrasada hasta el tercer lavado con etanol bajó el porcentaje lipídico hasta un 2.52 %. En el caso del análisis de las muestras de proteína, se encontró un 70 % en forma de nitrógeno total en la harina de sardina, y en la harina de pescado desgrasada (sardina) el contenido incrementó hasta un 75 % de proteína total.

2.4.3 Peso seco y cenizas

Para realizar los análisis de peso seco de las muestras de dietas y gónadas de erizo, previamente las charolas de aluminio se lavaron, etiquetaron, pesaron e incineraron. Muestras iniciales de alrededor de 1.0 ± 0.1 gramos fueron colocadas en charolas de aluminio previamente pesadas y etiquetadas por triplicado y por tratamiento dentro de una estufa de convección a 80 °C por un periodo de 24 horas. Las charolas se pesaron a las 24, 48 y 72 horas, hasta determinar el peso seco constante (promediando los pesos de la muestra), y posteriormente se metieron a incinerar en el horno de la mufla Fisher Scientific a 450 °C por 6 horas, y después la temperatura disminuyó hasta los 60 °C por un periodo constante hasta terminar las 24 horas. Para determinar el porcentaje de ceniza, se utilizó la siguiente fórmula:

$$\% \text{ Cenizas} = \left(\frac{\text{Peso residuo cenizas}}{\text{Peso muestra inicial}} \right) \times 100 \quad (3)$$

2.4.4 Transmetilación de muestras para la extracción de ácidos grasos

El análisis de ácidos grasos se realizó conforme al método de Parrish *et al.* (2015), primero utilizando 3 ml

de la solución extractora de metanol: diclorometano: ácido clorhídrico en una relación 10:1:1, y se le agregaron 50 µl de BHT (para la protección de los lípidos al calor), debido a que las muestras permanecieron en la estufa marca Lindberg Blue a 83 °C por un periodo de 2 h, y posteriormente fueron enfriadas a temperatura ambiente. A continuación, se le agregó 1.5 ml de agua MILLI-Q, 1.5 ml de hexano y 0.3 ml de diclorometano; la mezcla fue homogenizada con ayuda de un Vortex y fueron centrifugadas para separar la fase orgánica que se encuentra suspendida en el solvente. Después de extraer los ácidos grasos (AG) y colocarlos en un vial de 1.5 ml, las muestras se analizaron en un cromatógrafo de gases Agilent® (GC 7820 System), equipado con un inyector Split/Splitless en donde se utilizó 1 µL de volumen de inyección, un detector de ionización de flama (FID) y una columna capilar Agilent® 122-2361 DB-23 60 m x 0.25 mm con un diámetro interno de 15 µm. La temperatura inicial de inyección fue de 50 °C por 1 min, después se llevó a 190 °C a una tasa de 25 °C/min y se mantuvo por 10 min, posteriormente se aumentó a 230 °C a una tasa de 6 °C/min y se utilizó nitrógeno como gas acarreador a 0.9 ml/min. Los ácidos grasos fueron identificados y cuantificados por el software *GC Chemstation Data Analysis* de Agilent. Este procedimiento consistió en comparar los tiempos de retención relativos (TRR) de los ácidos grasos identificados con el estándar “37 Component FAME mix”; y en hojas de cálculo de Excel se calculó la concentración final de ácidos grasos metilados totales, saturados, monoinsaturados y poliinsaturados omega 3 y 6.

2.5 Condiciones de cultivo

Al término del periodo de aclimatación descrito en el apartado 2.1, se colocaron 16 erizos distribuidos de manera aleatoria por cada unidad experimental (UE) para los seis tratamientos experimentales, cada uno con tres repeticiones; con un total de 18 UE's (Figura 5). Las dietas formuladas fueron proporcionadas alrededor de 0.5 g por organismo durante los 115 días del cultivo. La limpieza del sistema se realizó cada 12 horas, se utilizó un sifón para retirar la materia orgánica conformada por heces y alimento no consumido. El tanque de compensación se limpiaba dos veces a la semana y el retrolavado del biofiltro se realizó una vez cada semana, con el objetivo de mantener las concentraciones de nitrógeno amoniacal total (NAT) menor a 1 mg•L⁻¹. Durante el experimento, en cada unidad experimental se mantuvo un flujo o tasa de recambio de 2 a 3 L•min⁻¹. Diariamente se llevó un registro de la supervivencia y los erizos muertos fueron retirados. Las biometrías de los erizos durante el cultivo se realizaron al inicio, a los 30, 60, 90 y 115 días de experimentación.

En cada una de las biometrías se registró el peso húmedo total y talla (diámetro de testa, DT) de todos los organismos por unidad experimental y tratamientos, para tal efecto se cuidó mantener a los erizos el menor tiempo posible fuera del agua, cubriéndose de la luz para evitar estrés y posterior mortalidad; el procedimiento se detalla en el apartado 2.6.2. En la última biometría (115 días) aparte de registrar el peso húmedo y el diámetro de testa (DT), también se extrajeron las gónadas para el registro del índice gonadal (IG), el peso seco y de cenizas de las gónadas, así como realizar en algunas muestras de gónadas de cada tratamiento, el análisis de proteínas, lípidos y ácidos grasos. Para tal efecto, cada erizo fue disectado verticalmente con pinzas, extrayendo las cinco gónadas, las cuales se limpiaron con agua de mar a una temperatura menor a 14 °C. Una vez que se extrajeron y limpiaron las gónadas, se colocaron en navecillas de aluminio previamente pesadas y se registró su peso total en una balanza Sartorius modelo M-prove. Las gónadas de tres erizos fueron destinadas para conocer el peso seco y peso de cenizas, y para tal efecto las gónadas se colocaron en navecillas de aluminio previamente etiquetadas, pesadas y puestas en una estufa de convección a 80 °C por un periodo de 24 h, y posteriormente pasaron las muestras a una mufla Fisher Scientific a 450 °C por 6 horas, como se describe en el apartado 2.4.3. Las gónadas de otros tres erizos se destinaron para determinar los análisis bioquímicos y de ácidos grasos. El resto de las gónadas de los erizos se utilizaron para documentar por medio de fotografías los parámetros de la calidad gonadal.

Tabla 4. Valores promedio y desviación estándar de los parámetros fisicoquímicos de la calidad de agua de mar en el sistema de recirculación (SRA) donde los juveniles de erizo morado (*S. purpuratus*) fueron cultivados durante 115 días.

Parámetro	Promedio ± DE
NAT (mg•L ⁻¹)	0.23 ± 0.07
Nitritos (mg•L ⁻¹)	0.0 ± 0.0
Nitratos (mg•L ⁻¹)	4.51 ± 2.32
Temperatura (°C)	16.51 ± 0.61
OD (mg•L ⁻¹)	8.06 ± 0.18
KH ppm	120.98 ± 12.28
Salinidad (ups)	35.15 ± 0.28

En el laboratorio donde se encontraba el sistema de cultivo, se controló el fotoperiodo con un régimen de 12 h luz y 12 h oscuridad. Durante el periodo de cultivo se registraron 2 veces por semana los parámetros fisicoquímicos del agua como la temperatura, oxígeno disuelto y salinidad con un equipo multiparámetro marca YSI modelo Pro20i y un refractómetro. También se midió la concentración del nitrógeno amoniacal total (NAT), nitritos (NO₂⁻¹), nitratos (NO₃⁻¹) y KH con un kit comercial para agua de mar marca API®, con

la finalidad de mantener las concentraciones de: NAT por debajo de $1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, los nitritos y nitratos en 0.0 y $10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, y la alcalinidad entre 120 y $140 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. En la tabla 4 se muestran los valores promedio y la desviación estándar de los parámetros de calidad del agua de mar durante el periodo de experimentación en el sistema de recirculación acuícola. La mayoría de los parámetros de calidad de agua de mar, se mantuvieron dentro de los intervalos óptimos para el crecimiento del erizo morado.

2.6 Evaluación de variables de crecimiento y calidad gonadal

Para determinar el tratamiento con el mejor efecto en el crecimiento y calidad gonadal, se tomaron en cuenta las siguientes variables: supervivencia, crecimiento en cuanto al peso total húmedo del erizo, longitud del diámetro de testa, peso de la gónada, índice gonadal, parámetros de calidad gonadal y concentración de ácidos grasos omega-3 (EPA y DHA) en las gónadas.

2.6.1 Supervivencia

El porcentaje de supervivencia de los erizos se calculó al finalizar la etapa experimental, para ello se utilizó la siguiente fórmula:

$$\textit{Supervivencia} (\%) = \left(\frac{\# \text{ final erizos}}{\# \text{ inicial erizos}} \right) \times 100 \quad (4)$$

2.6.2 Crecimiento (peso y diámetro de testa)

El crecimiento de los erizos se registró en cada una de las biometrías realizadas con los datos del peso húmedo y la longitud de diámetro de testa. En el caso del crecimiento en peso total, el procedimiento consistió en extraer los erizos de cada unidad experimental y se colocaron con la zona oral hacia arriba por un periodo de 2 min, bajo sombra y sobre trapos húmedos con agua de mar del sistema. Este proceso se realizó para eliminar el exceso de humedad y posteriormente registrar el peso húmedo en una balanza marca Sartorius modelo M-prove. Para registrar la longitud, los erizos fueron medidos con un vernier (en mm) entre sus espinas para registrar la longitud total de la testa (parte más ancha), una vez finalizado el pesaje, los organismos fueron regresados a las unidades experimentales del sistema de acuerdo con su repetición y tratamiento experimental; este procedimiento demoraba alrededor de 2 a 5 min. Los datos

se recopilaron para registrar la diferencia de peso y diámetro de testa con respecto a cada una de las biometrías realizadas durante el cultivo.

2.6.3 Tasa de conversión alimenticia (TCA)

La tasa de conversión alimenticia (TCA) se calculó con base en los gramos de alimento consumido (AC) y los gramos de ganancia en peso (GP) promedio, este parámetro se evaluó para cada tratamiento. La TCA se estimó con la siguiente fórmula (Durazo *et al.*, 2010):

$$TCA = \left(\frac{\text{g de alimento consumido}}{\text{g de ganancia de peso}} \right) \quad (5)$$

2.6.4 Índice gonadal (IG)

Antes de iniciar con el experimento, se extrajeron las gónadas de 23 organismos del medio natural para conocer el índice gonadal promedio y la proporción del peso corporal que corresponde a tejido gonadal. Las cinco gónadas de cada erizo fueron obtenidas al abrir la testa verticalmente con pinzas, posteriormente se limpiaron con agua de mar y se colocaron en una navecilla seca para obtener el peso en una balanza Sartorius modelo M-prove. Este mismo procedimiento fue realizado para las gónadas de los erizos que recibieron las diferentes dietas al finalizar el cultivo.

El índice gonadal (IG) de las muestras de los erizos recién recolectados y los del cultivo experimental, se registró con base en lo establecido por Workman (1999) mediante la siguiente fórmula:

$$IG = \left(\frac{\text{Peso húmedo de gonadas}}{\text{Peso total del organismo}} \right) * 100 \quad (6)$$

2.6.5 Parámetros de calidad gonadal

Para la biometría final, se realizó un análisis similar a la evaluación propuesta de Pearce *et al.* (2002), la cual relaciona la calidad de las gónadas de *S. purpuratus* asignando un criterio de calidad final (Tabla 5).

En la tabla elaborada por Pearce y colaboradores, los resultados con valores más bajos significan una mejor calidad gonadal, mientras que los registros con valores más altos corresponden a los menos deseables de acuerdo con un valor comercial.

Tabla 5. Parámetros de evaluación y valor del grado para evaluar en la calidad gonadal para los erizos con base en la propuesta de Pearce *et al.* (2002). Valores menores significan una mejor evaluación y/o calidad gonadal.

Parámetros de evaluación	Grado	Características
<i>Firmeza</i>	1	Muy firme
	2	Firme
	3	Suave
	4	Muy suave
<i>Textura</i>	1	Segmentos diferenciados, lisos
	2	Segmentos diferenciados, granulares
	3	Segmentos no diferenciados, granulares
<i>Color</i>	1	A – Amarillo/naranja opaco
	2	AB – Amarillo/naranja opaco
	3	B – Amarillo brillante pálido
	4	BC – Café/oscuro
	5	C – Café/gris

Posteriormente a la extracción de las gónadas de los organismos de cada tratamiento y unidad experimental, se procedió a documentarlas mediante fotografías, con el fin de evaluar los parámetros de calidad gonadal (visual) y mantener un registro digital. El parámetro de sabor, no fue posible evaluarlo debido a que solamente se contó con la participación de dos evaluadores, resultando insuficiente para alcanzar conclusiones con un alto rigor estadístico. En relación con la firmeza, textura y color de las gónadas, no se realizó en fresco, y estos parámetros se evaluaron mediante fotografías.

Para la clasificación digital de coloración de las gónadas, las fotografías que se tomaron el día de la última biometría (día 115) se tuvieron que modificar, para ajustar todas a la misma iluminación con ayuda del programa GIMP 2.10.38. Posteriormente, las imágenes se analizaron en digital con ayuda de una encuesta que se envió a 23 seleccionados, de estos respondieron 13 evaluadores que incluyó a investigadores, personas en el sector pesquero, buzos y personal en el área de cocina asiática, quienes no tuvieron conocimiento a cuál tratamiento correspondía cada una de las fotografías. Lo anterior se realizó con el

propósito de reunir la percepción del sector productivo e investigaciones involucradas en esta especie. A los encuestados se les facilitó la escala de PANTONE de coloración reportados por Radjab y Purbiantoro (2019) para la evaluación de las gónadas de *Tripneustes gratilla*, también se incluyeron colores de la yema de huevo, que son similares a lo esperado en gónada de erizo, esto se consultó con el Dr. Julio Palleiro (com. Pers.). Además, se agregó una escala de imágenes para que los encuestados las evaluaran con base en sus características de textura y firmeza.

2.7 Composición proximal y análisis de ácidos grasos de las gónadas de los erizos alimentados con las dietas experimentales y de los recolectados del medio natural.

La evaluación de las proteínas, lípidos, cenizas y extracto libre de nitrógeno (ELN), así como los análisis de ácidos grasos mediante la técnica de transmetilación, se realizaron de la misma forma que lo descrito en el apartado 2.3, correspondiente a la evaluación de la composición proximal de las dietas experimentales.

Las muestras de las gónadas extraídas al finalizar el experimento se distribuyeron aleatoriamente para los distintos análisis. De cada repetición de los diferentes tratamientos, se destinaron: tres erizos para analizar el peso seco de la gónada, tres organismos para la documentación de imagen de las gónadas y el resto de los organismos para los análisis de proteínas, lípidos y ácidos grasos. Las gónadas de los erizos destinadas para los análisis fueron liofilizadas, para ello se colocaron en tubos "Falcon" cubiertos con Parafilm con pequeños orificios y en un ultracongelador a -80 °C por 24 h, posteriormente se colocaron en una liofilizadora marca Labconco de 6 L de capacidad del Departamento de Acuicultura en CICESE, el cual opera a temperatura de -80 °C y 0.100 mBar de presión, donde permanecieron dos días o hasta que las muestras estuvieran completamente secas. Posteriormente, las muestras se taparon y se sellaron con Parafilm M para almacenarlas en congelación a -12 °C. A continuación, las muestras fueron trituradas con ayuda de un mortero y se guardaron en bolsas resellables (Ziploc) etiquetadas para cada tratamiento y se almacenaron a -4 °C para su posterior análisis proximal y de ácidos grasos de acuerdo con la metodología descrita en la sección 2.3.

En el caso del análisis de cenizas, previamente a la biometría final, se incineraron y pesaron las navecillas de aluminio que se utilizaron para las determinaciones del peso de las gónadas de los diversos tratamientos y repeticiones. Al finalizar los 115 días del experimento, las cinco gónadas de tres erizos de

cada unidad experimental (54 organismos en total), se colocaron en navecillas de aluminio previamente pesadas y etiquetadas por tratamiento y unidad experimental, y fueron colocadas en una estufa convencional a 80 °C por 24 h y posteriormente incineradas en una mufla Fisher Scientific por un periodo de 6 h a 450 °C. Una vez terminado el proceso de incineración y el enfriamiento de las muestras, se registró el peso de cenizas con una balanza analítica *Sartorius* modelo M-prove y por diferencia de peso se determinó el porcentaje de peso orgánico.

