

EL BAJO DE ESPÍRITU SANTO; PUNTO CALIENTE DE ABUNDANCIA BIOLÓGICA AFUERA DE BAHÍA DE LA PAZ

González-Rodríguez, Eduardo¹, Armando Trasviña-Castro¹ & Alejandro Ramos-Rodríguez²

¹Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Unidad La Paz. Miraflores No. 334 e/ Mulegú y La Paz. C.P. 23050. La Paz, B.C.S. México. ²Universidad Autónoma de Baja California Sur. Departamento Académico de Ciencias de La Tierra. Carretera al Sur KM 5.5., Apartado Postal 19-B, C.P. 23080, La Paz B.C.S., México. Autor de correspondencia: egonzale@cicese.mx

RESUMEN. El Bajo Espíritu Santo (EBES) es una montaña submarina localizada a 9 millas náuticas del extremo norte del archipiélago del Espíritu Santo, afuera de Bahía de La Paz, el cual es considerado un punto caliente de biodiversidad y biomasa. Algunos procesos que enriquecen el bajo son advección y transporte vertical, ocasionado principalmente por mareas y corrientes que chocan con la montaña. Asimismo, existe retención de organismos, particularmente zooplancton, causando enriquecimiento biológico. Así, para identificar la variabilidad de los procesos estacionales e interanuales que la afectan se realizó una revisión bibliográfica sobre hidrografía, dinámica y biología del EBES, que se complementa con análisis de series de tiempo utilizando información satelital sobre temperatura superficial del mar, clorofila superficial, productividad primaria neta y profundidad de la zona eufótica. Los resultados indican que dentro de los principales procesos que enriquecen al bajo se encuentran la mezcla debida al corte vertical de las corrientes, el transporte vertical ocasionado por corrientes de mareas que chocan con la montaña, la advección mediante chorros de corriente originados en el interior de la bahía y/o remolinos del Golfo de California, y la retención de organismos del zooplancton en la vecindad de la montaña por el obstáculo que esta impone. Se muestran dos periodos de productividad: primavera y verano, i.e., un régimen bimodal con periodos dominantes de 12 y 6 meses respectivamente. Adicionalmente, existe variabilidad inter-anual dominada por periodos de 5 y 7.5 años asociada a ENSO. La combinación de factores confiere a EBES capacidad de enriquecimiento de nutrientes y plancton a lo largo del año, lo que atrae consumidores secundarios y depredadores tope, convirtiéndolo en un punto de gran actividad biológica.

Palabras clave: Montaña submarina, Golfo de California, productividad biológica

Bajo Espiritu Santo; biological abundance hotspot off Bahia de La Paz

ABSTRACT. Bajo Espíritu Santo (EBES) is a submarine mountain located 9 nautical miles from the northern end of the Espíritu Santo archipelago, outside Bahia de La Paz. It is considered as a hotspot of biodiversity and biomass that has motivated studies to understand the processes that make it an area of high biological activity. Processes that enrich the EBES are advection and vertical transport, mainly caused by tides and currents that collide with the mountain. Also, there is retention of organisms, particularly zooplankton, which favors a biological enrichment. A review on hydrography, dynamics and biology is presented, complemented with time series analysis of satellite information on sea surface temperature, surface chlorophyll, net primary productivity, and euphotic zone depth, to identify the variability of seasonal and interannual processes affecting the mountain. The main processes that enrich EBES are mixture due to the vertical cut of the currents; the vertical transport caused by tidal currents that collide with the mountain; advection by jet currents originating in the interior of the bay and/or eddies from the Gulf of California; the retention of zooplankton organisms in the vicinity of the mountain. Two periods of productivity, one in spring and the other at late summer indicate a bimodal regime with dominant periods of 12 and 6 months respectively. Additionally, there is an inter-annual variability dominated by periods of 5 and 7.5 years associated with ENSO. Combination of these factors give EBES its ability for nutrient and plankton enrichment throughout the year, which attracts secondary consumers and top predators, turning it into a point of great biological activity.

Keywords: seamount, Gulf of California, biological productivity

González-Rodríguez, E., A. Trasviña-Castro¹ & A. Ramos-Rodríguez. 2018. El Bajo de Espíritu Santo; punto caliente de abundancia biológica afuera de Bahía de La Paz. *CICIMAR Oceánides*, 33(1): 13-24.

