

Artículo original

Estudio del desarrollo temprano del dólar de arena *Encope michelini* L. Agassiz, 1841 (Echinoidea: Mellitidae) en condiciones controladas de laboratorio

Study of the early development of the sand dollar *Encope michelini* L. Agassiz, 1841 (Echinoidea: Mellitidae) under controlled laboratory conditions

✉ Carlos A. Cancino-Velásquez¹, ✉ Carlos A. Nisperuza-Pérez^{1,2,*}, ✉ Jorge L. Llorente-Vega¹,
✉ Jorge A. Quirós-Rodríguez²

¹ Grupo de Investigación en Biotecnología - GRUBIODEQ, Facultad de Ciencias Básicas, Departamento de Biología, Universidad de Córdoba, Montería, Colombia

² Grupo de Investigación Química de los Productos Naturales - PRONAT, Facultad de Ciencias Básicas, Departamento de Química, Universidad de Córdoba, Montería, Colombia

Resumen

Los equinoideos son organismos modelo para estudiar la fertilización y la ontogenia temprana debido a la facilidad con que se induce su desove y al desarrollo externo, rápido y sincrónico. No obstante, la caracterización embrionaria se ha centrado en equinoideos regulares, lo que limita la información sobre el desarrollo ontogénico de especies irregulares. El propósito de este estudio fue documentar las etapas embrionarias y larvales tempranas de *Encope michelini* y proporcionar información de los eventos claves durante su desarrollo. Se recolectaron 10 ejemplares de *E. michelini* en noviembre de 2023 en La Ahumadera, bahía de Cispatá, Colombia, y se transportaron al Laboratorio de Biología Molecular de la Universidad de Córdoba. Luego se aclimataron 12 horas y se indujeron al desove aplicando una solución de cloruro de potasio (KCl). La especie de interés se caracteriza por poseer un huevo isolecito, con un diámetro promedio de $188,37 \pm 21,48 \mu\text{m}$. La duración media de cada clivaje fue de 26 minutos hasta la formación de la blástula tras 04:10 horas post-fecundación (HPF) y su eclosión luego de 06:30 HPF. La etapa de gastrulación se evidenció a las 08:00 HPF y el estado de prisma a las 23:30 HPF; finalmente, después de 52:00 HPF las larvas se desarrollaron hasta la etapa de equinopluteus de dos brazos. Este estudio constituye la primera caracterización embrionaria de un equinoideo en el Caribe colombiano. Las características embrionarias de *E. michelini* sugieren que puede ser una especie idónea en futuros estudios para evaluar el impacto del cambio climático y la contaminación química en el desarrollo de los invertebrados marinos.

Palabras clave: Embrión; Equinoideo; Larvas; Ontogenia.

Abstract

Echinoids are model organisms for studies on fertilization and early ontogeny because gamete release can be easily induced, and their external development is rapid and synchronous. However, embryological research has largely focused on regular echinoids, leaving significant gaps in the understanding of the ontogenetic development of irregular species. Our study aimed to describe the embryonic and early larval development of *Encope michelini* and to document key morphogenetic events during its ontogeny. Ten adult specimens of *E. michelini* were collected in November 2023 from La Ahumadera, Cispatá Bay, Colombia, and transported to the Molecular Biology Laboratory at the University of Córdoba. After a 12-hour acclimation period, spawning was induced using a potassium chloride (KCl) solution. The eggs are isolecithal, with an average diameter of $188.37 \pm 21.48 \mu\text{m}$. Each cleavage cycle lasted approximately 26 minutes, leading to blastula formation at 04:10 HPF and hatching at 06:30 HPF. Gastrulation began at 08:00 HPF, followed by the prism

Citación: Cancino Velásquez CA, et al. Estudio del desarrollo temprano del dólar de arena *Encope michelini* L. Agassiz, 1841 (Echinoidea: Mellitidae) en condiciones controladas de laboratorio. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 2026 Feb 6. doi: <https://doi.org/10.18257/raccefn.3210>

Editor: Hernando Campos

***Correspondencia:**

Carlos A. Nisperuza Pérez;
carlosnisperuzap@correo.unicordoba.edu.co

Recibido: 23 de abril de 2025

Aceptado: 6 de noviembre de 2025

Publicado en línea: 6 de febrero de 2026



Este artículo está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

stage at 23:30 HPF. After 52:00HPF, larvae reached the two-armed echinopluteus stage. Our study constitutes the first detailed embryonic description of an echinoid from the Colombian Caribbean. The developmental features of *E. michelini* suggest that this species may serve as a promising model for future studies evaluating the effects of climate change and chemical pollutants on marine invertebrate development.

Keywords: Echinoid; Embryo; Larvae; Ontogeny.

Introducción

Los erizos de mar son organismos conspicuos y abundantes en los océanos, que contribuyen activamente al equilibrio de los ecosistemas bentónicos y representan un componente fundamental de las redes alimentarias. Su función ecológica radica en su papel como herbívoros, erosionadores y bioturbadores, por lo tanto, las variaciones en su densidad poblacional son un factor determinante para la estructura y dinámica de los ecosistemas marinos (**Uthicke et al.**, 2009; **Collin et al.**, 2021; **de Santiago et al.**, 2023).

Desde mediados del siglo XIX, los equinoideos se han consolidado como organismos modelo en la embriología experimental, la biología molecular y la biología del desarrollo (**Kipryushina & Yakovlev**, 2020; **Nesbit & Hamdoun**, 2020), debido a sus ventajas logísticas, entre las que se incluyen la facilidad de recolección en campo y de mantenimiento en el laboratorio (**Ghorani et al.**, 2012), sumadas a rasgos biológicos como su amplia distribución, la liberación masiva de gametos, los embriones transparentes y de gran tamaño, y un desarrollo rápido y sincrónico (**McClay**, 2011; **Nesbit & Hamdoun**, 2020). Estas características han permitido utilizar sus etapas embrionarias y larvarias como biomarcadores en los estudios sobre alteraciones climáticas y en pruebas ecotoxicológicas marinas, lo que ha contribuido a la comprensión de aspectos básicos de la fertilización, embriogénesis y de los efectos de compuestos químicos o del cambio climático sobre su desarrollo (**Pagano et al.**, 2017; **Chiarelli et al.**, 2019; **Gambardella et al.**, 2021).