2.8 Análisis estadístico

Como primer punto se determinó que los datos de los análisis proximales, de crecimiento, índice gonadal, supervivencia y perfil de ácidos grasos de las muestras cumplieran con la homogeneidad y normalidad, mediante las pruebas de Kolmogórov-Smirnov y Levene. Los valores de análisis proximales de proteínas, lípidos y cenizas fueron convertidos de porcentaje a g/100 g para poder realizar las pruebas de normalidad y homogeneidad de varianza. Posteriormente, se aplicó la prueba de análisis de varianza de una vía (ANOVA) y una prueba post-hoc de Tukey, para determinar las diferencias significativas entre los tratamientos. Para todos los análisis estadísticos se utilizó un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$ y el procesamiento y análisis de los datos se llevaron a cabo con los paquetes estadísticos Statistica 10 IBM® y SPSS Statistics 25.

Capítulo 3. Resultados

3.1 Evaluación de la composición proximal de dietas formuladas

3.1.1 Proteínas totales

Al realizar los análisis de proteínas en las dietas experimentales, se encontró que el mayor porcentaje de proteína se obtuvo en la dieta B (0+) con un 34.8 %, siendo similar a la dieta D (1%), E (2%) y F (4%); mientras que la dieta con el menor porcentaje de proteína fue A (0-) con un 30.3%, que es similar a la dieta C (0.5%), D (1%) y E (2%) (Tabla 6). Entre las diferentes dietas experimentales se encontraron diferencias significativas ($p = 0.014$), por lo que no se obtuvieron dietas isoproteicas.

3.1.2 Lípidos totales

El análisis de lípidos totales de las dietas experimentales mostró que no hay diferencias significativas entre los tratamientos ($p = 0.580$), y el promedio obtenido entre estos fue 8.9 % (Tabla 6). Esta información permitió comprobar que las dietas experimentales fueron isolipídicas.

3.1.3 Cenizas, peso seco y peso orgánico

El promedio de los análisis de cenizas, peso seco y peso orgánico de los distintos tratamientos se reportan en la Tabla 6. El porcentaje de cenizas fue del 11.4 al 12.9 %, lo que corresponde al porcentaje de los minerales que se encuentran disponibles en las dietas. En relación con el peso orgánico, se presentaron variaciones entre los tratamientos, con la mayor concentración en la dieta A (0-) con $847 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, y la menor en la dieta E (2%) con $828 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$.

Tabla 6. Valores promedio y desviación estándar del porcentaje de proteínas, lípidos, peso de cenizas (%), peso seco, peso orgánico ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$) y extracto libre de nitrógeno (ELN), en las dietas proporcionadas al erizo morado (*S. purpuratus*). Dieta A (0-): harina de pescado desgrasada sin inclusión de ácidos grasos (AG's) omega-3 (control negativo); Dieta B (0+): harina de pescado sin desgrasar y sin inclusión de AG's omega-3 (control positivo); Dieta C (0.5%): harina de pescado sin desgrasar con inclusión del 0.5% de AG's omega-3; Dieta D (1%): harina de pescado sin desgrasar con inclusión del 1% de AG's omega-3; Dieta E (2%): harina de pescado sin desgrasar con inclusión del 2% de AG's omega-3; Dieta F (4%): harina de pescado sin desgrasar con inclusión del 4% de AG's omega-3. Los valores de $p < 0.05$ representan diferencias significativas.

	A (0-)	B (0+)	C (0.5%)	D (1%)	E (2%)	F (4%)	<i>p</i>
Proteínas %	30.3 ± 0.7 ^c	34.8 ± 0.1 ^a	31.7 ± 0.8 ^{bc}	32.1 ± 0.5 ^{abc}	32.2 ± 0.8 ^{abc}	33.5 ± 1.1 ^{ab}	0.014
Lípidos %	9.0 ± 0.8	9.1 ± 0.1	8.8 ± 0.4	8.4 ± 0.7	8.8 ± 0.5	9.0 ± 0.2	0.580
Cenizas %	12.9 ± 0.6 ^a	11.4 ± 0.2 ^b	12.0 ± 1.9 ^b	12.3 ± 0.5 ^{ab}	12.3 ± 0.1 ^{ab}	11.9 ± 0.2 ^{ab}	0.004
ELN %	47.8 ± 1.8	44.8 ± 1.3	47.5 ± 2.0	47.2 ± 2.0	46.7 ± 1.2	45.5 ± 1.2	0.148
Peso Seco ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	976 ± 6.4 ^a	951 ± 1.2 ^{ab}	957 ± 19.8 ^{ab}	957 ± 8.3 ^{ab}	952 ± 2.9 ^b	958 ± 0.5 ^{ab}	0.043
Peso Orgánico ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	847 ± 1.2 ^a	837 ± 2.8 ^c	837 ± 0.5 ^c	833 ± 3.4 ^{bc}	828 ± 3.9 ^b	838 ± 1.7 ^c	0.002

3.1.4 Extracto libre de nitrógeno (ELN)

En el extracto libre de nitrógeno, para determinar la cantidad aproximada de carbohidrato en la dieta, no se observaron diferencias significativas entre tratamientos ($p = 0.148$), con un promedio de 46 %.

3.1.5 Concentración de ácidos grasos en la dieta

Los ácidos grasos presentes en la dieta se clasificaron en saturados, monoinsaturados, poliinsaturados, y el total de ácidos grasos identificados (Tabla 7), expresados en concentraciones de $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$. Las diferencias significativas ($p < 0.05$) se encontraron solamente entre los ácidos grasos monoinsaturados de la dieta, donde los tratamientos A (0-), B (0+), C (0.5%) y D (1%), con un promedio de $15.06 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ son similares, contra las menores concentraciones de ácidos grasos en los tratamientos E (2%) y F (4%) de $0.26 \pm 0.26 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ y $6.65 \pm 5.42 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, respectivamente.

Tabla 7. Concentración en $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ de la suma de los ácidos grasos saturados (AGS), monoinsaturados (AGMI), poliinsaturados (AGPI) y la suma total de los ácidos grasos en las dietas con distintas inclusiones de omega-3. Dieta A (0-): harina de pescado desgrasada sin inclusión de ácidos grasos (AG's) omega-3 (control negativo); Dieta B (0+): harina de pescado sin desgrasar y sin inclusión de AG's omega-3 (control positivo); Dieta C (0.5%): harina de pescado sin desgrasar con inclusión del 0.5% de AG's omega-3; Dieta D (1%): harina de pescado sin desgrasar con inclusión del 1% de AG's omega-3; Dieta E (2%): harina de pescado sin desgrasar con inclusión del 2% de AG's omega-3; Dieta F (4%): harina de pescado sin desgrasar con inclusión del 4% de AG's omega-3. Los valores de $p < 0.05$ representan diferencias significativas.

	A (0-)	B (0+)	C (0.5%)	D (1%)	E (2%)	F (4%)	<i>p</i>
ΣAGS ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	11.38 ± 1.92	12.23 ± 1.36	13.13 ± 1.54	12.73 ± 0.42	17.75 ± 16.74	10.71 ± 9.16	0.951
ΣAGMI ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	16.38 $\pm 0.65^a$	14.24 $\pm 0.02^a$	16.27 $\pm 4.10^a$	13.36 $\pm 0.14^a$	0.26 $\pm 0.26^{ab}$	6.65 $\pm 5.42^{ab}$	0.006
ΣAGPI ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	10.89 ± 0.29	11.24 ± 0.02	6.94 ± 6.89	12.35 ± 0.21	8.84 ± 7.65	10.59 ± 8.53	0.924
Σ Total AG ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	38.65 ± 2.87	37.71 ± 1.36	36.34 ± 1.25	38.45 ± 0.76	26.85 ± 24.38	27.95 ± 23.11	0.890

En relación con los ácidos grasos de cadena larga EPA y DHA (Tabla 8), no se presentaron diferencias significativas, a pesar de ir desde concentraciones de $0 \pm 0 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ en la dieta A (0-) hasta $0.84 \pm 0.13 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ en la dieta F (4%). De igual forma, se observó que los ácidos grasos C16, C18, C20:4n6 (araquidónico) y C20:5n3 (eicosapentaenoico) y C22:6n3 (docosahexaenoico) se incrementaron en las dietas a medida que aumentaba la concentración de ácidos grasos omega-3, en comparación con la dieta A (0-). Posteriormente, se evaluó si estos ácidos grasos fueron consumidos y almacenados en las gónadas de los erizos (Tabla 9). En este estudio, se observó un incremento aparente en los ácidos grasos C16:0 y C18:0 en las diferentes dietas-

Tabla 8. Concentración en $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ de EPA y DHA en las dietas formuladas para el erizo. Dieta A (0-): harina de pescado desgrasada sin inclusión de ácidos grasos (AG's) omega-3 (control negativo); Dieta B (0+): harina de pescado sin desgrasar y sin inclusión de AG's omega-3 (control positivo); Dieta C (0.5%): harina de pescado sin desgrasar con inclusión del 0.5% de AG's omega-3; Dieta D (1%): harina de pescado sin desgrasar con inclusión del 1% de AG's omega-3; Dieta E (2%): harina de pescado sin desgrasar con inclusión del 2% de AG's omega-3; Dieta F (4%): harina de pescado sin desgrasar con inclusión del 4% de AG's omega-3. Los valores de $p < 0.05$ representan diferencias significativas.

	A (0-)	B (0+)	C (0.5%)	D (1%)	E (2%)	F (4%)	<i>p</i>
EPA ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	0.00 ± 0.00	0.35 ± 0.00	0.47 ± 0.06	0.49 ± 0.01	0.65 ± 0.11	0.84 ± 0.13	0.3659
DHA ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	0.05 ± 0.00	0.78 ± 0.00	1.14 ± 0.15	1.27 ± 0.02	1.78 ± 0.37	2.52 ± 0.52	0.3788

Tabla 9. Concentración en mg•100g y cambio neto (CN) de los ácidos grasos identificados en las dietas con distintas inclusiones de omega-3. Dieta A (0-): harina de pescado desgrasada sin inclusión de ácidos grasos (AG's) omega-3 (control negativo); Dieta B (0+): harina de pescado sin desgrasar y sin inclusión de AG's omega-3 (control positivo); Dieta C (0.5%): harina de pescado sin desgrasar con inclusión del 0.5% de AG's omega-3; Dieta D (1%): harina de pescado sin desgrasar con inclusión del 1% de AG's omega-3; Dieta E (2%): harina de pescado sin desgrasar con inclusión del 2% de AG's omega-3; Dieta F (4%): harina de pescado sin desgrasar con inclusión del 4% de AG's omega-3.

Ácidos grasos	Tratamientos										
	A (0-)	B (0+)		C (0.5%)		D (1%)		E (2%)		F (4%)	
	mg•g ⁻¹	mg•g ⁻¹	CN								
C10:0	22.66	15.06	-7.60	4.26	-18.40	37.93	15.27	0.00	-22.66	14.56	-8.10
C12:0	488.89	478.81	-10.08	540.63	51.74	466.38	-22.51	332.69	-156.20	375.49	-113.40
C16:0	602.58	607.31	4.74	615.18	12.60	598.41	-4.16	655.76	53.19	673.67	71.10
C18:0	24.02	38.65	14.63	48.01	23.99	46.64	22.63	57.80	33.78	79.44	55.43
C18:1n9	1637.64	1423.58	-214.06	1623.55	-14.09	1336.35	-301.29	1328.63	-309.01	1022.16	-615.48
C18:2n6	1069.93	1000.08	-69.85	468.20	-601.73	1040.69	-29.24	720.90	-349.03	800.62	-269.31
C18:3n3	12.52	7.61	-4.91	13.41	0.89	12.52	0.00	19.23	6.71	73.31	60.79
C20:4n6	0.84	3.95	3.10	7.50	6.65	6.43	5.58	4.58	3.73	8.36	7.51
C20:5n3	0.00	34.80	34.80	46.76	46.76	48.92	48.92	39.20	39.20	52.60	52.60
C22:6n3	5.45	77.91	72.46	114.37	108.92	126.88	121.43	109.54	104.06	160.62	155.17

3.2 Crecimiento y calidad gonadal del erizo morado

3.2.1 Supervivencia

No se observaron diferencias significativas entre los diferentes tratamientos ($p = 0.374$), presentando una supervivencia promedio de 93.7%, y los menores porcentajes (89.58 %) se observaron en los tratamientos de las dietas C (0.5%) y F (4%) (Tabla 10).

3.2.2 Crecimiento en peso y diámetro de testa

Los erizos de todos los tratamientos incrementaron su crecimiento en peso, diámetro de testa y el índice gonadal (IG). El crecimiento de los erizos se observó desde el día 30 de cultivo, presentando un comportamiento exponencial en los primeros 90 días (Fig. 7). El crecimiento tanto en peso y longitud del diámetro de testa aumentó de 7.2 hasta 8.4 g y de 3.4 hasta 4.1 mm, respectivamente. Sin embargo, no se encontraron diferencias entre los tratamientos a los 115 días del cultivo en ganancia en peso, longitud, y en el porcentaje de crecimiento total de los organismos (Tabla 10).

3.2.3 Tasa de conversión alimenticia (TCA)

En cuanto a la Tasa de Conversión Alimenticia (TCA), no se observaron diferencias significativas entre los diferentes tratamientos ($p = 0.809$); obteniéndose valores entre los 4.91 y 5.78 (Tabla 10).

3.2.4 Índice gonadal

El peso promedio de las gónadas de los organismos extraídos del medio natural fue de 1.66 ± 1.1 g, con un índice gonadal promedio de 6.38 ± 2 %. En relación con los erizos cultivados durante 115 días, el peso promedio de gónadas fue de 6.0 ± 2.0 g, lo que resultó en un índice gonadal entre los 15.8 % hasta 18.2 % (Tabla 10). No se observaron diferencias significativas entre tratamientos ($p > 0.05$).

Tabla 10. Valores promedio y desviación estándar de la morfometría, índice gonadal y porcentaje de supervivencia de erizo morado (*S. purpuratus*) alimentados con las diferentes dietas durante los 115 días de cultivo. Dieta A (0-): harina de pescado desgrasada sin inclusión de ácidos grasos (AG's) omega-3 (control negativo); Dieta B (0+): harina de pescado sin desgrasar y sin inclusión de AG's omega-3 (control positivo); Dieta C (0.5%): harina de pescado sin desgrasar con inclusión del 0.5% de AG's omega-3; Dieta D (1%): harina de pescado sin desgrasar con inclusión del 1% de AG's omega-3; Dieta E (2%): harina de pescado sin desgrasar con inclusión del 2% de AG's omega-3; Dieta F (4%): harina de pescado sin desgrasar con inclusión del 4% de AG's omega-3.