INTRODUCCIÓN

Las montañas submarinas, a menudo llamados ‘bajos’, son algunas de las formas más ubicuas del planeta, las cuales están presentes en densidades dispares en todas las cuencas oceánicas. Al ser de origen volcánico las montañas submarinas se encuentran, en su mayoría, sobre la corteza oceánica y en menor medida, extendidas sobre la corteza continental. Estas se generan en crestas oceánicas en el interior de placas, sobre plumas de surgencia (fuentes hidrotermales, “hotspots”) y en asentamientos de arcos convergentes de islas. La definición técnica de montañas submarinas indica que estas deben tener

una elevación mayor a 1000 m sobre el fondo marino; no hay razones geológicas para separar montañas submarinas de menor tamaño de sus contrapartes usando una altura de corte arbitraria (Menard, 1964; Wessel, 2007). Estos hábitats comprenden un ambiente de profundidad único que se caracteriza por presentar condiciones ambientales particulares, como corrientes, y que poseen una gran cantidad de fauna asociadas a ellos (Muhlia-Melo *et al.*, 2003).

Existen 3 características que definen a las montañas submarinas: 1) Se presentan desde los trópicos hasta los polos, lo que resulta en un amplio ámbito de condiciones fisicoquímicas y diferencias en las

tasas de producción primaria, con el consecuente aporte de energía a otros niveles tróficos. Dicha variabilidad conlleva que las comunidades respondan de igual manera a dicha variabilidad ambiental promoviendo que las montañas submarinas sean geográficamente diversas; 2) Cubren una amplia gama de profundidades, desde zonas someras en la zona eufótica hasta zonas abisales; donde, tanto el bentos como las comunidades pelágicas, se estructuran dada su profundidad, resultando en diversos tipos de comunidades; 3) Tienen diferentes edades e historias geológicas; la mayoría son de origen volcánico con rocas basálticas; y, los guyots (montes submarinos de cima plana) son comunes en los trópicos. Se reconoce que tanto el tipo de sustrato como la edad del hábitat influyen la composición de especies asociadas a ellas (Forges *et al.*, 2000; Samadi *et al.*, 2007).

La presencia de montañas trae consigo algunos efectos físicos debido a que su presencia causa cambios en los patrones de circulación, cambios en la estructura termohalina, y un engrosamiento de la capa de mezcla. Dichas características promueven una retención de nutrientes (enriquecimiento) que, aunado a las condiciones ambientales, genera un hábitat propicio para muchas especies (Roden, 1986).

En México hay una gran cantidad de montañas submarinas (bajos) y la región noroeste del país no es la excepción. En la porción suroeste del Golfo de California, existen al menos 10 bajos distribuidos a lo largo de la zona costera de la Península de Baja California (Fig. 1; Muhlia-Melo *et al.*, 2003); todas de relevancia biológica y económica, ya que atraen grandes peces pelágicos, incluyendo tiburones, como tiburón sedoso (*Carcharhinus falciformis*), tiburón martillo (*Sphyrna lewini*); picudos como el marlín rayado (*Kajikia audax*), marlín azul (*Makaira nigricans*), pez vela (*Istiophorus platypterus*), y el marlín negro (*Makaira indica*); atunes como el atún aleta amarilla (*Thunnus albacares*), barriletes (*Katsuwonus pelamis* y *Euthynnus lineatus*) y dorado (*Coryphaena hippurus*). Su presencia hace estas zonas altamente atractivas para el buceo, la pesca deportiva y la artesanal.

El presente trabajo recopila estudios que describen a la fecha las características físicas, biológicas y oceanográficas de El Bajo Espíritu Santo (EBES). El bajo es frecuentado por pescadores y buzos recreativos; los primeros en busca de atunes, dorados y picudos en general, mientras que los segundos son atraídos por los grandes cardúmenes de tiburones martillo que se congregaban en esta zona (Klimley & Butler, 1998).

El presente trabajo tiene como objetivos destacar de la literatura los principales aspectos del EBES que hacen de esta región un punto altamente diverso, así como un análisis de series de tiempo de variables oceanográficas para identificar la variabilidad

interanual en este monte submarino.

Aspectos generales de EBES

La montaña submarina EBES se localiza al sur del Golfo de California, cerca de 9 millas náuticas afuera de La Bahía de La Paz y fuera de la Isla Espíritu Santo, en los 24° 42' N y 110° 18' W (Fig. 1); está rodeada por un canal profundo al este que alcanza los 1000 m, mientras que las profundidades típicas en el resto alcanzan los 400 m, aproximadamente (Fig. 2); consiste de dos picos someros en direcciones norte y sur (~20 m de profundidad) a 100 m de distancia entre sí, con una profundidad igual entre el punto medio de su separación. Su elevación del suelo oceánico excede los 890 m (Klimley & Nelson, 1984).