Sin embargo, la mayor parte del conocimiento sobre la ontogenia inicial de los equinoideos proviene de estudios realizados en erizos regulares (**McClay**, 2011), cuyos procesos de desarrollo embrionario y larval han sido ampliamente descritos en especies como *Lytechinus pictus* (Verrill, 1867) (**Nesbit et al.**, 2019; **Nesbit & Hamdoun**, 2020), *Tripneustes depressus* A. Agassiz, 1863 (**Sonnenholzner-Varas et al.**, 2018), y *Strongylocentrotus purpuratus* (Stimpson, 1857) (**Heyland & Hodin**, 2014). También existen trabajos centrados en etapas particulares del desarrollo que aportan información sobre la duración de los procesos ontogénicos en: *Echinometra vanbrunti* A. Agassiz, 1863 (**Galarza-Verkovich**, 2014), *Salmacis sphaeroides* (Linnaeus, 1758) (**Rahman et al.**, 2012) y *Echinometra mathaei* (Blainville, 1825) (**Ghorani et al.**, 2012).

En contraste, la información sobre erizos irregulares es limitada, con pocos estudios en especies como *Dendraster excentricus* (Eschscholtz, 1831) (**Olivares-Bañuelos et al.**, 2012) y *Clypeaster subdepressus* (Gray, 1825) (**Vellutini & Migotto**, 2010), lo que ha impedido reconocer plenamente el potencial de los equinoideos aplanos como organismos experimentales. Esta brecha de conocimiento es aún más evidente en el Caribe occidental, especialmente en las zonas costeras de Colombia, donde los estudios sobre el desarrollo embrionario y larval de los equinodermos son escasos y no se registran investigaciones previas en equinoideos.

Encope michelini L. Agassiz, 1841 es una especie de erizo de mar irregular presente desde Carolina del Norte hasta Venezuela y Cuba, que habita entre los 3 y los 90 m de profundidad (**Hendler et al.**, 1995; **Alvarado & Solís-Marín**, 2013). En el Caribe colombiano se ha documentado en los departamentos de Magdalena y Córdoba, en este último específicamente en la bahía de Cispatá, asociado a sustratos arenosos gruesos y finos ricos en detritos de pastos marinos y algas filamentosas (**Hendler et al.**, 1995; **Borrero-Pérez et al.**, 2012; **Quirós-Rodríguez**, 2015; **Galindo-Anaya et al.**, 2020). Su

actividad de excavación favorece la recirculación de materia orgánica en el sedimento. Además, regula las poblaciones de algunos moluscos y crustáceos carídeos, lo que destaca su importancia dentro de la red trófica (**Morin et al.**, 1985; **Hilber & Lawrence**, 2009).

A pesar de su amplia distribución y de sus implicaciones ecológicas, la ontogenia inicial de *E. michelini* ha sido poco estudiada. Actualmente, existe un registro sobre el tiempo de desarrollo de la especie, pero no abarca concretamente los estadios iniciales del desarrollo, centrando la información en la blastulación y la formación larval (**Eckert**, 1995). Otros autores aportan datos sobre el contenido proteico y lipídico de los huevos (**George et al.**, 1997). Sin embargo, esta información es fragmentada e insuficiente para establecer una base de referencia sobre la secuencia y cronología del desarrollo temprano de la especie, lo que dificulta su implementación en la experimentación biológica y en estudios sobre procesos fundamentales del desarrollo, como la diferenciación celular y la regulación genética.

En este contexto, nuestro objetivo fue documentar las etapas embrionarias y larvales tempranas del dólar de arena *E. michelini*, proporcionando información actualizada y microfotografías de los eventos clave de su embriogénesis. Este estudio constituye un aporte pionero al conocimiento de la biología del desarrollo de estos organismos en la región, ya que no solo permitirá una comprensión más completa de los mecanismos subyacentes de su desarrollo, sino que servirá de base para posteriores investigaciones comparativas, ecológicas y ecotoxicológicas, lo que facilitará la evaluación del efecto de variables ambientales y de la contaminación en el desarrollo de los equinodermos del Caribe colombiano.

Materiales y métodos

Recolección y mantenimiento de organismos adultos

Los ejemplares de *E. michelini* se recolectaron en noviembre de 2023 en la localidad La Ahumadera ($9^{\circ}24'51,7''$ N y $75^{\circ}48'82,1''$ W), ubicada en la zona de uso sostenible de la bahía de Cispatá, Córdoba, en el Caribe colombiano (Figura 1). Esta área comprende una extensión estimada de 1,08 km², con fondos fango-arenosos y aguas que exhiben una temperatura superficial entre 22-28 °C (**Quirós-Rodríguez**, 2015). Se extrajeron

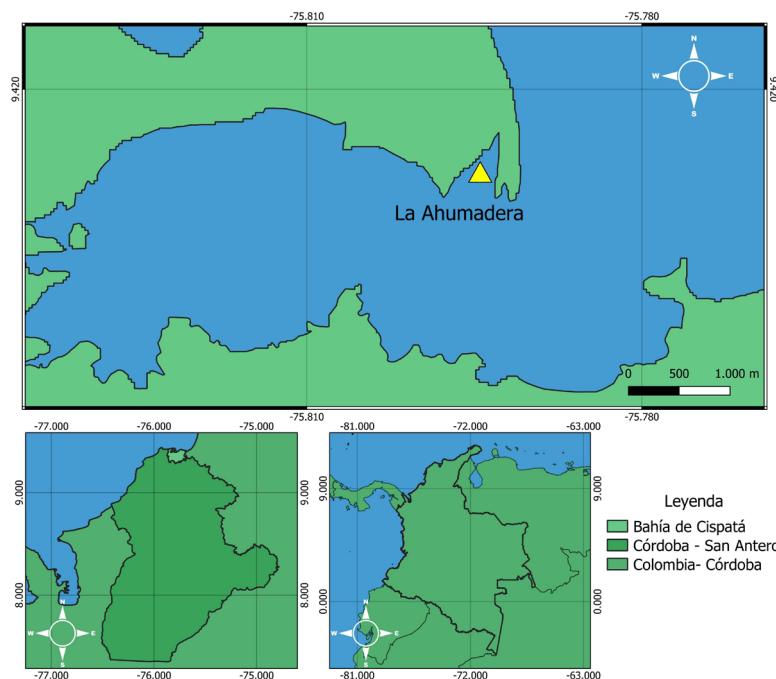


Figura 1. Ubicación del sector La Ahumadera en la Bahía de Cispatá, San Antero, **Córdoba**, Caribe colombiano

manualmente 10 ejemplares de *E. michelini* mediante buceo con *snorkel* y se trasladaron en cavas de icopor con agua de mar y arena al Laboratorio de Biología Molecular de la Universidad de Córdoba (Colombia), donde permanecieron en acuarios a 23 ± 2 °C, con una capa de arena (5 cm) y aireación continua durante 12 h.