Tratamiento	A (0-)	B (0+)	C (0.5%)	D (1%)	E (2%)	F (4%)	p
L. Inicial (mm)	41 ± 5.0	40 ± 4.0	40 ± 4.0	40 ± 4.0	40 ± 4.0	40 ± 5.0	0.952
L. Final (mm)	45 ± 4.0	45 ± 3.0	43 ± 4.0	45 ± 4.0	44 ± 3.0	44 ± 4.0	0.606
Ganancia L (mm)	3.8 ± 0.6	4.1 ± 0.2	3.4 ± 0.7	4.0 ± 0.4	4.1 ± 0.5	3.6 ± 0.6	0.618
% Crecimiento	8.60	9.20	7.90	9.10	9.20	8.30	0.813
P. Inicial (g)	29 ± 9.0	27 ± 8.0	27 ± 10	28 ± 10	27 ± 10	27 ± 10	0.978
P. Final (g)	36 ± 9.0	35 ± 9.0	35 ± 11	35 ± 11	36 ± 10	34 ± 9.0	0.982
Ganancia Peso (g)	7.2 ± 1.2	7.7 ± 0.7	7.6 ± 1.1	7.4 ± 1.2	8.4 ± 0.5	7.4 ± 1.6	0.820
Índice Gonadal	15.8 ± 3.7	16.5 ± 3.6	18.2 ± 5.6	16.9 ± 4.8	17.9 ± 3.7	17.4 ± 3.9	0.069
% Supervivencia	95.8 ± 3.6	93.7 ± 6.2	89.6 ± 3.6	95.8 ± 3.6	97.9 ± 3.6	89.5 ± 9.5	0.374
TCA	5.7 ± 0.9	5.3 ± 0.5	5.5 ± 1.1	5.8 ± 0.9	4.9 ± 0.2	5.9 ± 1.7	0.809

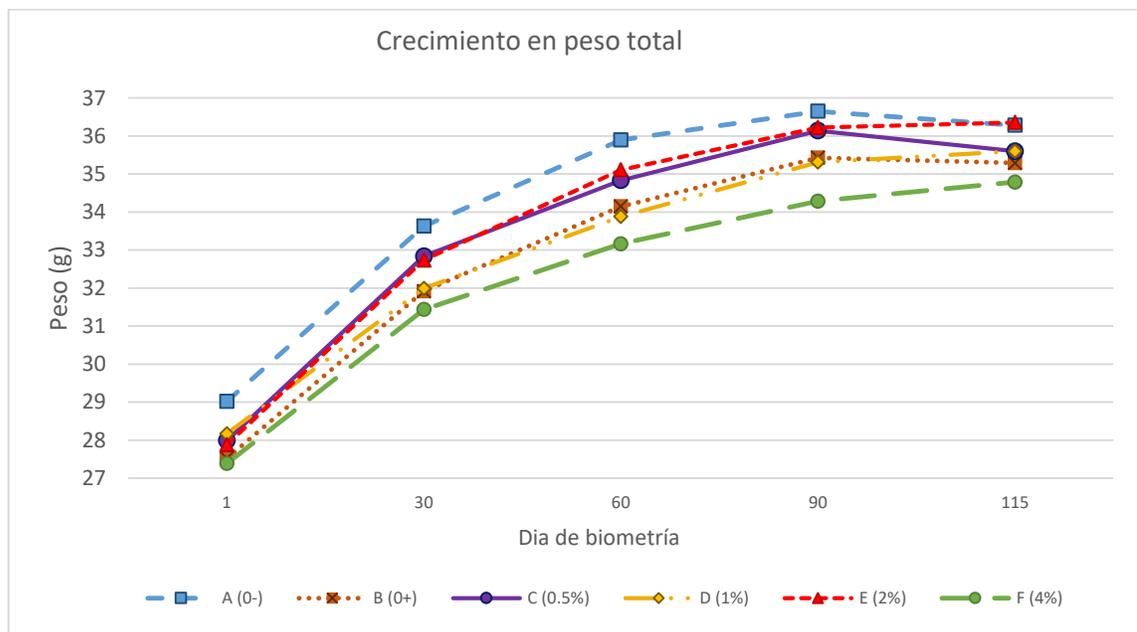


Figura 7. Crecimiento total en peso de los erizos morados alimentados con las distintas dietas experimentales durante los 115 días del cultivo. Dieta A(0-): harina de pescado desgrasada sin inclusión de ácidos grasos (AG's) omega-3 (control negativo); Dieta B(0+): harina de pescado sin desgrasar y sin inclusión de AG's omega-3 (control positivo); Dieta C(0.5%): harina de pescado sin desgrasar con inclusión del 0.5% de AG's omega-3; Dieta D(1%): harina de pescado sin desgrasar con inclusión del 1% de AG's omega-3; Dieta E(2%): harina de pescado sin desgrasar con inclusión del 2% de AG's omega-3; Dieta F(4%): harina de pescado sin desgrasar con inclusión del 4% de AG's omega-3.

3.2.5 Determinación de calidad de las gónadas

Los parámetros propuestos por Pearce y colaboradores en el 2002 se utilizaron como referencia para la elaboración de la tabla de calidad, lo que permitió determinar los parámetros visuales a evaluar. En el caso de los parámetros de firmeza, textura y coloración fueron determinados por evaluadores mediante una encuesta tomando en cuenta las figuras 8 y 9.

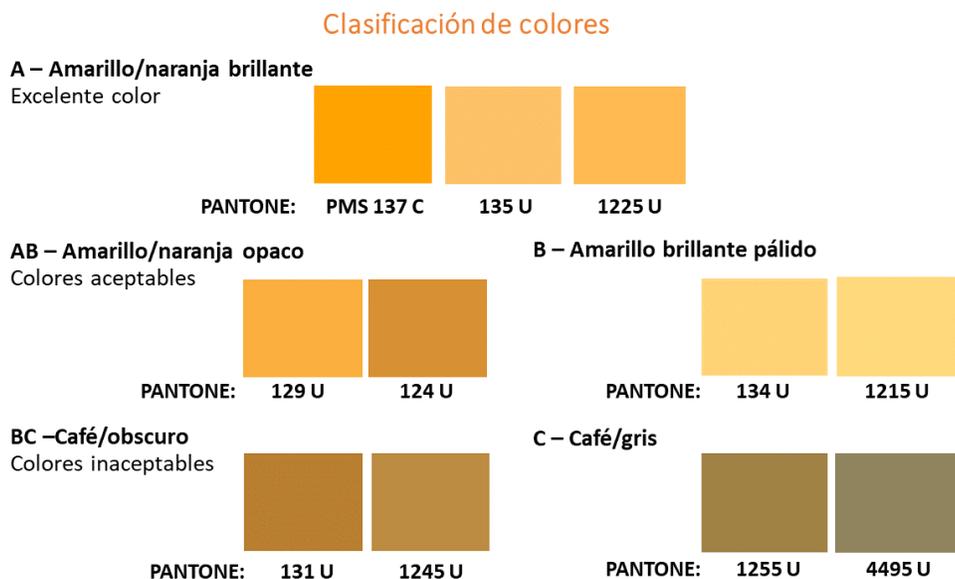


Figura 8. Paleta de colores (PANTONE) propuesta por Radjab y Purbiantoro (2019) y complementada con color Pantone 1225 U (DSM YolkFan) para evaluar la coloración gonadal de los erizos de mar alimentados con las diferentes dietas.



Figura 9. Imágenes de referencia para establecer los parámetros de calidad de las gónadas de erizo. Firmeza (1 a 4 grados) y textura (1 a 3 grados). Imágenes extraídas del experimento como guía de apoyo de evaluación.

La degustación realizada por parte de expertos en la materia de calidad de gónadas de erizo no fue concluyente, debido a que no se pudieron evaluar todos los tratamientos y repeticiones. Lo anterior es a causa de la cantidad de muestras y el tiempo requerido para su análisis, por lo que solamente se pudo realizar esta evaluación para los tratamientos A(0-) y B(0+); controles negativo y positivo, respectivamente. No obstante, la información no fue suficiente para generar una comparación de la calidad con los demás tratamientos, por lo que se procedió a realizar un análisis de calidad con evaluaciones visuales mediante una encuesta.

3.2.5.1 Evaluación mediante encuesta visual

La evaluación de textura, firmeza y color se realizó mediante análisis de imágenes, y a través de una encuesta en un formulario de Google (Anexo 1), la cual fue contestada por 13 evaluadores, que incluyó a investigadores, personas del sector pesquero, buzos y personal del área de cocina asiática (se envió a 25 seleccionados); con el propósito de reunir la percepción del sector productivo e investigación involucrados en esta especie. Se recibieron 13 formularios contestados, los cuales se utilizaron para la caracterización de las gónadas de erizo obtenidas conforme a las fotografías guía que se muestran en las figuras 8 y 9. La amplia variación en los resultados y al menor número de datos, derivó en tomar la moda como medida de tendencia de cada parámetro (firmeza, textura y color) para los distintos tratamientos (Tabla 11). Estos resultados indican que no se observaron diferencias entre los encuestados en la calidad en cuanto a la textura y color de las gónadas de los erizos alimentados con las distintas dietas. En relación con la firmeza, se observó una ligera disminución (de 2 y 3 hasta 4) al aumentar la inclusión de omega-3 en la dieta de los erizos, sin embargo, estos resultados se deben tomar con precaución, debido al tamaño de la muestra.

Tabla 11. Modas obtenidas de la encuesta visual de las variables de firmeza, textura y color de las gónadas de los erizos morados alimentados con las distintas dietas durante los 115 días de cultivo. Dieta A (0-): harina de pescado desgrasada sin inclusión de ácidos grasos (AG's) omega-3 (control negativo); Dieta B (0+): harina de pescado sin desgrasar y sin inclusión de AG's omega-3 (control positivo); Dieta C (0.5%): harina de pescado sin desgrasar con inclusión del 0.5% de AG's omega-3; Dieta D (1%): harina de pescado sin desgrasar con inclusión del 1% de AG's omega-3; Dieta E (2%): harina de pescado sin desgrasar con inclusión del 2% de AG's omega-3; Dieta F (4%): harina de pescado sin desgrasar con inclusión del 4% de AG's omega-3.

	A (0-)	B (0+)	C (0.5%)	D (1%)	E (2%)	F (4%)
Firmeza	2, 3	4	3	4	4	4
Textura	2	2, 3	3	2	2, 3	3
Color	AB	AB	B	B	B	AB

3.3 Composición proximal de gónadas del erizo morado alimentados con las diferentes dietas

Los análisis proximales de las gónadas de los erizos incluyeron proteínas, lípidos, peso orgánico, ELN e identificación de ácidos grasos.

3.3.1 Proteínas de las gónadas de erizo morado

No se encontraron diferencias estadísticas entre los tratamientos ($p > 0.05$), lo cual se debe a la dispersión de los datos entre todos los tratamientos. El porcentaje de proteínas promedio en las gónadas de los erizos morados alimentados con las distintas dietas con omega-3 fue del 44.3 %, siendo las gónadas del tratamiento D (1%) las que mantuvieron los valores más altos con 47.6 % (Tabla 12).

3.3.2 Lípidos totales en gónadas

Los porcentajes de lípidos totales en las gónadas de los erizos variaron entre el 20.9 % hasta 26.2 % (Tabla 12), con diferencias significativas entre los tratamientos ($p = 0.002$). Los tratamientos A (0-) y B (0+) (control positivo y negativo, respectivamente), presentaron la mayor proporción de lípidos totales con 24.9 % y 26.2 %, respectivamente, mostrando similitudes a los tratamientos C (0.5%) y E (2%). Los tratamientos B (0+) y F (4%) con 26.2 % y 20.9 %, respectivamente, resultaron diferentes entre sí.

3.3.3 Peso seco de gónadas

El peso seco y el peso orgánico promedio de las gónadas de los erizos en los distintos tratamientos se mantuvo entre un intervalo de 25.6 a 27.5 % y de 21.8 a 24.0 %, respectivamente, sin diferencias significativas entre los tratamientos (Tabla 12). En relación con el porcentaje de cenizas, los valores más altos se encontraron en las gónadas de los organismos alimentados con la dieta A (0-) con 4.1 % y la dieta F (4%) con 5.3 %, mientras que las gónadas de los erizos del resto de los tratamientos mantuvieron valores entre 3.4 a 3.9 % (Tabla 12), con diferencias significativas entre los tratamientos ($p = 0.005$).

Tabla 12. Valores promedio y desviación estándar del porcentaje de proteínas, lípidos, peso de cenizas y ELN; así como el peso seco y orgánico (%) en las gónadas de los juveniles de erizo morado (*S. purpuratus*) alimentados con las dietas experimentales. Dieta A (0-): harina de pescado desgrasada sin inclusión de ácidos grasos (AG's) omega-3 (control negativo); Dieta B (0+): harina de pescado sin desgrasar y sin inclusión de AG's omega-3 (control positivo); Dieta C (0.5%): harina de pescado sin desgrasar con inclusión del 0.5% de AG's omega-3; Dieta D (1%): harina de pescado sin desgrasar con inclusión del 1% de AG's omega-3; Dieta E (2%): harina de pescado sin desgrasar con inclusión del 2% de AG's omega-3; Dieta F (4%): harina de pescado sin desgrasar con inclusión del 4% de AG's omega-3. Los valores de $p < 0.05$ representan diferencias significativas.

	A (0-)	B (0+)	C (0.5%)	D (1%)	E (2%)	F (4%)	<i>p</i>
Proteínas (%)	44.2 ± 7.6	40.0 ± 4.0	46.6 ± 4.2	47.6 ± 8.1	43.0 ± 4.7	44.8 ± 2.8	0.443
Lípidos (%)	24.9 ± 3.1 ^{ab}	26.2 ± 2.3 ^a	23.3 ± 2.5 ^{abc}	22.0 ± 2.0 ^{bc}	23.0 ± 2.9 ^{abc}	20.9 ± 2.0 ^c	0.002
Cenizas (%)	4.1 ± 1.3 ^{ab}	3.5 ± 0.5 ^b	3.7 ± 0.3 ^b	3.4 ± 0.7 ^b	3.9 ± 0.7 ^b	5.3 ± 0.4 ^a	0.005
ELN (%)	27.1	30.3	26.4	27.0	30.0	29.0	0.644
Peso Seco (%)	27.0 ± 7.1	27.5 ± 1.5	26.5 ± 3.5	27.2 ± 1.7	25.6 ± 2.3	27.2 ± 2.6	0.845
Peso Orgánico (%)	23.0 ± 6.0	24.0 ± 1.9	22.8 ± 3.7	23.8 ± 3.1	21.8 ± 2.3	21.9 ± 2.3	0.515

3.3.4 Extracto Libre de Nitrógeno

El Extracto Libre de Nitrógeno (ELN) se estimó con la diferencia de los porcentajes de los análisis proximales (proteínas, cenizas y lípidos), resultando valores entre el 26.4 y 30.3 % (Tabla 12).

3.3.5 Identificación de ácidos grasos en las gónadas

Los ácidos grasos se clasificaron en saturados, monoinsaturados, poliinsaturados y el total de ácidos grasos metilados e identificados (Tabla 13). En la mayoría de los tipos de ácidos grasos presentes en las gónadas se encontraron diferencias significativas, excepto en la sumatoria de los ácidos grasos poliinsaturados (AGPI) ($p = 0.441$), los cuales se encontraron en concentraciones entre 23.79 hasta 27.18 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$. En relación con los ácidos grasos saturados, la concentración más alta se presentó en las gónadas de los erizos de los tratamientos A (0-) con 56.65 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$, seguido de la dieta B (0+) con 54.75 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$, posteriormente disminuyó hasta 44.38 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ en los animales que recibieron la dieta F (4%) ($p = 0.001$). En los ácidos grasos monoinsaturados (AGMI), se observó un comportamiento similar, es decir, los ácidos grasos disminuyeron conforme se incrementó la inclusión de omega-3 en la dieta.

En relación con las concentraciones de EPA y DHA en las gónadas, se observó un aumento conforme la concentración de omega-3 incrementaba en la dieta (Tabla 14). En ambas concentraciones de ácidos grasos (EPA y DHA), se observaron diferencias significativas entre los diferentes tratamientos ($p < 0.001$). Las concentraciones más altas de EPA y DHA en las gónadas de los erizos, se observaron en aquellos que se alimentaron con las dietas que contenían mayor inclusión de ácidos grasos omega-3 Dieta F (4%), las cuales fueron de 2.59 hasta 4.62 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ en EPA, y de 0.23 hasta 3.58 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ en DHA.

Tabla 13. Concentración en $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ de la suma de los ácidos grasos saturados (AGS), monoinsaturados (AGMI), poliinsaturados (AGPI) y del total de los ácidos grasos, de las gónadas de erizos alimentados con las distintas dietas. Dieta A (0-): harina de pescado desgrasada sin inclusión de ácidos grasos (AG's) omega-3 (control negativo); Dieta B (0+): harina de pescado sin desgrasar y sin inclusión de AG's omega-3 (control positivo); Dieta C (0.5%): harina de pescado sin desgrasar con inclusión del 0.5% de AG's omega-3; Dieta D (1%): harina de pescado sin desgrasar con inclusión del 1% de AG's omega-3; Dieta E (2%): harina de pescado sin desgrasar con inclusión del 2% de AG's omega-3; Dieta F (4%): harina de pescado sin desgrasar con inclusión del 4% de AG's omega-3. Valores de $p < 0.05$ indican diferencias significativas.

	A (0-)	B (0+)	C (0.5%)	D (1%)	E (2%)	F (4%)	<i>p</i>
ΣAGS ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	56.65 $\pm 10.48^a$	54.75 $\pm 5.66^{ab}$	49.87 $\pm 15.06^{abc}$	45.33 $\pm 7.79^{bc}$	48.25 $\pm 9.12^{abc}$	44.38 $\pm 9.12^c$	0.001
ΣAGMI ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	14.22 $\pm 7.03^a$	10.33 $\pm 1.26^{ab}$	10.89 $\pm 5.05^{ab}$	8.04 $\pm 1.31^b$	9.72 $\pm 4.35^b$	7.51 $\pm 1.23^b$	0.001
ΣAGPI ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	23.76 ± 5.18	24.74 ± 2.52	25.79 ± 6.09	24.94 ± 5.41	27.18 ± 4.82	24.67 ± 5.55	0.441
Σ Total AG's ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	94.62 $\pm 12.41^a$	89.81 $\pm 8.02^{ab}$	86.54 $\pm 20.28^{ab}$	78.31 $\pm 13.62^b$	85.15 $\pm 9.90^{ab}$	76.57 $\pm 15.00^b$	0.001

En la Tabla 15 se muestra el perfil de los ácidos grasos identificados en las gónadas de los erizos provenientes del medio natural (iniciales) y de los alimentados con las diferentes dietas con inclusión de omega-3 durante los 115 días de cultivo. En el caso de los organismos silvestres, se observó una concentración inicial de EPA (C20:5n3) de 10.11 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$, la cual fue superior a las concentraciones observadas en los organismos alimentados con dietas enriquecidas en omega-3; tal como se muestra en la tabla 14, aunque el contenido de ácido eicosapentaenoico (EPA) en las gónadas aumentó con el incremento de omega-3 en la dieta (2.59 a 4.62 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$), las concentraciones de este ácido graso fueron menores que las obtenidas de las gónadas de los organismos en su medio natural, registrándose un decremento en los organismos experimentales de -5.49 a -7.48 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$, respectivamente (Tabla 15).

Tabla 14. Concentración en $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ de EPA y DHA en las gónadas de los erizos alimentados con las diferentes dietas que contenían la inclusión de omega-3. Dieta A (0-): harina de pescado desgrasada sin inclusión de ácidos grasos (AG's) omega-3 (control negativo); Dieta B (0+): harina de pescado sin desgrasar y sin inclusión de AG's omega-3 (control positivo); Dieta C (0.5%): harina de pescado sin desgrasar con inclusión del 0.5% de AG's omega-3; Dieta D (1%): harina de pescado sin desgrasar con inclusión del 1% de AG's omega-3; Dieta E (2%): harina de pescado sin desgrasar con inclusión del 2% de AG's omega-3; Dieta F (4%): harina de pescado sin desgrasar con inclusión del 4% de AG's omega-3. Valores de $p < 0.05$ indican diferencias significativas.

	A (0-)	B (0+)	C (0.5%)	D (1%)	E (2%)	F (4%)	p
EPA ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	2.59 $\pm 0.62^c$	2.98 $\pm 0.49^{bc}$	3.85 $\pm 0.71^d$	3.63 $\pm 0.74^{bd}$	4.33 $\pm 0.94^{ad}$	4.62 $\pm 0.82^a$	0.001
DHA ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	0.23 $\pm 0.11^d$	1.25 $\pm 0.14^c$	1.79 $\pm 0.47^e$	2.06 $\pm 0.38^e$	2.76 $\pm 0.44^b$	3.58 $\pm 0.87^a$	0.001

Tabla 15. Concentración en $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ y cambio neto (CN) de los ácidos grasos identificados en gónadas de erizo morado del medio natural (inicial) y de los alimentados con las diferentes dietas. Inicial: Muestra de gónadas de la biometría inicial (día 0), provenientes del medio natural, sin ser alimentados con algún tratamiento. Dieta A (0-): harina de pescado desgrasada sin inclusión de ácidos grasos (AG's) omega-3 (control negativo); Dieta B (0+): harina de pescado sin desgrasar y sin inclusión de AG's omega-3 (control positivo); Dieta C (0.5%): harina de pescado sin desgrasar con inclusión del 0.5% de AG's omega-3; Dieta D (1%): harina de pescado sin desgrasar con inclusión del 1% de AG's omega-3; Dieta E (2%): harina de pescado sin desgrasar con inclusión del 2% de AG's omega-3; Dieta F (4%): harina de pescado sin desgrasar con inclusión del 4% de AG's omega-3.

Ácidos grasos	Tratamientos experimentales												
	Inicial	A (0-)		B (0+)		C (0.5%)		D (1%)		E (2%)		F (4%)	
	$\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	$\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	CN										
C12:0	9.26	10.84	1.58	9.16	-0.1	9.17	-0.09	9.18	-0.08	10.31	1.05	10.73	1.47
C14:0	20.95	19.06	-1.89	19.56	-1.39	16.86	-4.09	14.76	-6.16	16.11	-4.84	15.98	-4.97
C16:0	13.67	12.4	-1.27	12.05	-1.62	10.95	-2.72	10.10	-3.57	10.09	-3.58	9.98	-3.69
C16:1	2.21	0.95	-1.26	0	-2.21	0.13	-2.08	0	-2.21	0	-2.21	0	-2.21
C17:1	1.15	1.37	0.22	0.26	-0.89	1.62	0.47	0.87	-0.28	1.41	0.26	1	-0.15
C18:0	3.75	12.13	8.38	12.5	8.75	10.83	7.08	10.4	6.65	8.98	5.23	6.47	2.72
C18:1n9	0	1.07	1.07	1.44	1.44	0	0	0	0	1.16	1.16	0	0
C18:2n6	0.64	13.20	12.56	13.72	13.08	11.96	11.32	12.55	11.91	12.67	12.03	10.5	9.86
C18:3n3	1.16	0.73	-0.43	0.6	-0.56	0.75	-0.41	0.45	-0.71	0.91	-0.25	0.41	-0.75
C20:0	2.32	2.48	0.16	1.46	-0.86	1.91	-0.41	0.86	-1.46	1.39	-0.93	1.21	-1.11
C20:1n9	5.29	8.98	3.69	8.41	3.12	8.08	2.79	7.12	1.83	7.17	1.88	6.5	1.21
C20:2	0.93	4.15	3.22	3.51	2.59	3.51	2.58	3.19	2.26	3.09	2.16	3	2.07
C20:3n3	3.87	2.21	-1.66	2.16	1.71	1.8	-2.07	10.22	6.35	2.01	-1.86	2.13	-1.74
C20:4n6	1.14	0.28	-0.86	0.26	-0.88	0.21	-0.93	0.16	-0.98	0.33	-0.81	0.28	-0.86
C20:5n3	10.11	2.63	-7.48	2.98	-7.13	3.86	-6.25	3.63	-6.48	4.29	-5.82	4.62	-5.49
C22:6n3	0.5	0.23	-0.27	1.25	0.75	1.82	1.32	2.06	1.56	2.76	2.26	3.58	3.08

Capítulo 4. Discusión

En este estudio se evaluó el efecto de las dietas con diferentes porcentajes de inclusión de omega-3 en la supervivencia, crecimiento y producción gonadal del erizo morado (*Strongylocentrotus purpuratus*). En relación con la supervivencia, las dietas no tuvieron efecto en esta respuesta, y los porcentajes estuvieron en un intervalo de 89 a 97 %. La mortalidad presentada durante el desarrollo del experimento fue resultado de un mal manejo de los organismos en la primera biometría, es decir, se extrajeron del agua y se colocaron en un paño seco, lo que propició la pérdida de humedad, además, el tiempo que permanecieron en esta condición fue de aproximadamente 10 minutos. Esta situación se corrigió a partir de la segunda biometría y por ende disminuyó la mortalidad post-biometría de los erizos cerca del 1%.

En general se han reportado altos porcentajes de supervivencia en diferentes especies de erizos, cuando se proporcionan dietas formuladas o alimentos naturales. Por ejemplo, en juveniles del erizo verde *Strongylocentrotus droebachiensis* alimentados con diferentes niveles de proteína y carbohidratos en la dieta, no se observó un efecto en la supervivencia (Eddy *et al.*, 2012). En contraste, el erizo negro (*Arbacia stellata*) mostró una supervivencia media del 62.5 % con dietas que contenían diferentes fuentes de proteína animal y vegetal, obteniendo el mejor resultado con la dieta que incluía la mezcla de harina de origen animal y vegetal, con un 70.8% de supervivencia (Picay-Espinoza, 2023). Estos valores son inferiores a los observados en el presente estudio (89.5 a 97.9 %) y a los reportados en estudios previos con erizo de mar. Por ejemplo, en juveniles de erizo *Loxechinus albus*, la supervivencia fue del 100% cuando se les proporcionó alimento natural que consistió en seis dietas de algas y una dieta con la esponja *lophon tubiforme* (Cárcamo, 2015). Las dietas de algas fueron frondas frescas de *Gracilaria chilensis*, *Sarcothalia crispata* y *Porphyra sp.*, *Ulva sp.*, *Macrocystis pyrifera*; y una dieta mixta compuesta por *M. pyrifera*, *Ulva sp.* y *S. crispata* (50%, 25% y 25%, respectivamente). En estudios con dietas formuladas para el erizo morado, realizados por García-Chávez (2012), García-Mendoza (2015) y Cuesta-Gómez (2017), se reportaron valores similares (86 a 100%) a los encontrados en el presente estudio.

En relación con el peso en el erizo morado, se pudo observar un aumento en esta respuesta en todos los tratamientos. A los 115 días del cultivo, los erizos que recibieron las dietas experimentales presentaron una ganancia en peso entre los 7 y 8 g, el cual fue mayor al obtenido por García-Mendoza (2015), quien obtuvo una ganancia máxima de 4.31 g en 13 semanas (91 días), y con una dieta rica en proteína de 34.7 g en 100 g. Los erizos del presente trabajo alcanzaron su peso máximo a los tres meses (90 días), y se mantuvo constante independientemente de la dieta suministrada. Por lo anterior, se podría asumir que

los animales llegaron a su límite máximo de talla, y empezaron a almacenar reservas en las gónadas, las cuales son el principal órgano de almacenamiento energético en erizos de mar para mantener energía durante la gametogénesis (Booolootian, 1964; Pearse y Giese, 1966; Gonor, 1973). En las gónadas de los erizos se encuentran dos tipos de células, las germinales y somáticas, siendo estas últimas denominadas fagocitos nutritivos, los cuales se encargan de acumular nutrientes al inicio de la gametogénesis, como reservas energéticas para los gametos (Kalachev y Yurchenko, 2017).

El crecimiento total registrado en el diámetro de testa de los erizos, independientemente de la dieta recibida, se ubicó entre 3.4 a 4.1 cm. Estos resultados son similares a los reportados por Cuesta-Gómez y Sánchez-Saavedra (2014), García-Mendoza (2015) y Cuesta-Gómez (2017), quienes observaron un crecimiento en el diámetro de la testa de entre 1.4 cm a 3.4 cm durante periodos de 70 y 90 días de cultivo, sin diferencias entre los distintos tratamientos dietarios. Lo anterior sugiere que el contenido específico de macronutrientes en la dieta podría no ser determinante para el crecimiento de la testa, siempre que los organismos reciban una alimentación constante. Este crecimiento es importante, ya que permite aumentar el espacio destinado a los intestinos y las gónadas del erizo de mar. Beas-Luna (2005) reportó que la talla máxima de los erizos morados es de 81 mm en la península de Baja California, lo cual coincide con el tamaño mínimo (80 mm) de extracción para el erizo rojo reportado por Palleiro-Nayar (2004) en la misma localidad. Esta información sugiere que, es posible obtener tallas más grandes del erizo morado, sin embargo, en el presente trabajo la talla promedio fue de 44 mm y la máxima de 62 mm. En un futuro y con la dieta adecuada, el erizo morado podría alcanzar las tallas reportadas en el medio natural lo que permitiría su comercialización.

En relación con la TCA (4.91 y 5.78) obtenida en el erizo morado alimentado con las diferentes dietas conteniendo distintos porcentajes de omega-3, no fue posible comparar estos valores con los reportados por Cuesta-Gómez (2017), ya que el autor reporta este indicador con base en la ganancia en gónada producida y no con base en la ganancia en peso (GP) como se realizó en el presente trabajo. Los valores de TCA obtenidos en el erizo morado probablemente podrían estar sobre estimados, ya que a pesar de que diariamente se alimentaba y retiraba el alimento no consumido, no se realizó una prueba de lixiviación de las dietas para cuantificar la pérdida de nutrientes mientras el alimento permanecía en el agua.

En la biometría inicial del cultivo, se calculó el índice gonadal que presentaron los organismos recolectados del medio natural, esto con el fin de realizar una comparación con los obtenidos en los erizos que fueron alimentados con las diferentes dietas. Los organismos de la biometría inicial tuvieron un peso promedio de gónadas de 1.7 ± 1.1 g y un índice gonadal promedio de 6.38 ± 2 %, los cuales se consideran valores

normales (6 al 12 %) para erizos de mar en su medio natural en Baja California, México, destinados a la comercialización (Palleiro-Nayar *et al.*, 2008; García-Mendoza, 2015; Angwin *et al.*, 2022).

Al finalizar el cultivo, el peso gonadal de los erizos morados fue de aproximadamente 6.0 ± 2.0 g, con un índice gonadal que osciló entre el 15 y el 18 %, independientemente de la dieta suministrada. Esto podría sugerir que la inclusión de ácidos grasos omega-3 no influyó significativamente en el crecimiento gonadal del erizo morado, lo cual también coincide con lo expuesto por Lv *et al.* (2020), al reportar que el peso gonado y el índice gonadal de *S. intermedius* no fueron afectados por las dietas, a las cuales añadieron ácidos grasos omega-3 de cadena larga. Los valores obtenidos en el presente estudio también fueron similares a los reportados por García-Mendoza (2015), sobre la engorda de gónadas en erizo de mar con dietas ricas en proteínas (11.6 a 34.7 g por cada 100 g), donde se alcanzaron IG de entre 13 y 18 %, partiendo de un índice gonadal inicial del 10% y con ejemplares de entre 40 y 60 mm de DT. Los índices reportados por Cuesta-Gómez (2017) en la misma especie, con la dieta que contenía el 30 % de proteína y 42 % de carbohidratos, alcanzaron valores de 15.9 ± 0.9 % en 12 semanas (84 días) de cultivo. El autor también reportó índices gonadales de los organismos con un IG inicial de 9.33 ± 3.3 % hasta finalizar con valores de 20 ± 3.2 %, por lo que concluyó que este resultado se debe al crecimiento del 0.6 % del IG semanal. En el estudio de Cuesta-Gómez (2017), los organismos presentaron tallas superiores a los 30 mm de DT, con un valor máximo de 35 ± 3.6 mm. En contraste, los organismos del presente estudio, como se explicó en el apartado anterior, alcanzaron un DT de hasta 45 ± 4.0 mm, lo cual sugiere que el crecimiento de las gónadas y el índice gonadal (IG) varían en función del tamaño del erizo. García-Mendoza (2015) señala que los organismos de menor tamaño tienden a producir una mayor proporción de gónada, posiblemente porque sus requerimientos energéticos son menores en relación con su tamaño. Este patrón también fue observado en el presente estudio.

Para la comercialización de las gónadas de erizo de mar, es fundamental determinar su calidad, ya que esta puede influir directamente en el precio del producto y en el mercado al que se destina. Las gónadas de los erizos de alta calidad pueden alcanzar un precio final en el mercado de entre los \$53 a \$95 dólares por cada 100 g (Palleiro-Nayar, 2024, comunicación personal). La calidad de la gónada se puede evaluar a partir del tamaño del erizo, su peso, el índice gonadal, así como su composición nutricional. Sin embargo, diversos autores destacan que las características determinantes en la clasificación de calidad son el color y la textura de las gónadas (Pearce *et al.*, 2004; Palleiro-Nayar *et al.*, 2008; Tsoukalas *et al.*, 2024). Por ello, el control de la alimentación es de gran importancia para desarrollar gónadas con parámetros organolépticos deseables en calidad gonadal.

En la presente investigación, se lograron evaluar parte de los criterios propuestos por Pearce *et al.* (2002) como el color, la textura y la firmeza. En relación con el parámetro de sabor, no fue posible evaluarlo debido a la falta de un número representativo de degustadores que participaran en probar la mayoría de los organismos de los diferentes tratamientos, aunado a la dificultad de poder preservar las gónadas en fresco en una solución de aluminio (0.4 a 0.7 %) o solución salina para su posterior valoración. Al evaluar de manera visual la calidad de las gónadas, se observó que no existieron diferencias notables por la inclusión de omega 3 con respecto a los parámetros de firmeza, textura y color; por lo que se podría determinar que los ácidos grasos de la dieta no influyeron en la calidad gonadal del erizo morado (*S. purpuratus*).