Desove y fertilización

El desove fue inducido mediante inyección de 0,5 mL de cloruro de potasio (KCl), 0,55 M en la parte oral, siguiendo el procedimiento descrito por **Ghorani et al.** (2012), con algunas modificaciones. Durante la inducción al desove se obtuvieron gametos de tres machos y siete hembras. Los huevos se recolectaron invirtiendo los erizos sobre una caja de Petri con 5 mL de agua de mar filtrada, y se pipetearon espermatozoídes secos de los poros genitales. Para llevar a cabo la fertilización, los gametos obtenidos se mezclaron suavemente durante un minuto y se incubaron en un *beaker* con 2 L de agua de mar filtrada. Este ensayo *in vitro* se realizó bajo condiciones controladas de temperatura ($25,0 \pm 1$ °C), pH ($8,2 \pm 0,1$) y salinidad ($35,5 \pm 1,5$ PSU), y con suministro continuo de aireación, lo que permitió mantener las condiciones del agua estables durante todo el experimento.

Embriogénesis y etapas tempranas del desarrollo larval

La documentación del desarrollo embrionario y los primeros estadios larvales se hizo desde la fertilización. El momento de la mezcla de los gametos se estableció como tiempo cero (00:00 HPF). A partir de este punto, se observaron y fotografiaron los embriones cada 10 minutos con un microscopio estereoscópico Luxeo Z6 con cámara digital incorporada y un microscopio Zefir Cpad con pantalla LCD. Durante la gastrulación, las micrografías se realizaron en intervalos de 30 minutos y después de la formación de la larva pluteus, cada 2 horas. Los primeros estados larvales fueron alimentados con *Tetraselmis suecica* (Kylin) Butcher, 1959, en una densidad de 2×10^4 células por mL⁻¹.

Resultados

El tiempo transcurrido desde la fertilización hasta que el 50 % de los organismos alcanzaron la etapa de equinopluteus de dos brazos fue de 52:00 h (**Tabla 1**). Los huevos de *E. michelini* presentaron un diámetro promedio de $188,37 \pm 21,48$ µm (n=100) y fueron de tipo isolecito. La fertilización tuvo lugar diez minutos después de la mezcla de los

Tabla 1. Tiempo de desarrollo de los eventos claves en la embriogénesis temprana y las etapas iniciales del desarrollo larval de *Encope michelini*

Estadio de desarrollo	Tiempo (HPF)
Cigoto	00:10
Primer clivaje	01:10
Segundo clivaje	01:30
Tercer clivaje	02:00
Cuarto clivaje	02:40
Quinto clivaje	03:00
Sexto clivaje	03:30
Blástula temprana	04:10
Blástula tardía	06:00
Eclosión	06:30
Gástrula temprana	07:30
Gástrula tardía	08:00
Larva prisma	23:30
Equinopluteus dos brazos	52:00

gametos, y se confirmó por la presencia de la membrana de fertilización y la membrana gelatinosa (**Figura 2A**). Las dos segmentaciones iniciales se produjeron en un plano de simetría longitudinal; la primera división celular se observó a las 01:10 HPF dando origen a los dos primeros blastómeros (**Figura 2B**), mientras que la segunda ocurrió luego de 01:30 HPF, formando un embrión de cuatro blastómeros (**Figura 2C**).

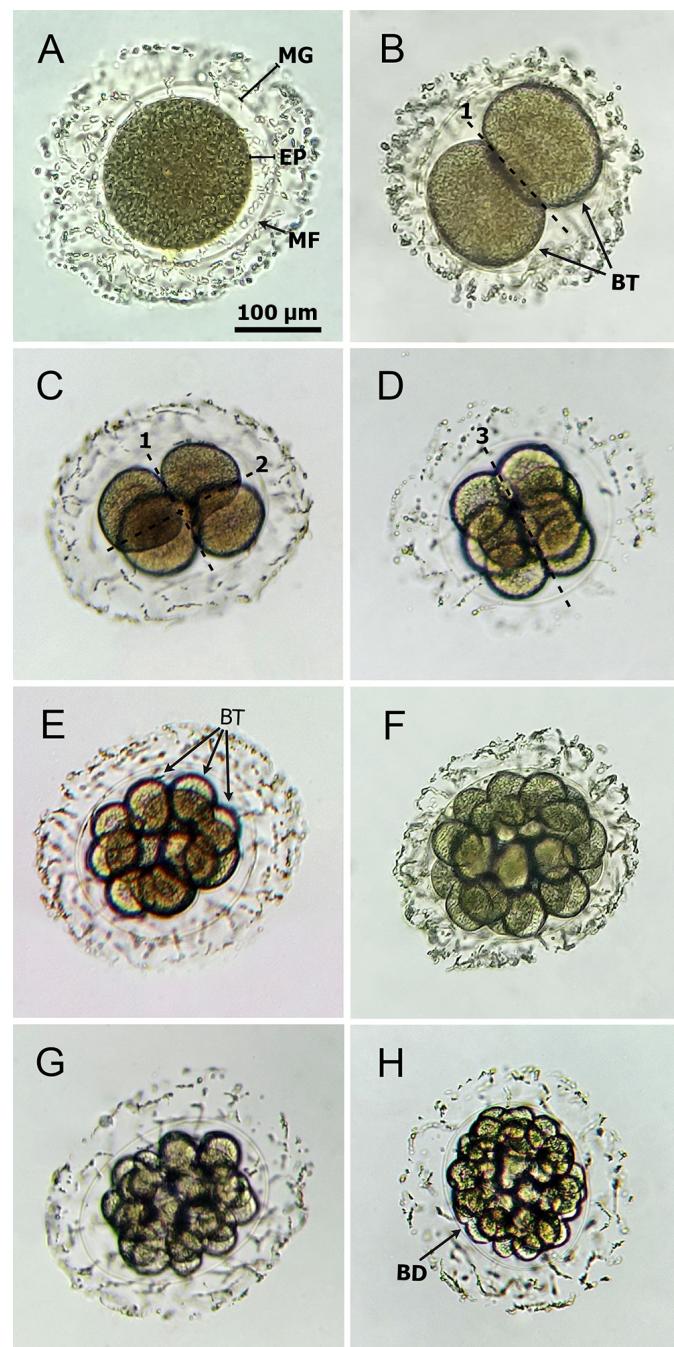


Figura 2. Micrografía del cigoto y clivajes iniciales de *Encope michelini*. **A.** Cigoto. **B.** Primer clivaje. **C.** Segundo clivaje. **D.** Tercer clivaje. **E.** Cuarto clivaje. **F.** Quinto clivaje. **G.** Sexto clivaje (mórlula). **H.** Séptimo clivaje. 1: primer plano de segmentación; 2: segundo plano de segmentación; 3: tercer plano de segmentación; BD: blastodermo; BT: blastomeros; EP: espacio perivitelino; MF: membrana de fertilización; MG: membrana gelatinosa

El tercer clivaje se presentó a las 02:00 HPF a través de un plano ecuatorial produciendo un embrión de ocho blastómeros (**Figura 2D**). Durante la cuarta segmentación (02:40 HPF) se formó un embrión de 16 células procedentes de la división de los blastómeros del polo animal y vegetal (**Figura 2E**). El quinto y sexto clivaje se registraron después de 03:00 y 03:30 HPF, dando origen a embriones de 32 y 64 células, respectivamente (**Figura 2F-G**).

A las 04:10 HPF se evidenció la formación de la blástula temprana, después de la séptima escisión (**Figura 2H**). Esta etapa de 128 células es, inicialmente, de tamaño reducido y adquiere una forma esférica, con una cavidad pronunciada en su interior (blastocito central) recubierta por una capa engrosada de células, conocida como blastoderm, la cual reduce su grosor debido a la afluencia de agua hacia el interior del embrión, lo que expande el blastocito (**Figura 3A**). En este punto, las células empiezan a tener especificidad, formando cilios, los cuales aportan movilidad y provocan la rotación del embrión dentro de la membrana de fertilización.

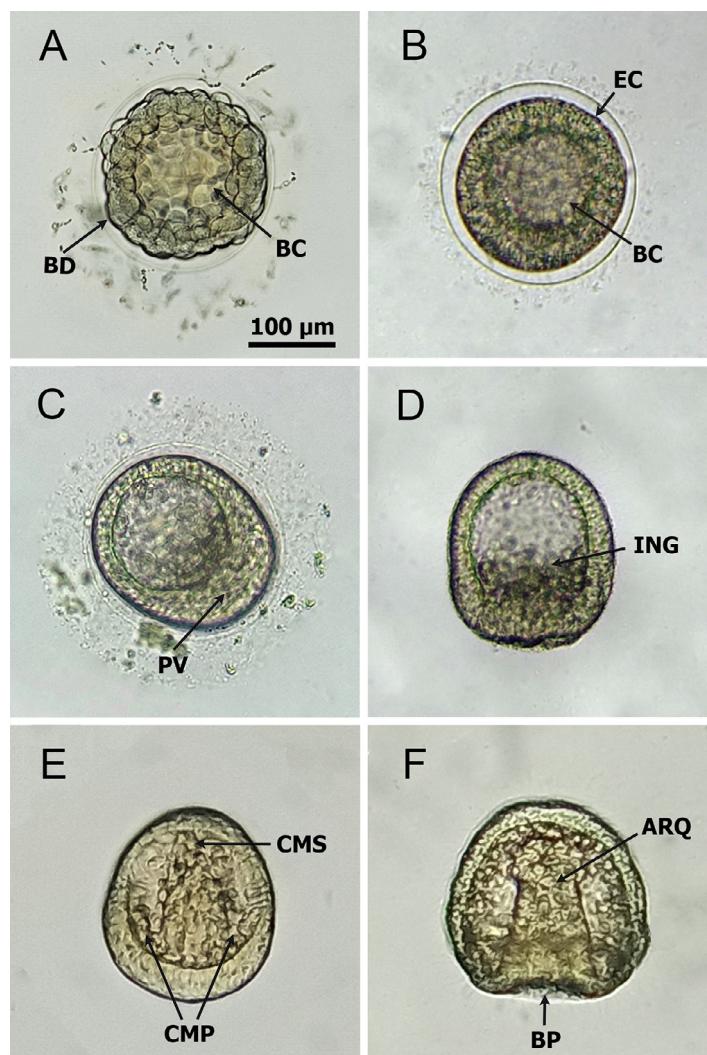


Figura 3. Micrografía de los procesos de blastulación y gastrulación de *Encope michelini*. **A.** Blástula temprana. **B.** Blástula tardía. **C.** Blástula con placa vegetativa. **D.** Gástrula temprana. **E.** Movimiento de ingresión avanzado en la gastrulación. **F.** Gástrula con arquénteron ARQ: arquénteron; BC: blastocito; BD: blastoderm; BP: blastoporo; CMP: células mesenquimáticas primarias; CMS: células mesenquimáticas secundarias; ING: proceso de ingresión celular; PV: placa vegetativa

El estadio de blástula tardía (**Figura 3B**) se produjo pasadas 06:00 HPF y se caracterizó por la formación del ectodermo y su extensión completa, logrando cubrir el blastocele en su totalidad; además, el engrosamiento y la división asimétrica del embrión generó una acumulación de células en el polo vegetativo, dando origen a la placa vegetal (**Figura 3C**). Treinta minutos después, la ruptura de la membrana externa del embrión dio lugar a una blástula eclosionada de nado libre.

La gastrulación temprana se observó después de 07:30 HPF (**Figura 3D**). En este estado de desarrollo, el hemisferio vegetal engrosado se aplana y un grupo de células, denominadas células mesenquimáticas primarias, se desprende del polo vegetal y migra hacia el interior del blastocele, en un proceso conocido como ingresión. A las 08:00 HPF, durante la gastrulación tardía, el arquenterón parcialmente completo integra células mesenquimáticas secundarias al blastocele para culminar la formación del intestino primitivo (**Figura 3E**) y de la cavidad generada en el polo vegetal, denominada blastoporo (**Figura 3F**). Una de las características morfológicas más importantes en este estadio de desarrollo fue la formación de las tres capas embrionarias.

A las 23:30 HPF, la gástrula adquirió forma de prisma (**Figura 4A**), la región invaginada del arquenterón, la cual hizo contacto con la pared del blastocele y formó el estomodeo, en tanto que las células mesenquimales primarias dieron origen a las espículas triradiadas que proporcionan soporte y la forma de pirámide invertida característica de este estado larval inicial. Esta etapa de desarrollo se prolongó durante 28 horas en las que las larvas iniciaron el proceso de elongación de las espículas hasta la formación incipiente de los brazos anterolaterales (**Figura 4B**).