En relación con la evaluación visual realizada por las personas encuestadas, los resultados mostraron que la moda varió entre los tratamientos, resultando con puntajes de 2 a 3 en los parámetros de calidad en la dieta sin inclusión de omega-3 (A), hasta registrar valores de 4 en los últimos tratamientos con mayor inclusión de omega-3. Con base en lo observado y en las encuestas realizadas (evaluadores), se podría estimar que una mayor cantidad de omega-3 en la dieta se asocia con una menor firmeza en la apariencia de las gónadas. Si bien, el aumento de ácidos grasos poliinsaturados en las reservas energéticas de los erizos de mar no afectó la función de almacenamiento de nutrientes, sí se observó que podría influir negativamente en la firmeza de las gónadas, ya que este tipo de ácidos grasos no proporciona la rigidez a la membrana que se considera deseable para su consumo. Lo anterior es importante, debido a que los ácidos grasos poliinsaturados, como los omega-3, aumentan la permeabilidad y la fluidez de las membranas celulares debido al alto grado de insaturación en su estructura (Segura, 1996; Feliu *et al.*, 2021). Cuesta-Gómez (2014 y 2017) y García-Mendoza (2015) reportaron que las gónadas de los erizos de mar mantienen su firmeza cuando son alimentados principalmente con macroalgas.

La textura de las gónadas de los erizos cultivados fue evaluada predominantemente como granulada, con valores entre 2 y 3, sin observar diferencias entre los tratamientos. Esto sugiere que, las dietas experimentales con diferente concentración de omega-3, no tuvieron un efecto sobre este parámetro. Los resultados obtenidos coinciden con lo reportado por Azad *et al.* (2011) y García-Mendoza (2015), quienes no observaron variaciones en la textura de las gónadas en función de la dieta suministrada. En ambos estudios, las gónadas fueron clasificadas como “mitades segmentadas suaves” (valor 2), de acuerdo con los criterios propuestos por Pearce *et al.* (2002). Los resultados del presente estudio y los reportados por los autores mencionados, sugieren que la textura de las gónadas no estaría determinada por la presencia de ácidos grasos omega-3 en la dieta de los erizos de mar.

La calidad de las gónadas se considera óptima cuando presentan tonalidades amarillo-anaranjada comúnmente denominada *doradas* o *gold*. En el medio natural, los erizos de mar suelen presentar esta coloración con mayor frecuencia cuando consumen sin limitación el sargazo *M. pyrifera*. En contraste, una dieta basada en una mayor proporción de algas coralinas suele asociarse con gónadas de colores más oscuros, consideradas de menor calidad. Esta diferencia podría atribuirse a los pigmentos y al contenido nutricional específico de cada tipo de alga (Agatsuma *et al.*, 2005; Palleiro-Nayar, *et al.*, 2008; Cuesta-Gómez, 2012). Por lo anterior, incorporar adecuadamente estos ingredientes en la dieta resulta fundamental si se busca obtener gónadas con una coloración óptima para su comercialización.

Al analizar las gónadas de los erizos que recibieron las dietas con las distintas concentraciones de EPA y DHA, se encontró que en todos los tratamientos se presentó una gran variabilidad de colores entre los organismos del mismo tratamiento. Por lo anterior, se decidió utilizar la moda de todos los tratamientos, que se encontraba entre las clasificaciones de la paleta de colores PANTONE, de amarillo-naranja opaco (AB) y amarillo brillante pálido (B). A pesar de obtener modas con colores óptimos para el mercado, no se puede asegurar que sea debido a la concentración de omega-3, ya que en todos los tratamientos se presentaron resultados de calidad A (amarillo-anaranjado brillante), hasta la calidad C (café-gris). En otros estudios, como los de Pearce *et al.* (2002) y García-Mendoza (2015), se evaluaron dietas formuladas con diferentes concentraciones de proteína, y se observaron variaciones en la coloración de las gónadas entre tratamientos. Sin embargo, estos trabajos concluyen que la concentración de proteína no influye directamente en el color de las gónadas, siendo los pigmentos presentes en cada dieta el factor determinante. Por su parte, Agatsuma *et al.* (2005) señalaron que la disponibilidad del alimento en el entorno, así como la disminución en el volumen gonadal, puede tener un mayor impacto en la aparición de tonalidades cafés en las gónadas, una condición que se ha vuelto más frecuente con la expansión del fenómeno de las “barreras de erizos” en los fondos marinos. El estudio de Lv *et al.* (2020), menciona que no existe una relación de los ácidos grasos poliinsaturados de cadena larga omega-3 de la dieta sobre el estándar gonadal requerido en el mercado de los erizos *S. intermedius*, lo cual coincide con los resultados obtenidos en el presente estudio con *S. purpuratus*.

Es recomendable seguir evaluando la inclusión de pigmentos en la dieta, puesto que, a concentraciones más altas de beta-caroteno de 1.2 a 1.4 %, se obtiene una buena coloración en las gónadas de los erizos morados, variando entre tonalidades de “amarillo-anaranjado café” a “amarilla pálida” y “amarillo-naranja brillante”, siendo la mejor cuando se trabaja en concentraciones de 1.2 % (Cuesta-Gómez, 2017), aunque faltaría realizar su evaluación económica para ver si su uso en dietas formuladas es redituable a nivel comercial y de producción. La inclusión de pigmentos en las dietas utilizadas en el presente estudio fue

del 0.5%, siguiendo las recomendaciones de los productores de luteína y zeaxantina (IOSA), ya que esta es la concentración recomendada en las dietas comerciales para camarón (Arreondo-Figueroa, *et al.*, 2003). Otro aspecto que se debe considerar es el procesamiento de las dietas, debido a que durante su elaboración se utilizaron temperaturas de 56 a 58 °C para el secado de los pellets, sin embargo, temperaturas superiores a 50 °C o exposiciones prolongadas al calor pueden llegar a degradar los pigmentos, los cuales son sensibles a estas temperaturas (Ahmad *et al.*, 2013; Bhat *et al.*, 2023; Lee y Demirci, 2023; Heiting, 2024). Además, los fabricantes indican que a temperaturas superiores a 65 °C podrían afectar la estabilidad del producto. Por lo anterior, se recomienda que en las futuras investigaciones se analice con mayor detalle la concentración óptima de distintos pigmentos en la dieta, así como evitar el secado prolongado a altas temperaturas.

Existe un interés particular en investigar el aumento de peso de las gónadas, ya que este órgano constituye la principal reserva de nutrientes en el erizo de mar y es de gran relevancia para su cultivo. En este sentido, los nutrientes suministrados a través de la dieta influyen en la composición proximal de las gónadas (Watts *et al.*, 2013). En los análisis proximales realizados, se observó que las concentraciones de proteína en las gónadas oscilaron entre 40.0 y 47.6 g por cada 100 g, en erizos alimentados con dietas que contenían entre 30.3 % y 34.8 % de proteína. En otros estudios con erizos morados cultivados, se han reportado porcentajes de proteína en las gónadas entre 50 % y 55 %, cuando las dietas contenían entre 11.6 y 34.7 g de proteína por cada 100 g de alimento (García-Mendoza, 2015). Asimismo, se ha observado que el contenido de proteína en gónadas secas varía entre 30.7 y 49.7 g por cada 100 g, en erizos alimentados con dietas que contenían entre 17 % y 23 % de proteína (Cuesta-Gómez, 2017). Estos porcentajes son cercanos a los obtenidos en el presente estudio.

Las concentraciones de proteína contenidas en las gónadas del erizo morado fueron altas, en comparación con lo reportado en otras especies. En el erizo rojo *S. franciscanus* se han reportado valores de 13.63 % de proteínas en las gónadas, mientras que en *S. lividus* y *S. nudus* se han encontrado concentraciones de 12.03 % y 11.1 %, respectivamente (Cuevas-Acuña *et al.*, 2019). Incluso en erizos morados silvestres, se ha reportado que las gónadas contienen concentraciones promedio de 17.7 ± 0.15 % de proteína. Estas diferencias del contenido proteico se les puede atribuir si se realizaron los análisis con muestras frescas o secas, siendo que las gónadas de los erizos morados del cultivo fueron liofilizadas para su análisis. De igual forma, también es posible que esta disminución se deba a que el alimento natural disponible en el medio natural presenta un contenido proteico inferior al de los alimentos formulados proporcionados al erizo de mar en cultivo. Además, se ha reportado que ciertos aminoácidos pueden reducir la palatabilidad del

alimento (Cuesta-Gómez, 2017), lo que refuerza la importancia de ajustar el contenido proteico en las dietas formuladas para optimizar la calidad de las gónadas de los organismos en cultivo.

En los erizos cultivados en el presente estudio, el contenido total de lípidos en las gónadas disminuyó de 24.6 % a 20.9 % al incrementar la concentración de omega-3 en la dieta. En ejemplares silvestres se han reportado valores inferiores de 9.5 % en erizos morados y 5.04 % en erizos rojos (García-Mendoza, 2015; Cuevas-Acuña *et al.*, 2019). En un estudio con dietas altas en proteínas para erizos morados, se registraron porcentajes de 11.5 % y 13.6 % de lípidos en gónadas (García-Mendoza, 2015), mientras que, Cuesta-Gómez (2017) encontró menos de 7 g de lípidos por cada 100 g. Estos resultados refuerzan la correlación positiva entre la proporción proteína/carbohidrato en la dieta y la acumulación lipídica gonadal, es decir, a mayor proteína y menor carbohidrato, más lípidos se depositan en los tejidos.

Valores similares a los obtenidos en el presente estudio fueron reportados por Zhou *et al.* (2018) en muestras de gónadas secas de *Glyptocidaris crenularis* (37.65 %), *S. intermedius* (22.7 %) y *S. nudus* (24.31 %). Para formular dietas isolípídicas con un 8 % de lípidos, las raciones con menor contenido de ácidos grasos poliinsaturados (AGPI) fueron compensadas con mayores proporciones de grasas saturadas y monoinsaturadas. Esta estrategia favorece el almacenamiento lipídico, como se ha observado en peces marinos, donde los lípidos crudos se utilizan prioritariamente como fuente de energía, mientras que los AGPI tienden a almacenarse de manera más eficiente (Barreto *et al.*, 2017). Este mecanismo podría explicar la elevada retención de ácidos grasos poliinsaturados en los gametos de los erizos evaluados en el presente estudio.

Los valores de cenizas encontrados en las gónadas del erizo morado alimentado con dietas que contenían diferentes porcentajes de inclusión de omega-3 oscilaron entre 3.4 y 5.3 % de la composición total. Resultados similares fueron reportados por García-Mendoza (2015), con porcentajes de cenizas entre 4.3% y 5.9 %, así como en el estudio de Cuevas-Acuña *et al.* (2019), donde se obtuvieron valores que variaron entre 3.05 % y 7.1 %. Asimismo, Cuesta-Gómez (2017) observó la variación en la cantidad de cenizas de 0.3 a 6.3 g por cada 100 g de muestra, lo que sitúa los resultados del presente estudio dentro de ese intervalo. Se ha reportado que el porcentaje de cenizas puede aumentar durante la gametogénesis, debido a los requerimientos de sales inorgánicas para la formación de células y tejidos (Greenfield *et al.*, 1958). Por lo anterior, es posible que las diferencias observadas entre los estudios antes mencionados estén influenciadas por la época del año en la cual a los erizos se les aplicó la eutanasia. En el presente estudio, los organismos fueron sacrificados durante la temporada reproductiva (abril) reportada para organismos silvestres en esta zona geográfica (febrero a mayo) según Palleiro-Nayar *et al.* (2013).

En relación con el contenido del extracto libre de nitrógeno (ELN) en las gónadas de los erizos, García-Mendoza (2015) reportó valores que oscilaron entre 24.9 y 30.7 %, considerados relativamente altos. En el presente estudio, los valores obtenidos fueron similares (26.4 a 30.3 %), lo que sugiere una elevada concentración de carbohidratos en las gónadas, particularmente de glucógeno, una forma común de almacenamiento energético en los erizos de mar. No obstante, al analizar las gónadas de organismos provenientes del medio silvestre, se observó un incremento notable en el contenido de ELN, alcanzando hasta un 70.9 %. Esta diferencia podría atribuirse a una dieta natural rica en macroalgas, las cuales aportan valores de hasta 48 % de carbohidratos en el alga seca (Vega-Villasante *et al.*, 2006; Pérez-Alva *et al.*, 2024), favoreciendo su acumulación en el tejido gonadal.

Los lípidos y ácidos grasos poliinsaturados son nutrientes que se consideran esenciales y de valor nutricional para los erizos de mar, debido a que influyen en el crecimiento y la reproducción de estos organismos en condiciones de cautiverio (Kabeya *et al.*, 2017). Por lo anterior, el presente estudio evaluó el efecto de los ácidos grasos omega-3 en *S. purpuratus*, con enfoque en factores clave como el crecimiento en peso, diámetro de testa y los parámetros de calidad gonadal. Los resultados de este tipo de estudios se podrían aplicar en el futuro para el desarrollo del cultivo de la especie.

Antes de iniciar con el cultivo de erizo en el sistema de recirculación, se identificaron los distintos ácidos grasos en la dieta, los cuales se catalogaron en saturados, monoinsaturados y poliinsaturados. En las dietas E (2 %) y F (4 %), los ácidos grasos monoinsaturados (MUFA) se mantuvieron en baja concentración, debido a que al aumentar la proporción de omega-3 se redujeron otras fuentes lipídicas para conservar la dieta isolipídica, similar a lo reportado por Lv *et al.* (2020), quienes argumentan como los ácidos grasos saturados tienden a disminuir al incrementar los LC-PUFA. El aceite de oliva utilizado en la dieta aportó ácidos grasos monoinsaturados, principalmente el ácido oleico (entre el 62 y 82 %), además del ácido linoleico (entre el 2 y 16 %) y linolénico (entre 0.6 y 1.7 %) (Carreto *et al.*, 2002; Schwingshackl y Hoffmann, 2014). En el presente trabajo se registró un aumento de ácidos grasos tipo C18 en las gónadas del erizo morado, probablemente derivado de la lecitina y aceite de soya, los cuales favorecen la síntesis de fosfolípidos y elevan el contenido de ácido linoleico, palmítico y oleico en las gónadas de los organismos alimentados con las dietas (Pino, 2021), y que pueden funcionar como precursores para la síntesis *de novo* de ácidos grasos omega-3 de cadena larga.

En los erizos morados alimentados con las distintas dietas enriquecidas con omega-3, el EPA (C20:5n3) y DHA (C22:6n3) se acumularon progresivamente en las gónadas conforme aumentó su proporción en la dieta. Es importante señalar que, en el tratamiento control negativo (dieta formulada con harina de

pescado desgrasada), en el cual el omega-3 no era detectable, se registró un porcentaje de EPA en las gónadas de los erizos. Este resultado sugiere la posible biosíntesis de EPA a partir de su precursor el ácido alfa linolénico (C18:3n3) (Anexo 2, Fig. 8), el cual fue obtenido de la dieta por la inclusión del aceite de oliva y la lecitina de soya. Zhou *et al.* (2018) y Peng *et al.* (2025) han reportado en *S. intermedius*, *H. pulcherrimus*, *S. nudus* y *G. crenularis* la capacidad de desaturar y elongar el ácido α -linolénico (C18:3n-3) hasta ácido eicosapentaenoico (EPA; C20:5n3), al igual que otros invertebrados marinos. Este proceso estaría mediado por elongasas y desaturasas como Elovl2, Elovl5, FadsA y FadsC2 (Tegner y Dayton, 1981; Monroig *et al.*, 2013; Tenuzzo *et al.*, 2017), así como por bacterias del género *Sulfurimonas* (Lv *et al.*, 2020). Bell *et al.* (2001) demostraron, mediante el uso de un trazador deuterado, que *Psammechinus miliaris* es capaz de elongar y desaturar C18:3n3 en C20:5n3, aunque con una tasa baja de conversión del 0.009 % del D5-18:3n3 ingerido. De forma similar, García-Chávez (2012) estimó que los erizos *S. purpuratus* y *Arbacia incisa*, al igual que *P. miliaris*, podrían poseer la enzima Δ 5-desaturasa, favoreciendo así procesos de biosíntesis de ácidos grasos poliinsaturados.