A las 52:00 HPF se desarrollaron los brazos anterolaterales en su totalidad y se logró distinguir la formación inicial de los brazos post-orales (**Figura 4C-D**). En este punto de desarrollo larval, los equinopluteus presentaron un sistema digestivo completamente formado.

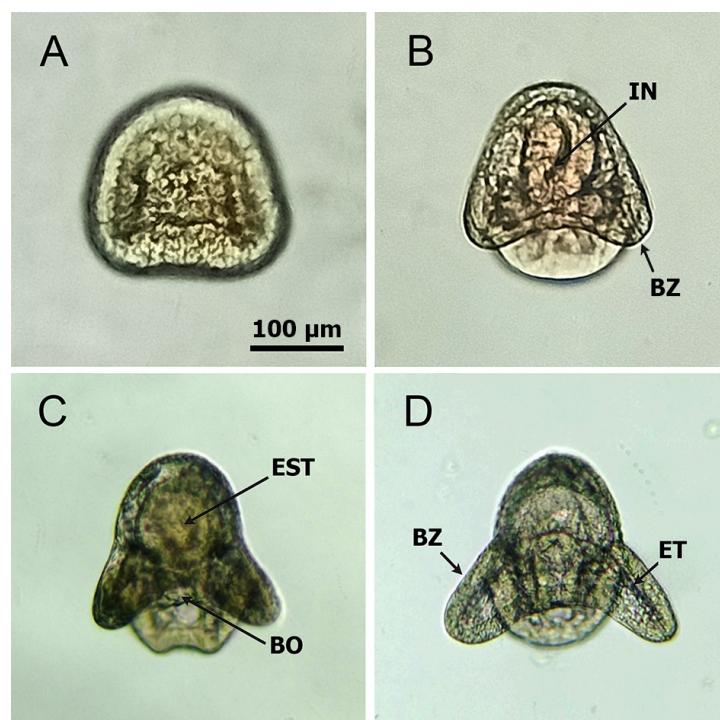


Figura 4. Micrografía de larvas de *Encope michelini*. **A.** Larva prisma. **B.** Larva prisma avanzada. **C.** Larva equinopluteus de dos brazos. **D.** Larva equinopluteus completa. BO: boca; BZ: brazo; EST: estómago; ET: espícula trirradiada; IN: intestino

Discusión

Para contextualizar los registros del desarrollo ontogénico temprano de *E. michelini* se hizo un análisis comparativo que incluyó especies de equinoideos irregulares con descripciones embriológicas disponibles, priorizando aquellos taxones filogenéticamente afines, incluidos representantes del orden Echinolampadacea, al cual pertenece la especie de estudio, así como del orden Clypeasteroida, un taxón con relación filogenética cercana. También se incorporaron descripciones puntuales realizadas en especies de equinoideos regulares, con el fin de enriquecer las comparaciones en los diferentes estadios de desarrollo. Este enfoque permitió determinar patrones específicos del grupo y contrastar estrategias de desarrollo morfológicas y temporales.

En nuestro estudio *E. michelini* presentó huevos con un diámetro promedio similar al reportado por **Eckert** (1995), quien registró valores de $174,5 \pm 1,06 \mu\text{m}$ para esta especie en Conch Key, Florida. Al comparar dichos resultados con algunos representantes del orden *Clypeasteroida*, se observa que *E. michelini* presenta un diámetro de huevo menor que *C. rosaceus* ($280,3 \pm 7,7 \mu\text{m}$), pero cercano a *C. subdepressus* ($152,6 \pm 3,3 \mu\text{m}$).

Las diferencias observadas en el tamaño de los huevos de *E. michelini* podrían estar asociadas con la cantidad y el uso de las reservas vitelinas durante el desarrollo larval. *Clypeaster rosaceus* presenta planctotrofia facultativa, una estrategia en la que las larvas cuentan con reservas de vitelo suficientes para sostener su crecimiento y alcanzar la metamorfosis sin depender completamente del alimento exógeno (**de Souza**, 2008). En contraste, las larvas de *C. subdepressus* son planctotróficas obligatorias y dependen de fuentes externas de alimento para alcanzar las últimas etapas de su desarrollo larval, es decir, el rudimento y la etapa de juvenil, porque cuentan con pocas reservas energéticas endógenas, lo que explica el tamaño reducido de sus huevos (**Emlet**, 1986; **George et al.**, 1997).

El tamaño de los huevos de *E. michelini* valida una estrategia intermedia en términos de nutrición y desarrollo, en la que se producen huevos planctotróficos con un alto contenido de proteínas y lípidos (**George et al.**, 1997). Sin embargo, no se debe descartar la posibilidad de que las diferencias en el diámetro de los huevos de estas especies también puedan estar influenciadas por características morfológicas, como el tamaño de los adultos.

Los huevos de *E. michelini* son de tipo isolecito, lo que significa que la cantidad de vitelo se distribuye uniformemente, esta característica es típica de organismos cuyas larvas se desarrollan en ambientes donde pueden obtener nutrientes externos rápidamente. En general, las primeras etapas de desarrollo de *E. michelini* ocurrieron de forma rápida, sincrónica y con segmentaciones de tipo holoblástico, esto quiere decir que el surco de la segmentación se extendió a través de la totalidad del cigoto (**Gilbert**, 2005).

En nuestro estudio se observó el primer clivaje luego de 01:10 HPF, lo que se asemeja a los registros embrionarios del erizo regular *Salmacis sphaeroides* cultivado a 24°C , en los que el primer clivaje ocurrió a las 01:12 HPF. Además, los intervalos de segmentación para ambas especies no superaron los 30 minutos en promedio. En contraste, el tiempo del primer clivaje de *E. michelini* difiere de otros equinoideos como *Dendraster excentricus* y *Lytechinus pictus*, casos en los que la división celular dio origen a un embrión de dos blastómeros después de 00:50 HPF a 19°C y 01:30 HPF a 20°C , respectivamente, con divisiones celulares cada 45 minutos (**Olivares-Bañuelos et al.**, 2012; **Rahman et al.**, 2012; **Nesbit & Hamdoun**, 2020).

En el caso del equinoideo irregular *D. excentricus*, se ha evidenciado un mayor predominio de mecanismos de regulación genética del organismo sobre la duración del desarrollo embrionario temprano, por encima del impacto de los factores externos como la temperatura (**Olivares-Bañuelos et al.**, 2012). Asimismo, los estudios en el erizo de mar regular *L. pictus* han demostrado una embriogénesis sincrónica y de duración similar bajo distintos rangos de temperatura, entre los 20°C y los 24°C (**Hinegardner**, 1969; **Nesbit & Hamdoun**, 2020). Esto sugiere que la variación térmica no es el principal factor involucrado en las diferencias en el tiempo de desarrollo desde la fertilización hasta la primera segmentación y la duración de los clivajes de dichas especies en comparación con

E. michelini. Por ello, estas disimilitudes entre la duración de la embriogénesis podrían atribuirse al rendimiento fisiológico y a sus características genómicas y transgeneracionales, aspectos cruciales que determinan la dinámica de desarrollo de los equinoideos (**Wong et al.**, 2019).

El tiempo de aparición de la blástula y de la eclosión de *E. michelini* fue más rápido en comparación con registros anteriores para la especie en Conch Key, Florida (**Tabla 2**), en los que se documentó que el tiempo mínimo desde la fertilización hasta la blastulación fue de 12 h a 23° C (**Eckert**, 1995). Estas divergencias entre los resultados pueden estar relacionadas con la temperatura del agua durante el desarrollo, ya que este factor puede incrementar la tasa metabólica y la velocidad de crecimiento de algunos equinoideos (**Amy**, 1983; **Byrne & Hernández**, 2020), además, la región y las condiciones climáticas en que fueron recolectados los organismos adultos para la experimentación son distintas, lo que puede condicionar el desarrollo de la progenie (**Amy**, 1983; **Wong et al.**, 2019). Los resultados también difieren con el dólar de arena *Scaphechinus mirabilis* (Agassiz, 1864) (**Tabla 2**), cuya blástula monocapa se formó a las 09:00 HPF a 20 °C y la ruptura de la membrana que permitió la liberación masiva de blástulas ciliares se produjo entre 11:30 y 12:00 HPF (**Dautov & Kashenko**, 2008). El desarrollo más rápido de los embriones de *E. michelini* incubados a 25 °C hasta la blastulación puede estar correlacionado con la temperatura del agua, sin embargo, estas diferencias también podrían estar ligadas a otros factores externos en las condiciones de cultivo *in vitro* o a sus características embrionarias, en tanto que el equinoideo irregular *C. subdepressus* alcanza el estado de blastulación entre las 03:30 y 06:30 HPF y la eclosión luego de 07:30 HPF a 26 °C (**Vellutini & Migotto**, 2010). Estos resultados se asemejan a los del presente trabajo, lo que puede deberse a que ambas especies se desarrollan en zonas costeras y aguas cálidas.

El tiempo transcurrido hasta la formación de la góstrula en *E. michelini* fue relativamente menor en comparación con el equinoideo irregular *Cassidulus mitis* (**Tabla 2**), en el que se registró entre el segundo y tercer día después de la fertilización (**Contins & Ventura**, 2011). Esta diferencia en el tiempo de desarrollo destaca la variabilidad en

Tabla 2. Comparación del tiempo de desarrollo embrionario y larval temprano entre *Encope michelini* y otras especies de equinoideos irregulares seleccionadas por su cercanía taxonómica y representación de distintos órdenes dentro de la infraclass Irregularia.

Especie	Localidad	Autor (es)	Tiempo de aparición del estadio embrionario (HPF)				
			1 SG	BT	GT	PT	EPT I
<i>Cassidulus mitis</i>	Playa Vermelha, Bahía de Guanabara, en la costa de Río de Janeiro, Brasil	Contins y Ventura (2011)	01:00 -02:00	22:00	48:00 -72:00	-	-
<i>Clypeaster subdepressus</i>	Portinho y Parcela da playa Grande, canal de San Sebastián, Sao Paulo, Brasil	Vellutini y Migotto (2010)	01:20	03:30	10:00	24:00	48:00
<i>Scaphechinus mirabilis</i>	Srednyaya Bight, Bahía Vostok	Dautov y Kashenko (2008)	01:20	09:00	23:00	28:00	40:00
<i>Dendraster excentricus</i>	Punta Banda, Baja California, México	Olivares-Bañuelos et al. (2012)	00:50	05:00	09:00	24:00	52:00
<i>Encope michelini</i>	Conch Key, Florida	Eckert (1995)	-	12:00	-	24:00	-
	La Ahumadera, Bahía de Cispatá, San Antero, Córdoba	* Presente trabajo	01:10	04:10	7:30	23:30	52:00

1SG: primera segmentación; BT: blastulación; GT: gastrulación; PT: pluteus; EPT I: equinopluteus I

los procesos embrionarios entre especies de equinoideos. A pesar de las disimilitudes temporales en la gastrulación, en ambas especies se registró el plegamiento de una capa de células al interior del embrión, la cual forma los tejidos endodérmicos y mesodérmicos a partir del arquénteron como consecuencia de la pérdida de adherencia de las micrómeras a las células vecinas y la membrana hialina, y al incremento de la afinidad por las proteínas presentes en el blastocel, lo que resulta en el proceso de ingresión (**Gilbert**, 2005; **Ghorani et al.**, 2012).

El tiempo hasta la formación de la larva prisma en *E. michelini* coincidió con lo documentado para esta misma especie en Florida y para el equinoideo irregular *C. subdepressus* en Brasil, registrándose en ambos casos a las 24:00 HPF (**Tabla 2**) a 23 y 26 °C, respectivamente (**Eckert**, 1995; **Vellutini & Migotto**, 2010). No obstante, fue más prolongado que el tiempo registrado para diversos equinoideos regulares como *E. mathaei* (20:00 HPF a 29 °C; **Ghorani et al.**, 2012), *Salmacis sphaeroides* (22:25 HPF a 24 °C; **Rahman et al.**, 2012) y *Arbacia lixula* Linnaeus, 1758 (14:00 HPF a 25 °C; **Máximo et al.**, 2008).

El momento hasta la formación de la larva pluteus de dos brazos observado en *E. michelini* presenta diferencias con respecto a algunas especies de equinoideos regulares como: *S. sphaeroides* y *L. variegatus*, cuyas larvas alcanzaron el estado equinopluteus de dos brazos luego de 34:00 HPF (24 °C) y 24:00 HPF (21 - 23 °C), respectivamente, bajo condiciones similares de temperatura (**Rahman et al.**, 2012; **Dominguez et al.**, 2017). En cuanto a la organogénesis del sistema digestivo en las especies mencionadas, incluida *E. michelini*, dicho sistema se formó con estómago, apertura de la cavidad oral y ano.