Diversos autores han sugerido que los erizos de mar poseen la capacidad de biosintetizar ácidos grasos de cadena larga, debido a su habilidad para elongar y desaturar AGPI mediante la acción de enzimas específicas (González-Durán, 2005; García-Chávez, 2012; Monroig *et al.*, 2013; Kabeya *et al.*, 2017). Esto indicaría que no requieren la inclusión de ácidos grasos de cadena larga como C20:4n6, C20:5n3 y C22:6n3 en la dieta para su crecimiento, a diferencia de los reproductores. En el presente estudio, no se puede asegurar que todos los ácidos grasos identificados en las gónadas de los erizos de mar provengan exclusivamente de la dieta, ya que existe la posibilidad de que una proporción mínima de ácidos grasos poliinsaturados haya sido retenida desde el medio natural. Por ello resulta importante realizar análisis de biología molecular que permita investigar a profundidad la actividad de las enzimas elongasas y desaturasas presentes en los equinodermos marinos. Aun así, es relevante destacar que el erizo puede realizar la síntesis *de novo* de ácidos grasos como el C20:5n3 (EPA) a partir de precursores obtenidos en la dieta. Aunque estos ácidos grasos no sean estrictamente esenciales para el crecimiento, cumplen funciones fisiológicas importantes en las gónadas, tales como formar parte de la estructura de las membranas celulares o actuar como precursores de prostanoideos (Bell *et al.*, 2001). Por lo tanto, una adecuada inclusión de ácidos grasos omega-3 en la dieta favorecería una acumulación de estos lípidos en las gónadas de *S. purpuratus*.

En los erizos morados alimentados con diferentes dietas que contenían distintas concentraciones de ácidos grasos omega-3, se observó un aumento en la acumulación de AG's en las gónadas, como los ácidos grasos C18, C20 y C22, en comparación con los erizos evaluados en la biometría inicial. Además, se registró

un incremento en la concentración de ácido eicosapentaenoico (EPA; C20:5n-3), aunque esta fue menor que la observada en las gónadas de los organismos recolectados del medio natural. Estos resultados contrastan con lo reportado por Lv *et al.* (2020), quienes encontraron que los organismos (*S. intermedius*) alimentados con dietas formuladas presentaron mayores cantidades de EPA en sus tejidos en comparación con aquellos alimentados con algas provenientes del entorno natural. Una posible explicación para este hallazgo es que, al presentar las gónadas cultivadas un menor tamaño y peso en comparación con las silvestres, las concentraciones de algunos nutrientes pueden estar más elevadas en proporción relativa, aunque almacenadas en un volumen gonadal menor. También puede influir que el tipo de algas que conformaron su alimentación, y las concentraciones que tengan de EPA y DHA, por lo que la distribución geográfica y nutrientes podría ser menor para *S. intermedius*.

En un estudio realizado con *Echinus esculentus*, se reportó una alta concentración de ácidos grasos esenciales, destacando el ácido eicosapentaenoico (C20:5n3) con un 17.1 % entre los ácidos grasos poliinsaturados (AGPI), seguido por el ácido docosahexaenoico (C22:6n3) con un 9.6 %, así como sus precursores. Estos resultados sugieren que la acumulación de ácidos grasos puede variar entre diferentes especies de erizos de mar, dependiendo de su alimentación (Tsoukalas *et al.*, 2024). Asimismo, los autores informaron que las gónadas de *E. esculentus* almacenadas en frío presentaron la mayor proporción de AGPI (46.5 ± 2.7 %), en comparación con las gónadas liofilizadas de *S. purpuratus* analizadas en el presente estudio, en las cuales se observó una mayor proporción de ácidos grasos saturados (entre 44 a 56 mg x g). Tsoukalas *et al.* (2024) también reportaron una disminución significativa en el contenido de ácidos grasos poliinsaturados atribuida a su susceptibilidad a la oxidación durante el almacenamiento prolongado. Este podría haber influido en los resultados obtenidos en el presente estudio, debido a que las muestras fueron liofilizadas después de haber permanecido una semana en almacenamiento en frío en un ultracongelador.

La información obtenida en el presente estudio indica que no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos en cuanto a las concentraciones de ácido eicosapentaenoico (EPA, C20:5n3) y ácido docosahexaenoico (DHA, C22:6n3), en relación con la calidad gonadal y los análisis bioquímicos realizados. No obstante, se observó una tendencia al incremento en el contenido de ácidos grasos en las gónadas de *S. purpuratus*, lo cual podría representar un beneficio nutricional potencial para el consumo humano de estos productos. En general, los erizos de mar, independientemente del tratamiento recibido, se perfilan como una fuente relevante de EPA y DHA, destacando su valor como alimento funcional.

Capítulo 5. Conclusiones

No se observaron diferencias en el contenido de proteínas y ELN en las gónadas del erizo morado *S. purpuratus* alimentado con dietas formuladas que contenían diferentes porcentajes de ácidos grasos omega-3, C (0.5%), D (1%), E (2%) y F (4%), comparativamente con las dietas no enriquecidas A (0-) y B (0+). En cuanto a los lípidos totales en gónadas, se observó su disminución en función del incremento de los ácidos grasos omega-3 en la dieta, mientras que la concentración de cenizas (minerales) aumentó junto con la inclusión de EPA y DHA en la dieta.

Las gónadas del erizo morado alimentado con dietas formuladas con diferentes niveles de inclusión de ácidos grasos omega-3 C (0.5%), D (1%), E (2%) y F (4%), presentaron una calidad gonadal (firmeza, textura y coloración) similar a la obtenida en los organismos alimentados con dietas no enriquecidas A (0-) y B (0+). A pesar de ello, falta un mayor número de resultados para comprobar y asegurar esta afirmación.

Los erizos alimentados con las diferentes dietas enriquecidas con omega-3, C (0.5%), D (1%), E (2%) y F (4%), no presentaron diferencias significativas en la supervivencia, el crecimiento, ni en el índice gonadal. Por lo tanto, los ácidos grasos C20:5n3 (EPA) y C22:6n3 (DHA) no influyeron en los parámetros productivos de *S. purpuratus*.

Las gónadas de los erizos alimentados con dietas formuladas y enriquecidas con omega-3, C (0.5%), D (1%), E (2%) y F (4%), mostraron un aumento en los ácidos grasos poliinsaturados EPA (C20:5n3) y DHA (C22:6n3), en función del incremento en la inclusión de omega-3 en la dieta. Esto podría sugerir que los organismos acumularon en sus gónadas estos ácidos grasos provenientes de la dieta.

5.1 Recomendaciones

Se recomienda realizar más investigaciones orientadas a identificar ingredientes o formulaciones de dietas que puedan promover un mayor crecimiento del diámetro de testa (DT) en menor tiempo. Esto es relevante, ya que un mayor tamaño de testa se asocia con una mayor capacidad de almacenamiento gonadal en el erizo morado (*Strongylocentrotus purpuratus*). Asimismo, es importante determinar las tallas máximas de DT que pueden alcanzarse bajo condiciones de cultivo controladas.

Es necesario profundizar en el estudio de los pigmentos presentes en la dieta, con el fin de lograr coloraciones deseables en las gónadas de los erizos. Se recomienda enfocar estos estudios en la identificación de los tipos de pigmentos y las concentraciones óptimas requeridas para alcanzar las características de coloración establecidas para su comercialización.

Se sugiere desarrollar investigaciones sobre la expresión de enzimas y los mecanismos de biosíntesis de ácidos grasos en erizos de mar, prestando especial atención al papel de la microbiota en estos procesos metabólicos.

Se recomienda evaluar la estabilidad de las dietas formuladas en el agua, así como optimizar procesos de peletización que eviten la degradación térmica de pigmentos y otros compuestos bioactivos sensibles al calor.

Se propone el desarrollo de sistemas de cultivo en tierra que sean de bajo mantenimiento y que consideren el comportamiento natural del erizo morado, como el raspado de superficies adheridas, para favorecer su bienestar y crecimiento en condiciones controladas.

Se considera pertinente establecer un protocolo estandarizado para la evaluación de la calidad gonadal relacionada con el parámetro de color mediante escalas RGB, y su comparación con referencias visuales asociadas a diferentes niveles de calidad comercial.

Se recomienda usar una fuente de lípidos más económica que no sea ácidos grasos omega-3, para la formulación de la dieta, además de que se ha comprobado que los erizos pueden utilizar otros ácidos grasos para la biosíntesis de C20:5n3 (EPA) por lo que puede presentar ácidos grasos esenciales para el consumo humano y tener un mejor efecto en la firmeza gonadal aparente.

Se recomienda para experimentos futuros realizar ensayos de lixiviación de las dietas, así como la recolecta y pesaje del alimento no consumido, para poder tener valores más precisos de la TCA de las dietas formuladas para el erizo morado.

Literatura citada

- Agatsuma, Y., Sato, M., & Taniguchi, K. (2005). Factors causing brown-colored gonads of the sea urchin *Strongylocentrotus nudus* in northern Honshu, Japan. *Aquaculture*, 249(1–4), 449–458. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2005.04.054>
- Ahmad, F. T., Asenstorfer, R. E., Soriano, I. R., & Mares, D. J. (2013). Effect of temperature on lutein esterification and lutein stability in wheat grain. *Journal of Cereal Science*, 58(3). <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2013.08.004>
- Andrew, N. L. (1986). The interaction between diet and density in influencing reproductive output in the echinoid *Evechinus chloroticus* (Val.). *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 97(1). [https://doi.org/10.1016/0022-0981\(86\)90068-7](https://doi.org/10.1016/0022-0981(86)90068-7)
- Angwin, R. E., Hentschel, B. T., & Anderson, T. W. (2022). Gonad enhancement of the purple sea urchin, *Strongylocentrotus purpuratus*, collected from barren grounds and fed prepared diets and kelp. *Aquaculture International*, 30(3), 1353–1367. <https://doi.org/10.1007/s10499-022-00863-1>
- Arredondo, F., & Mungaray, A. (1997). Análisis de redes productivas en la pesquería del erizo de mar (*Strongylocentrotus franciscanus*) en Baja California. *Frontera Norte*, 9(17), 75–92. <https://pdfs.semanticscholar.org/53ba/f4ac84bb8a1acfabae434ef3f5c526748359.pdf>
- Arreondo-Figueroa, J.L., Pedroza-Islas, R., Ponce-Palafox, J.T., & Vernon-Carter, E.J. (2003). Pigmentation of Pacific White Shrimp (*Litopenaeus vannamei*, Boone 1931) with esterified and saponified carotenoids from red chili (*Capsicum annum*) in comparison to astaxanthin. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 2(2). <https://www.redalyc.org/pdf/620/62020207.pdf>
- Azad, A. K., Pearce, C. M., & McKinley, R. S. (2011). Effects of diet and temperature on ingestion, absorption, assimilation, gonad yield, and gonad quality of the purple sea urchin (*Strongylocentrotus purpuratus*). *Aquaculture*, 317(1–4), 187–196. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2011.03.019>
- Barker, M. F. (2015). Sea Urchin Aquaculture in New Zealand. *Echinoderm Aquaculture*, Wiley, 245–262. <https://doi.org/10.1002/9781119005810.ch11>
- Barreto, F., Focken, U., D’Abramo, L., & Viana, M. (2017). Metabolism of *Seriola lalandi* during starvation as revealed by fatty acid analysis and compound-specific analysis of stable isotopes within amino acids. *PLoS ONE*, 12(1). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0170124>
- Basch, L. V., & Tegner, M. J. (2007). Reproductive responses of purple sea urchin (*Strongylocentrotus purpuratus*) populations to environmental conditions across a coastal depth gradient. *Bulletin of Marine Science*, 81(2), 255–282. <https://www.researchgate.net/publication/233587511> [Reproductive responses of purple sea urchin *Strongylocentrotus purpuratus* populations to environmental conditions across a coastal depth gradient](https://www.researchgate.net/publication/233587511)
- Beas Luna, R. (2005). *Dinámica poblacional del erizo morado *Strongylocentrotus purpuratus* en el borde entre un manto de sargazo y un desierto de erizos en la península de Baja California, México*. [Tesis de Maestría, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California]. Repositorio Institucional <https://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1007/1530/1/168411.pdf>

- Beas-Luna, R., Lorda, J., Malpica-Cruz, L., Montañó-Moctezuma, G., Zepeda-Domínguez, J. A., Vaca-Rodríguez, J. G., & Abadía-Cardoso, A. (2019). *Bosques de macroalgas en arrecifes templados*. *Ecosistemas Marinos*, 1(7) <https://mex-cal.org/wp-content/uploads/2019/06/7-Bosques-de-Macroalgas-en-Arrecifes-Templados.pdf>
- Bell, M. v., Dick, J. R., & Kelly, M. S. (2001). Biosynthesis of Eicosapentaenoic Acid in the Sea Urchin *Psammechinus miliaris*. *Lipids*, 1(36), 79–82. AOCs. <https://doi.org/10.1007/s11745-001-0671-2>
- Belmonte Romo, A.E. (2025). Evaluación de respuestas fisiológicas en *Totoaba macdonaldi* alimentada con dietas bajas en ácido araquidónico.[Tesis de Maestría en Ciencias, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California]. Repositorio Institucional. https://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1007/4254/1/tesis_Aldo%20Emmanuel%20Belmonte%20Romo_2025.pdf
- Bhat, I., Jose, N. M., & Mamatha, B. S. (2023). Oxidative stability of lutein on exposure to varied extrinsic factors. *Journal of Food Science and Technology*, 60(3). <https://doi.org/10.1007/s13197-022-05430-3>
- Booolootian, R. A. (1964). Die Bedeutung abiotischer Faktoren fiir die Gonaden-entwicklung und Fortpflanzung mariner Evertebraten' Helgolaænder wiss. *Meeresuntersuch. Biological Bulletin*, 10(3), 118-139. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/BF01626102.pdf>
- Bustos R., E., & Olave M., S. (2001). Manual: El cultivo del Erizo (*Loxechinus albus*). Instituto de Fomento Pesquero. *División de Acuicultura*. 1-22. https://www.ifop.cl/wp-content/contenidos/uploads/biblioteca/libros_digitales/manual_erizo.pdf
- Cárcamo, P. F. (2015). Effects of food type and feeding frequency on the performance of early juveniles of the sea urchin *Loxechinus albus* (Echinodermata: Echinoidea): Implications for aquaculture and restocking. *Aquaculture*, 436, 172–178. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2014.10.045>
- Carlton, J. T. (2007). Echinodermata . In *The Light and Smith Manual. Intertidal Invertebrates from Centra California to Oregon*. (4ta ed.) University Of California Press, 913-948. <https://doi.org/10.2307/ij.5973107.40>
- Carreto, Ma. V., Cuervo, Ma. P., Dirienzo, Ma. G., & di Vito, Ma. V. (2002). Aceite de Oliva: Beneficios en la salud. *Invenio*, 5(8), 141-149. <https://www.redalyc.org/pdf/877/87750812.pdf>
- Castro-González, M. I., Carrillo-Dominguez, S., & Perez-Gil, F. (1994). Composición química de *Macrocystis pyrifera* (Sargazo gigante) recolectada en verano e invierno y su posible empleo en alimentación animal. *Ciencias Marinas*, 20(1), 33–40. <http://www.cienciasmarinas.com.mx/index.php/cmarinas/article/viewFile/955/876>
- Cook, E., Kelly, M., & McKenzie, J. D. (1998). Somatic and gonadal growth of the sea urchin *Psammechinus miliaris* (Gmelin) fed artificial salmon feed compared with a macroalgal diet. *J Shellfish Res*, 17(5), 1549-1555. <https://pure.uhi.ac.uk/en/publications/somatic-and-gonadal-growth-of-the-sea-urchin-psammechinus-miliari>
- Cota Villavicencio, A., Aguilar Montero, D., Romero Martínez, M., Solana Sansores, R., & Uribe Osorio, F. (1996). Análisis de la pesquería del erizo rojo (*Strongylocentrotus franciscanus*) y morado (*S. purpuratus*) en la costa noroccidental de la Baja California. *Ciencia Pesquera*, 12, 68–75. <https://www.inapesca.gob.mx/portal/documentos/publicaciones/cienciapesquera/CP12/CP12->

[11.pdf](#)

- Cuesta-Gómez, D. M., & Sánchez-Saavedra, M. del P. (2014). Increased gonad growth of the purple sea urchin (*Strongylocentrotus purpuratus*) fed the giant kelp (*Macrocystis pyrifera*) and the sea lettuce (*Ulva lactuca*) enriched with nutrients. *Aquaculture Research*, 47(7), 2150–2163. <https://doi.org/10.1111/are.12669>
- Cuesta-Gómez, D. M. (2017). *Evaluación del nivel de los macronutrientes en dietas formuladas para el erizo morado Strongylocentrotus purpuratus y su efecto en el índice gonádico y la calidad gonadal*. [Tesis de Doctorado en Ciencias, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California]. Repositorio Institucional. https://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1007/1296/1/tesis_Cuesta_G%c3%b3mez_Diana_Mar%c3%ada_11_mayo_2017.pdf
- Cuevas-Acuña, D. A., Gracia-Valenzuela, M. H., Santacruz-Ortega, H. C., Valdez-Melchor, R. G., & Arias-Moscoso, J. L. (2019). Composición química, contenido de proteína, aminoácidos y morfología de gónadas de erizo de mar (*Strongylocentrotus franciscanus*). *Revista de Ciencias Biológicas y de La Salud*, 21(3). <https://doi.org/10.18633/biotecnia.v21i3.1015>
- Dolinar, D., & Edwards, M. (2021a). The metabolic depression and revival of purple urchins (*Strongylocentrotus purpuratus*) in response to macroalgal availability. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 545, 151646. <https://doi.org/10.1016/J.JEMBE.2021.151646>
- Dolinar, D., & Edwards, M. (2021b). The zombification and reanimation of purple urchins (*Strongylocentrotus purpuratus*) in response to food availability. *Research Square*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-452705/v1>
- Durazo, E., Cruz, A. C., López, L. M., Lazo, J. P., Drawbridge, M., & Viana, M. T. (2010). Effects of digestible protein levels in isonitrogenous diets on growth performance and tissue composition of juvenile *Atractoscion nobilis*. *Aquaculture Nutrition*, 16(1), 54–60. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2095.2008.00640.x>
- Ebert, T. A. (1968). Growth Rates of the Sea Urchin *Strongylocentrotus Purpuratus* Related to Food Availability and Spine Abrasion. *Ecology*, 49(6), 1075–1091. <https://doi.org/10.2307/1934491>
- Eddy, S. D., Brown, N. P., & Kling, A. L. (2012). Growth of Juvenile Green Sea Urchins, *Strongylocentrotus droebachiensis*, Fed Formulated Feeds with Varying Protein Levels Compared with a Macroalgal Diet and a Comercial Abalone Feed. *Journal of the World Aquaculture Society*, 43(2). <https://umaine.edu/cooperative-aquaculture/wp-content/uploads/sites/75/2016/04/Article-Proof.pdf>
- Elnor, R. W., & Vadas, R. L. (1990). Inference in Ecology: The Sea Urchin Phenomenon in the Northwestern Atlantic. *The American Naturalist*, 136 (1). 108-125. <https://www.jstor.org/stable/2556348>
- Epherra, L. (2010). *Ciclo bioquímico del erizo verde Arbacia dufresnii (Blainville, 1825), en costas del Golfo Nuevo, Patagonia*. [Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco]. Red Iberoamericana de Equinodermos. <http://rediberoamericanaequinodermos.com/wp-content/uploads/2015/09/Epherra+2010+ciclo+bioqui+Arbacia+dufresnii+Patagonia+UNPSJB+Lic.c ompressed.pdf>
- Epherra, L., Martelli, A., Morsan, E. M., & Rubilar, T. (2017). Parámetros poblacionales del erizo de mar

- Arbacia dufresnii* (Arbacioida, Arbaciidae) en golfos norpatagónicos invadidos por el alga *Undaria pinnatifida* (Laminariales, Alariaceae). *Revista de Biología Tropical*, 65. https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/43891/CONICET_Digital_Nro.24652339-eab2-4706-85eb-bb8fc038d3a7_A.pdf?sequence=2&isAllowed=y
- Feliu, M. S., Fernández, I., & Slobodianik, N. (2021). Importancia de los ácidos grasos omega 3 en la salud. *Actualización en Nutrición*, 22(1). <http://dx.doi.org/10.48061/SAN.2021.22.1.25>
- Filbee-Dexter, K., & Scheibling, R. E. (2014). Sea urchin barrens as alternative stable states of collapsed kelp exosystems. *Marine Ecology Progress Series*, 1–25. <https://doi.org/10.3354/meps10573>
- Garcés, M., Rubilar, T., Cledon, M., & Sequeiros, C. (2024). Temporal dynamics of bacterial populations in recirculating aquaculture systems for sea urchin production. *Revista De Biología Tropical*, 72(1). <https://doi.org/10.15517/rev.biol.trop.v72iS1.58882>
- García-Chávez, J. H. (2012). *Efecto de la temperatura sobre la síntesis y acumulación de ácidos grasos en juveniles de erizo morado Strongylocentrotus purpuratus y erizo negro Arbacia incisa* [Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Baja California]. Repositorio Institucional. <https://repositorioinstitucional.uabc.mx/server/api/core/bitstreams/efa9c354-3b98-4564-9d06-dabbc7bc8a71/content>
- García Mendoza, M. E. (2015). *Evaluación de la respuesta productiva del erizo morado (Strongylocentrotus purpuratus) alimentado con dietas formuladas ricas en proteína para la engorda de gónada*. [Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma de Baja California]. Repositorio Institucional. <https://repositorioinstitucional.uabc.mx/bitstreams/6717537b-cb7f-4d3b-9cdb-1afce97de735/download>
- García, O. (2022, June 29). Emprenden engorda de erizo morado con objetivos sociales y ambientales: SEPESCA - Diario Tijuana. *Diario Tijuana*. <https://diariotijuana.info/2022/06/emprenden-engorda-de-erizo-morado-con-objetivos-sociales-y-ambientales-sepesca>
- Garrido Sanahuja, M. J. (2003). *Contribución al conocimiento de Diadema antillarum Philippi 1845 , en Canarias*. [Tesis de doctorado, Universidad de las palmas de Gran Canaria]. Red Iberoamericana de Equinodermos. <http://rediberoamericanaequinodermos.com/wp-content/uploads/2015/09/Garrido-2003-Conocimiento-Diadema-Canarias-ULP-PHD.pdf>
- George, S. B., Lawrence, J. M., Lawrence, A. L., Smiley, J., & Plank, L. (2001). Carotenoids in the adult diet enhance egg and juvenile production in the sea urchin *Lytechinus variegatus*. *Aquaculture*, 199(3–4), 353–369. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(01\)00578-6](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(01)00578-6)
- Gómez Gómez, A. (2015). *Condiciones físicas y comunidades bentónicas en los bosques de Macrocystis pyrifera y los arrecifes rocosos en el norte de Baja California, México* [Tesis de Maestría, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California]. Repositorio Institucional. <https://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1007/1534/1/240681.pdf>
- Gonor, J. J. (1973). Reproductive cycles in oregon populations of the echinoid, *Strongylocentrotus purpuratus* (Stimpson). I. Annual gonad growth and ovarian gametogenic cycles. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 12(1). [https://doi.org/10.1016/0022-0981\(73\)90037-3](https://doi.org/10.1016/0022-0981(73)90037-3)
- González-Durán, E. (2005). Biología y Metabolismo de los Erizos de Mar. *Boletín Informativo JAINA en línea*. 15. 1-7.

https://www.researchgate.net/publication/330970505_Biologia_y_Metabolismo_del_erizo_de_mar

- Greenfield, L., Giese, A. C., Farmanfarmanian, A., & Boolootian, R. A. (1958). Cyclic biochemical changes in several echinoderms. *Journal of Experimental Zoology*, 139(3). <https://doi.org/10.1002/jez.1401390308>
- Heiting, G. (2024). Luteína y zeaxantina: Beneficios para los ojos y la vista. *Todo sobre visión, Nutrición*. <https://www.allaboutvision.com/Es/Cuidado-de-Ojos/Nutricion-Ocular/Luteina/>
- Jangoux, M., & Lawrence, J. M. (1982). Echinoderm Nutrition. CRC Press <https://doi.org/10.1201/9781003078920>
- Jong-Westman, M. de, March, B. E., & Carefoot, T. H. (1995a). The effect of different nutrient formulations in artificial diets on gonad growth in the sea urchin *Strongylocentrotus droebachiensis*. *Canadian Journal of Zoology*, 73(8). <https://doi.org/10.1139/z95-177>
- Jong-Westman, M. de, Qian, P.-Y., March, B. E., & Carefoot, T. H. (1995b). Artificial diets in sea urchin culture: effects of dietary protein level and other additives on egg quality, larval morphometries, and larval survival in the green sea urchin, *Strongylocentrotus droebachiensis*. *Canadian Journal of Zoology*, 73(11). <https://doi.org/10.1139/z95-245>
- Kabeya, N., Sanz-Jorquera, A., Carboni, S., Davie, A., Oboh, A., & Monroig, O. (2017). Biosynthesis of polyunsaturated fatty acids in sea urchins: Molecular and functional characterisation of three fatty acyl desaturases from *Paracentrotus lividus* (Lamarck 1816). *PLoS ONE*, 12(1), 1–15. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0169374>
- Kalachev, A. V., & Yurchenko, O. V. (2017). Microautophagy in nutritive phagocytes of sea urchins. *Protoplasma*, 254(1), 609–614. <https://doi.org/10.1007/s00709-016-0963-1>
- Kelly, M. S., Hughes, A. D., & Cook, E. J. (2013). Chapter 22- *Psammechinus miliaris* Lawrence, J.M. (Ed) Developments in Aquaculture and Fisheries Science. Elsevier, 38, 329–336. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-396491-5.00022-8>
- Lawrence, J. M., Olave, S., Otaiza, R., Lawrence, A. L., & Bustos, E. (1997). Enhancement of Gonad Production in the Sea Urchin *Loxechinus albus* in Chile Fed Extruded Feeds. *Journal of the World Aquaculture Society*, 28(1). <https://doi.org/10.1111/j.1749-7345.1997.tb00966.x>
- Lawrence, J. M. L. & Lawrence, A. L. (2003). Importance Status and Future Research Needs for Formulated Feeds for Sea Urchin Aquaculture. Lawrence & Olave (Eds), *Sea Urchins, Fisheries and Ecology*. 275-276. DEStech Publications. https://www.ifop.cl/wp-content/contenidos/uploads/biblioteca/libros_digitales/sea_urchin.pdf
- Lawrence, J. M. (Ed.). (2007). *Sea Urchins: Biology and Ecology*. (3^a ed). Developments in aquaculture and fisheries science.
- Lee, C.-C., & Demirci, M. (2023). Zeaxanthin. Sources, Properties and Benefits. *In Handbook of Food Bioactive Ingredients*, Springer Nature Link 1–34. https://www.researchgate.net/profile/Chi-Ching-Lee/publication/369979291_Zeaxanthin_Sources_Properties_and_Benefits/links/6597d0526f6e450f19cbc734/Zeaxanthin-Sources-Properties-and-Benefits.pdf

- Lourenço, S., Cunha, B., Raposo, A., Neves, M., Santos, P. M., Gomes, A. S., Tecelão, C., Ferreira, S. M. F., Baptista, T., Gonçalves, S. C., & Pombo, A. (2021). Somatic growth and gonadal development of *Paracentrotus lividus* (Lamarck, 1816) fed with diets of different ingredient sources. *Aquaculture*, 539, 736589. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2021.736589>
- Ling, S. D., Scheibling, R. E., Rassweiler, A., Johnson, C. R., Shears, N., Connell, S. D., Salomon, A. K., Norderhaug, K. M., Pérez-Matus, A., Hernández, J. C., Clemente, S., Blamey, L. K., Hereu, B., Ballesteros, E., Sala, E., Garrabou, J., Cebrian, E., Zabala, M., Fujita, D., & Johnson, L. E. (2015). Global regime shift dynamics of catastrophic sea urchin overgrazing. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 370(1659), 1–10. <https://doi.org/10.1098/rstb.2013.0269>
- Lv, D., Zhang, F., Ding, J., Chang, Y., & Zuo, R. (2021). Effects of dietary n-3 LC-PUFA on the growth performance, gonad development, fatty acid profile, transcription of related genes and intestinal microflora in adult sea urchin (*Strongylocentrotus intermedius*). *Aquaculture Research*, 52(4), 1431–1441. <https://doi.org/10.1111/are.14997>
- McBride, S. C., Pinnix, W. D., Lawrence, J. M., Lawrence, A. L., & Mulligan, T. M. (1997). The Effect of Temperature on Production of Gonads by the Sea Urchin *Strongylocentrotus franciscanus* Fed Natural and Prepared Diets. *Journal of the World Aquaculture Society*, 28(4). <https://doi.org/10.1111/j.1749-7345.1997.tb00282.x>
- McBride, S. (2004). Comparison of gonad quality factors: color, hardness and resilience, of *Strongylocentrotus franciscanus* between sea urchins fed prepared feed or algal diets and sea urchins harvested from the Northern California fishery. *Aquaculture*, 233(1–4), 405–422. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2003.10.014>
- McBride, S. C. (2005). Sea urchin Aquaculture. *American Fisheries Society Symposium*, (46), 179–208. https://www.researchgate.net/publication/285928980_Sea_urchin_aquaculture
- Medellín-Ortiz, A., Montañó-Moctezuma, G., Álvarez-Flores, C., Santamaría-del-Ángel, E., García-Nava, H., Beas-Luna, R., & Cavanaugh, K. (2022). Understanding the impact of environmental variability and fisheries on the red sea urchin population in Baja California. *Frontiers in Marine Science*, 9. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.987242>
- Melis, R., Ceccherelli, G., Piazzzi, L., & Rustici, M. (2019). Macroalgal forests and sea urchin barrens: Structural complexity loss, fisheries exploitation and catastrophic regime shifts. *Ecological Complexity*, 37, 32–37. <https://doi.org/10.1016/j.ecocom.2018.12.005>
- Monroig, Ó., Tocher, D. R., & Navarro, J. C. (2013). Biosynthesis of polyunsaturated fatty acids in marine invertebrates: Recent advances in molecular mechanisms. *In Marine Drugs*, 11(10), 3998–4018. <https://doi.org/10.3390/md11103998>
- Morris, R. H., Abbott, D. P., & Harderlie, E. C. (1980). *Intertidal invertebrates of California*. Stanford University Press. 90-197. <https://www.vliz.be/imisdocs/publications/ocrd/263430.pdf>
- Nichols, K. D., Segui, L., & Hovel, K. A. (2015). Effects of predators on sea urchin density and habitat use in a southern California kelp forest. *Marine Biology*, 162(6), 1227–1237. <https://doi.org/10.1007/s00227-015-2664-2>
- Osovitz Christopher J. & Hofmann Gretchen E. (2005). Thermal history-dependent expression of the *hsp70* gene in purple sea urchins: Biogeographic patterns and the effect of temperature acclimation,

Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, Elsevier, 327(2).
<https://doi.org/10.1016/j.jembe.2005.06.011>

- Palleiro-Nayar, J. S., Salgado-Rogel, M. D. L., Aguilar-Montero, D., & Romero-Martínez, M. (n.d.). Análisis de la pesquería del erizo rojo (*Strongylocentrotus franciscanus*) en la costa noroccidental de Baja California, México. *Centro Regional de Investigación Pesquera de Ensenada, B.C., Sagarpa*. 40-45.
https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/564037/JI_5_Análisis_de_la_pesquería_del_erizo_rojo_Strongylocentrotus_franciscanus.pdf
- Palleiro-Nayar, Julio Said. (2004). *Dinámica de la población de erizo rojo Strongylocentrotus franciscanus sujeta a extracción comercial en Baja California*. [Tesis de Maestría en Ciencias, Centro de Investigación Científica de Estudios Superiores de Ensenada, Baja California]. Repositorio Institucional. <https://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1007/2706/1/163131.pdf>
- Palleiro-Nayar, Julio Said, Salgado-Rogel, M. D. L., & Aguilar-Montero, D. (2008). La pesca de erizo morado, *Strongylocentrotus purpuratus*, y su incremento poblacional en Baja California, México. *Ciencia Pesquera*, 16, 29–35. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/542184/CP16-04_La_pesca_de_erizo_morado_Strongylocentrotus_purpuratus_y_su_incremento_poblacional_en_BC_México.pdf
- Palleiro-Nayar, Julio S., Montañón-Moctezuma, G., & Sosa-Nishizaki, O. (2009). Estimación de la tasa de crecimiento corporal del erizo rojo *Strongylocentrotus franciscanus* en cautiverio y en el Arrecife Sacramento en la Bahía El Rosario, Baja California, México. *Ciencias Pesquera*, 17(2), 21–28.
https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/541939/CP17_2_03_Estimación_de_tasa_crecimiento_del_erizo_rojo_Strongylocentrotus_franciscanus.pdf
- Palleiro-Nayar, J. S., Salgado-Rogel, Ma. de L., Aguilar-Montero, D., & Rivera-Ulloa, J. L. (2013). La pesca del erizo de mar en Baja California, México. *Recursos Bentónicos de Baja California. Erizo y Pepino de mar*, Instituto Nacional de Pesca, 9–32.
https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/622574/Recursos_bentonicos_de_Baja_California.pdf
- Parrish, C. C., Nichols, P. D., Pethybridge, H., & Young, J. W. (2015). Direct determination of fatty acids in fish tissues: quantifying top predator trophic connections. *Oecologia*, 177(1), 85–95.
<https://doi.org/10.1007/s00442-014-3131-3>
- Pearce, C. M., Daggett, T. L., & Robinson, S. M. C. (2002). Effect of binder type and concentration on prepared feed stability and gonad yield and quality of the green sea urchin, *Strongylocentrotus droebachiensis*. *Aquaculture*, 205(1–4), 301–323. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(01\)00685-8](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(01)00685-8)
- Pearce, C. M., Daggett, T. L., & Robinson, S. M. C. (2004). Effect of urchin size and diet on gonad yield and quality in the green sea urchin (*Strongylocentrotus droebachiensis*). *Aquaculture*, 233(1–4), 337–367.
<https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2003.09.027>
- Pearse, J. S., & Giese, A. C. (1966). Food, reproduction and organic constitution of the common antarctic echinoid *Sterechinus neumayeri* (Meissner). *The Biological Bulletin*, 130(3), 387–401.
<https://doi.org/10.2307/1539745>
- Pearse, J. S. (2006). Ecological role of purple sea urchins. *Science*, 314(5801), 940–941.
<https://doi.org/10.1126/science.1131888>