Nuestro estudio demuestra que el erizo de mar *E. michelini* es un modelo animal adecuado para investigaciones reproductivas y embrionarias debido a sus características de fácil inducción al desove, desarrollo rápido y claridad óptica de los embriones, y contribuye a la comprensión de los procesos biológicos que ocurren durante la ontogenia inicial de la especie. Además, los resultados obtenidos pueden tomarse como punto de partida para valorar la respuesta de este equinoideo ante las condiciones del cambio climático global y la elaboración de bioensayos de toxicidad.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad de Córdoba por facilitar el acceso a sus instalaciones y equipos. Asimismo, agradecen al Semillero de Investigación MARINOS, en especial a Jaifreth Sierra, Mayerlis Ramos y Ramón Hernández, por su acompañamiento en la fase de laboratorio. Agradecemos a los evaluadores y al Comité Editorial de la revista por sus valiosos aportes.

Contribución de los autores

CACV: conceptualización, investigación y redacción del borrador original; **CANP:** investigación, análisis formal y redacción, revisión y edición; **JLLV:** curaduría de datos, validación y redacción del borrador original; **JAQR:** adquisición de fondos, supervisión, visualización, redacción, revisión y edición.

Conflictos de intereses

El presente manuscrito fue preparado y revisado con la participación de todos los autores, quienes declaramos que no existe ningún conflicto de intereses que ponga en riesgo la validez de los resultados presentados.

Referencias

- Alvarado, J.J. & Solís-Marín, F.A.** (2013). Echinoderm research and diversity in Latin America. In Echinoderm research and diversity in Latin America. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-20051-9_1
- Amy, R.L.** (1983). Gamete sizes and developmental time tables of five tropical sea urchins. *Bulletin of Marine Science*, 33(1), 173-176.

- Borrero-Pérez, G.H., Benavides-Serrato, M., Díaz-Sánchez, C.** (2012). Equinodermos del Caribe Colombiano II: Echinoidea y Holothuroidea. Santa Marta, Serie de Publicaciones Especiales de INVEMAR No 30. 250p.
- Byrne, M. & Hernández J.C.** (2020). Sea urchins in a high CO₂ world: impacts of climate warming and ocean acidification across life history stages. *Developments in aquaculture and fisheries Science*, 43, 281-297. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819570-3.00016-0>
- Chiarelli, R., Martino, C., Roccheri, M.C.** (2019). Cadmium stress effects indicating marine pollution in different species of sea urchin employed as environmental bioindicators. *Cell Stress and Chaperones*, 24(4), 675-687. <https://doi.org/10.1007/s12192-019-01010-1>
- Collin, R., Rebollo A.P., Smith, E., Chan, K.Y.K.** (2021). Thermal tolerance of early development predicts the realized thermal niche in marine ectotherms. *Functional ecology*, 35, 1679-1692. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.13850>
- Contins, M. & Ventura, C.R.R.** (2011). Embryonic, larval, and post-metamorphic development of the sea urchin *Cassidulus mitis* (Echinoidea; Cassiduloida): an endemic brooding species from Rio de Janeiro, Brazil. *Marine biology*. 158(10), 2279-2288. <https://doi.org/10.1007/s00227-011-1732-5>
- De Santiago, W.G.A., Muñoz-Alvárez, A.I., Díaz-Martínez, J.P., Benítez-Villalobos, F.** (2023). Resemblances in the early development of two sea urchins: *Toxopneustes roseus* (Euechinoidea: Echinacea) and *Rhyncholampas pacificus* (Euechinoidea: Irregularia) from different habitats in the southern Mexican Pacific. *Developmental Biology*, 499, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.ydbio.2023.04.005>
- Dautov, S.S. & Kashenko, S.D.** (2008). Development of the sand dollar *Scaphechinus mirabilis*. *Russian Journal of Marine Biology*, 34(6), 415-420. <https://doi.org/10.1134/S1063074008060114>
- De Souza, E.** (2008). Desenvolvimento embrionário e larval de *Encope emarginata* (Leske, 1778) (Echinodermata: Echinoidea), e variações morfológicas interpopulacionais ao longo da costa brasileira entre 13° s e 30° s. Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Biológicas (Zoologia), Museu Nacional, Universidade Federal do Rio de Janeiro. 133p.
- Domínguez, A., Rosas, J., Velásquez, A., Cabrera, T., Mata.** (2007). Desarrollo, supervivencia y crecimiento del erizo *Lytechinus variegatus* (Lamarck, 1816) (Echinodermata: Echinoidea) alimentado con microalgas a dos salinidades y temperaturas diferentes. *Revista de biología marina y oceanografía*, 42(1), 49-57. <https://doi.org/10.4067/S0718-19572007000100006>
- Eckert, G. L.** (1995). A novel larval feeding strategy of the tropical sand dollar, *Encope michelini* (Agassiz): Adaptation to food limitation and an evolutionary link between planktotrophy and lecithotrophy. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 87(1), 103-128. [https://doi.org/10.1016/0022-0981\(94\)00174-C](https://doi.org/10.1016/0022-0981(94)00174-C)
- Emlet, R.B.** (1986). Facultative planktotrophy in the tropical echinoid *Clypeaster rosaceus* (Linnaeus) and a comparison with obligate planktotrophy in *Clypeaster subdepressus* (Gray) (Clypeasterida: Echinoidea). *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 95(2), 183-202. [https://doi.org/10.1016/0022-0981\(86\)90202-9](https://doi.org/10.1016/0022-0981(86)90202-9)
- Galarza-Verkovitch, D.C.** (2014). Modularidad y heterocronía en dos eventos del desarrollo embrionario de dos especies de erizo de mar (Familia: Echinometridae) con desarrollo planctotrófico y diferente tamaño de huevo. Tesis de Licenciatura en Ciencias Biológicas, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Puce, Quito, Ecuador. 99 p.
- Galindo-Anaya, A., Nisperuza-Pérez, C.A., Quirós-Rodríguez, J.A.** (2020). Aspectos poblacionales de *Encope michelini* (Clypeasteroida: Mellitidae) y asociación con el pinotérido *Dissodactylus crinitichelis* en el sector La Ahumadera, bahía de Cispatá, Caribe colombiano. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 91, e913456. <https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2020.91.3456>
- Gambardella, C., Marcellini, F., Falugi, C., Varrella, S., Corinaldesi, C.** (2021). Early-stage anomalies in the sea urchin (*Paracentrotus lividus*) as bioindicators of multiple stressors in the marine environment: Overview and future perspectives. *Environmental Pollution*, 287, 117-608. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117608>
- George, S.B., Young, C.M., Fenaux, L.** (1997). Proximate composition of eggs and larvae of the sand dollar *Encope michelini* (Agassiz): the advantage of higher investment in planktotrophic eggs. *Invertebrate Reproduction & Development*, 32(1), 11-19. <https://doi.org/10.1080/07924259.1997.9672599>
- Ghorani, V., Mortazavi, M.S., Mohammadi, E., Sadripour, E., Soltani, M., Mahdavi, N. S., Ghassemzadeh, V.** (2012). Determination of developmental stages of embryo in the Sea Urchin, *Echinometra mathaei*. *Iranian Journal of Fisheries Sciences*, 11(2), 294-304.