- Peng, Y., Haga, Y., & Kabeya, N. (2025). Enzymes enabling the biosynthesis of various C 20 polyunsaturated fatty acids in a sea urchin *Hemicentrotus pulcherrimus*. *Open Biology*, 15(1). 1-12 <https://doi.org/10.1098/rsob.240170>
- Pérez-Alva, A., Ramírez-Rodrigues, M. A., Baigts-Allende, D. K., Martínez-Jiménez, L. A., & Ramírez-Rodrigues, M. M. (2024). *Macrocystis pyrifera*: A Potential Source of Bioactive Compounds. *Current Nutrition & Food Science*, 20(4), 505–512. <https://doi.org/10.2174/1573401319666230601110804>
- Pino, J. A. (2021). Lecitina: Química, bioquímica y uso en la industria alimentaria. *Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 31(1), 68-77. <https://revcitecal.iiiaa.edu.cu/revista/index.php/RCTA/article/view/227>
- Pincay-Espinoza, J. E. (2023). Efecto de dietas formuladas sobre el crecimiento y supervivencia del erizo de mar negro *Arbacia stellata* (Echinoidea: Arbaciidae). *ResearchGate*. https://www.researchgate.net/publication/374440509_Efecto_de_dietas_formuladas_sobre_el_crecimiento_y_supervivencia_del_erizo_de_mar_negro_Arbacia_stellata_Echinoidea_Arbaciidae
- Radjab, A. W., & Purbiantoro, W. (2019). Effect of Long-term Maintenance on Gonad Characteristics and Egg Quality of Collector Sea Urchin *Tripneustes gratilla* (Linnaeus 1758). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 253(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/253/1/012009>
- Rodríguez-Montesinos, Y., & Hernández-Carmona, G. (1991). Seasonal and geographic variations of *Macrocystis pyrifera* chemical composition at the western coast of Baja California. *Ciencias Marinas*, 17(3), 91–107. <https://doi.org/10.7773/cm.v17i3.816>
- Rodríguez, C., & Pérez, J. A. (2022). Ácidos grasos omega-3. El porqué de una obsesión. Afonso-Carrillo, J. (Ed.), *Mujeres de la Ciencia*, 117-166. <https://www.iehcan.com/wp-content/uploads/2022/11/4-Acidos-grasos-omega3-El-porque-de-una-obsesion.pdf>
- Rogers-Bennett, L., & Catton, C. A. (2019). Marine heat wave and multiple stressors tip bull kelp forest to sea urchin barrens. *Scientific Reports*, 9(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-51114-y>
- Sala, E., & Graham, M. H. (2002). Community-wide distribution of predator–prey interaction strength in kelp forests. *Proceedings of the National Academy of Science of the USA*, 99(6), 3678–3683. <https://doi.org/10.1073/pnas.052028499>
- Salgado-Rogel, Ma. de L., Palleiro-Nayar, J. S., Aguilar-Montero, D., Romero-Martínez, M., & Martínez-García, F. J. (2003). Estudio comparativo de la abundancia de erizo rojo (*Strongylocentrotus franciscanus*) en la costa noroccidental de la Península de Baja California. *Inapesca, Centro Regional de Investigación Pesquera de Ensenada*, 46–53. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/564039/II_6_Estudio_comparativo_de_la_abundancia_de_erizo_rojo.pdf
- Schwingshackl, L., & Hoffmann, G. (2014). Monounsaturated fatty acids, olive oil and health status: a systematic review and meta-analysis of cohort studies. *Lipids in Health and Disease*, 13(1). <https://doi.org/10.1186/1476-511X-13-154>
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. (2012, 4 de diciembre). *Acuerdo por el que se establece veda temporal para la pesca de erizo rojo (Strongylocentrotus franciscanus) y erizo morado (Strongylocentrotus purpuratus) en aguas de jurisdicción federal del Océano Pacífico en el estado de Baja California*. Diario Oficial de la Federación. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=5282909

- Segura, R. (1996). Ácidos grasos omega-3 y su valor preventivo. *Revista de la Reial Acadèmia de Medicina de Catalunya*, 11(3), 132-144. <https://raco.cat/index.php/RevistaRAMC/article/view/72261>
- Senaratna, M., Evans, L. H., Southam, L., Tsvetnenko, E., & Tsvetnenko, E. (2005). Effect of different feed formulations on feed efficiency, gonad yield and gonad quality in the purple sea urchin *Heliocidaris erythrogramma*. *Aquaculture Nutrition*, 11, 199–207. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2095.2005.00340.x>
- Seymour, R. J., Tegner, M. J., Dayton, P. K., & Parnell, P. E. (1989). Storm wave induced mortality of giant kelp, *Macrocystis pyrifera*, in Southern California. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 28(3), 277–292. [https://doi.org/10.1016/0272-7714\(89\)90018-8](https://doi.org/10.1016/0272-7714(89)90018-8)
- Sewell, M. (2005). Utilization of lipids during early development of the sea urchin *Evechinus chloroticus*. *Marine Ecology Progress Series*, 304, 133–142. <https://doi.org/10.3354/meps304133>
- Spindel, N. B., Lee, L. C., & Okamoto, D. K. (2021). Metabolic depression in sea urchin barrens associated with food deprivation. *Ecology*, 102(11). <https://doi.org/10.1002/ecy.3463>
- Tegner, M., & Dayton, P. (1981). Population Structure, Recruitment and Mortality of Two Sea Urchins (*Strongylocentrotus franciscanus* and *S. purpuratus*) in a Kelp Forest. *Marine Ecology Progress Series*, 5, 255–268. <https://doi.org/10.3354/meps005255>
- Tegner, M. J., & Dayton, P. K. (2000). Ecosystem effects of fishing in kelp forest communities. *Journal of Marine Science*, 57(3). <https://doi.org/10.1006/jmsc.2000.0715>
- Tegner, M. J. (2001). The ecology of *Strongylocentrotus franciscanus* and *Strongylocentrotus purpuratus*. *Elsevier*, 32, 307–331. [https://doi.org/10.1016/S0167-9309\(01\)80019-3](https://doi.org/10.1016/S0167-9309(01)80019-3)
- Tenuzzo, B. A., Carata, E., Mariano, S., & Dini, L. (2017). Morphological and Biochemical Profiles of the Gonadal Cycle in the Sea Urchin *Paracentrotus lividus*: Wild Type vs. Bred. In *Sea Urchin - From Environment to Aquaculture and Biomedicine*. pp 74-91 InTech. <https://doi.org/10.5772/intechopen.68895>
- The University of Maine (n.d.). Nutrition and Diets for Green Sea Urchin Aquaculture. *Center for Cooperative Aquaculture Research*. <https://umaine.edu/cooperative-aquaculture/sea-urchin-diet-trials/>
- Tsoukalas, D., Lerfall, J., & Jakobsen, A. N. (2024). Insights into the quality changes of edible sea urchin (*Echinus esculentus*) gonads during ice storage. *LWT, Elsevier*, 203, 116345. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2024.116345>
- Vega-Villasante, F., Cupul-Magaña, A., Nolasco-Soria, H., & Carrillo-Farnés, O. (2006). Las algas marinas *Sargassum spp.* y *Macrocystis pyrifera*: ¿una alternativa para el forraje del ganado bovino en la península de Baja California? *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, 40(4). <https://www.redalyc.org/pdf/1930/193017672007.pdf>
- Vidal Santana, G. B. (n.d.). Desarrollo de una Dieta Artificial para optimizar la Calidad Comercial de Gónadas Café de Erizos (*Loxechinus albus*) de la XII Región. *Instituto de Fomento Pesquero*. [https://www.ifop.cl/wp-content/uploads/biblioteca/libros_digitales/Desarroll_dieta_erizo\(1\).pdf](https://www.ifop.cl/wp-content/uploads/biblioteca/libros_digitales/Desarroll_dieta_erizo(1).pdf)

- Vilalta Navas, A. (2017). *Desarrollo de un modelo trófico del ecosistema de *Macrocystis pyrifera* en isla Natividad* [Tesis de Maestría en Ciencias, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California]. Repositorio Institucional. https://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1007/1608/1/tesis_Vilalta_Navas_Ainoa_11_oct_2017.pdf
- Wallner-Hahn, S., de la Torre-Castro, M., Eklöf, J. S., Gullström, M., Muthiga, N. A., & Uku, J. (2015). Cascade effects and sea-urchin overgrazing: An analysis of drivers behind the exploitation of sea urchin predators for management improvement. *Ocean y Coastal Management*, 107, 16–27. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2015.01.010>
- Wang, H., Ding, J., Ding, S., & Chang, Y. (2019). Metabolomic changes and polyunsaturated fatty acid biosynthesis during gonadal growth and development in the sea urchin *Strongylocentrotus intermedius*. *Comparative Biochemistry and Physiology Part D: Genomics and Proteomics*, 32, 100611. <https://doi.org/10.1016/j.cbd.2019.100611>
- Watanabe, J. M., & Harrold, C. (1991). Destructive grazing by sea urchins *Strongylocentrotus spp.* un a central California kelp forest: potential roles of recruitment, depth, and predation. *Marine Ecology Progress Series, Inter-Research Science Center*, 71(2), 125–141. <https://www.jstor.org/stable/24817385>
- Watts, S. A., Lawrence, A. L., & Lawrence, J. M. (2013). Chapter 10 - Nutrition. *Developments in Aquaculture and Fisheries Science, Elsevier*, 38, 155–169). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-396491-5.00010-1>
- Workman, G. D. (1999). A Review of the Biology and Fisheries for Purple Sea Urchin (*Strongylocentrotus purpuratus*, Stimpson, 1857) and Discussion of the Assessment Needs for a Proposed Fishery . *Fisheries and Oceans Canada*, 1–58. <https://www.researchgate.net/publication/253950651>
- Zhou, X., Zhou, D.-Y., Lu, T., Liu, Z.-Y., Zhao, Q., Liu, Y.-X., Hu, X.-P., Zhang, J.-H., & Shahidi, F. (2018). Characterization of lipids in three species of sea urchin. *Food Chemistry*, 241, 97–103. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.08.076>

Anexos

Anexo 1

Encuesta realizada con las 36 fotografías más representativas de las gónadas de los erizos morados del experimento. Se pidió la evaluación de 3 características de cada fotografía: firmeza de 1 (muy firme) a 4 (muy suave), textura de 1 (segmentos diferenciados, lisos) a 3 (segmentos no diferenciados, granulares), y color. El color se midió conforme: A (amarillo brillante), AB (amarillo o naranja opaco), B (amarillo pálido), BC (café oscuro) y C (café gris), todos en orden de mayor a menor preferencia gonadal.

Encuesta de Google:

https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSfMQEbp0w4Hfwnqmuxs3sVrzlAZBx2I6JMNm-uhrNfPF43ZA/viewform?usp=sf_link

Anexo 2

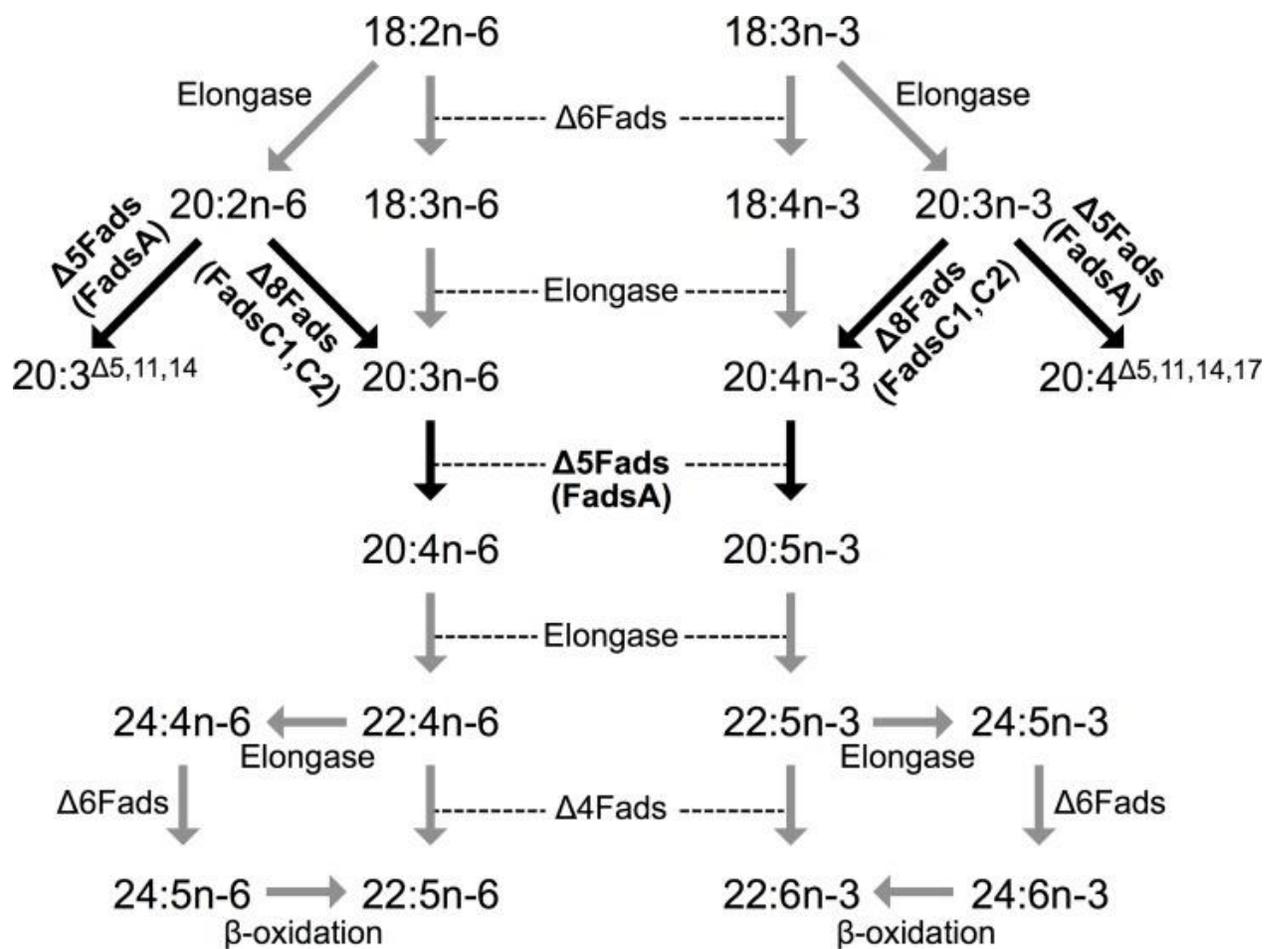


Figura 8. Ruta de biosíntesis de ácidos grasos de cadena larga (LC-PUFA) de precursores C18 AG poliinsaturados, aceptados en vertebrados.