- Gilbert, S. F.** (2005). *Biología del desarrollo*. Ed. Médica Panamericana. 902 p.
- Hendler, G., Miller, J., Pawson, D., Kierp, P.** (1995). Sea stars, sea urchins, and allies echinoderm of Florida and the Caribbean. Smithsonian Institution Press, 199 p.
- Heyland, A. & Hodin, J.** (2014). A detailed staging scheme for late larval development in *Strongylocentrotus purpuratus* focused on readily-visible juvenile structures within the rudiment. *BMC developmental biology*, 14(22), 1-14. <https://doi.org/10.1186/1471-213X-14-22>
- Hilber, S.E. & Lawrence, L.M.** (2009). Analysis of Sediment and Gut Contents of the Sand Dollars *Mellita tenuis*, *Encope michelini*, and *Encope aberrans* off the Central Florida Gulf Coast. *Gulf of Mexico Science*, 27(1), 74-81. <https://doi.org/10.18785/goms.2701.08>
- Hinegardner, R.T.** (1969). Growth and development of the laboratory cultured sea urchin. *Biological Bulletin*, 137(3), 465-475. <https://doi.org/10.2307/1540168>
- Kipryushina, Y.O. & Yakovlev, K.V.** (2020). Maternal control of early patterning in sea urchin embryos. *Differentiation*, 113, 28-37. <https://doi.org/10.1016/j.diff.2020.04.001>
- Máximo, M.V., Mottola, L.S.M., Resgalla, C.J.** (2008). Sensibilidade do ouriço *Arbacia lixula* (Echinodermata: Echinoidea) em testes de toxicidade. *Journal of the Brazilian Society of Ecotoxicology*, 3, 47-52. <https://doi.org/10.5132/jbse.2008.01.007>
- McClay, D.R.** (2011). Evolutionary crossroads in developmental biology: sea urchins. *Development*, 138(13), 2639-48. <https://doi.org/10.1242/dev.048967>
- Morin, J.G., Kastendiek, J.E., Harrington, A., Davis, N.** 1985. Organization and patterns of interactions in a subtidal sand community on an exposed coast. *Marine Ecology Progress Series*, 27, 163–185. <https://doi.org/10.3354/meps027163>
- Nesbit, K.T., Fleming, T., Batzel, G., Pouy, A., Rosenblatt, H.D., Pace, D.A., Hamdoun, A., Lyons, D.C.** (2019). The painted sea urchin, *Lytechinus pictus*, as a genetically-enabled developmental model. *Methods in cell biology*, 150(5), 105-123. <https://doi.org/10.1016/bs.mcb.2018.11.010>
- Nesbit, K.T. & Hamdoun, A.** (2020). Embryo, larval, and juvenile staging of *Lytechinus pictus* from fertilization through sexual maturation. *Developmental Dynamics*, 249(11), 1334-1346. <https://doi.org/10.1002/dvdy.223>
- Olivares-Bañuelos, T., Figueroa-Flores, S., Carpizo-Ituarte, E.** (2012). Índice gonadal y desarrollo larvario de la galleta de mar *Dendraster excentricus* (Echinodermata; Echinoidea) en Baja California, México. *Ciencias marinas*, 38(2), 411-425. <https://doi.org/10.7773/cm.v38i2.1922>
- Pagano, G., Guida, M., Trifuggi, M., Thomas, P., Palumbo, A., Romano, G., Oral, R.** (2017). Sea urchin bioassays in toxicity testing: I. Inorganics, organics, complex mixtures and natural products. *Expert Opinion on Environmental Biology*, 6(1), 1-10. <https://doi.org/10.4172/2325-9655.1000142>
- Quirós-Rodríguez, J. A.** (2015). Equinodermos en fondos someros del sector La Ahumadera, Bahía de Cispatá, Córdoba, Caribe colombiano. *Acta Biológica Colombiana*, 20(1), 101-108. <https://doi.org/10.15446/abc.v20n1.42529>
- Rahman, M. A., Yusoff, F.M., Arshad, A., Shamsudin, M.N., Amin, S.M.N.** (2012). Embryonic, larval, and early juvenile development of the tropical sea urchin, *Salmacis sphaeroides* (Echinodermata: Echinoidea). *The Scientific World Journal*, 2012, 938482. <https://doi.org/10.1100/2012/938482>
- Sonnenholzner-Varas, J.I., Touron, N., Orrala, V.** (2018). Breeding, larval development, and growth of juveniles of the edible sea urchin *Tripneustes depressus*: A new target species for aquaculture in Ecuador. *Aquaculture*, 496(1), 134-145. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2018.07.019>
- Uthicke, S., Schaffelke, V., Byrne, M.** (2009). A boom-bust phylum? Ecological and evolutionary consequences of density variations in echinoderms. *Ecological Monographs*, 79(1), 3-24. <https://doi.org/10.1890/07-2136.1>
- Vellutini, B.C. & Migotto, A.E.** (2010). Embryonic, Larval, and Juvenile Development of the Sea Biscuit *Clypeaster subdepressus* (Echinodermata: Clypeasteroida). *PLoS ONE*, 5(3), e9654. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0009654>
- Wong, J.M., Kozal, L.C., Leach, T.S., Hoshijima, U., Hofmann, G.E.** (2019). Transgenerational effects in an ecological context: Conditioning of adult sea urchins to upwelling conditions alters maternal provisioning and progeny phenotype. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 517, 65-77. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2019.04.006>