Dicha montaña submarina es una zona de gran importancia biológica y económica debido a la gran cantidad de especies que utilizan esta zona como refugio y área de alimentación, lo cual es reconocido, entre otros aspectos por la gran cantidad de peces que se congregan en el área (Klimley & Butler, 1998; Muhlia-Melo *et al.*, 2003).

En general, respecto a las montañas submarinas, gran parte de los trabajos se orientan a la fauna bentónica (esponjas, corales, anémonas, etc.) asociados a este tipo de estructuras en otras regiones del mundo (Mullineaux & Mills, 1997; Forges *et al.*, 2000; Samadi *et al.*, 2007). Sin embargo, este no es el caso para EBES para el cual la mayoría de los trabajos se han orientado más a la fauna planctónica e íctica (González-Armas *et al.*, 2002; 2008), o enfatizando hacia los pelágicos mayores (Klimley & Nelson, 1981; 1984; Klimley & Butler, 1998; Muhlia-Mehlo, 1999; Muhlia-Mehlo *et al.*, 2003; Rodríguez-Romero *et al.*, 2005). Ello evidencia la escasez de estudios oceanográficos, pero a su vez refleja la importancia de continuar estudiando la región y el conocimiento que se requiere para entender todavía más este hábitat y su relevancia como ecosistema de la región. Los apartados siguientes, describen los resultados obtenidos para nutrientes, zooplancton y peces registrados en la región aledaña a EBES.

MATERIAL Y MÉTODOS

Se realizó una revisión de las investigaciones científicas en la región del EBES y áreas circunvecinas de influencia. Los aportes bibliográficos se dividieron en: a) Productividad y Nutrientes, b) Aportes externos, c) Comunidad de peces y d) Oceanografía.

Asimismo, dado que los trabajos encontrados se refieren a estudios puntuales en el tiempo, y a partir de que, actualmente, el registro de sensores remotos satelitales de carácter oceanográfico cuenta con series de al menos 15 años, es posible identificar las variaciones oceanográficas interanuales en el EBES mediante el uso de esta información. Para ello se descargaron y procesaron datos de temperatura su-

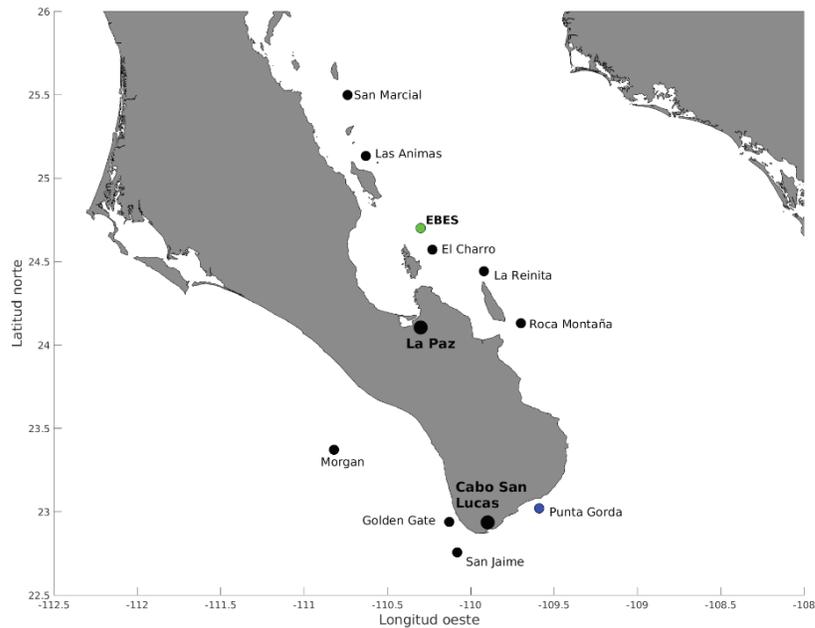


Figura 1. Montañas submarinas en la porción suroeste del Golfo de California y la costa occidental y la punta de la Península de Baja California (de acuerdo a Muhlia-Melo *et al.*, 2003). El círculo en color verde indica El Bajo Espíritu Santo (EBES).

perficial del mar (TSM), clorofila superficial (CLO), productividad primaria neta (PPN) y zona eufótica (ZEU).

Para TSM se utilizaron datos diarios de nivel 4 de 1x1 km, 2002-2017 del programa GHRSSST. (<https://www.ghrsst.org>). para CLO, se emplearon

datos diarios de nivel 4 de 4x4 km, 2002-2017 del programa COPERNICUS (<http://marine.copernicus.eu/>); de PPN, se descargaron datos mensuales de nivel 4 de 9x9 km, del modelo VGPM de la universidad de Oregon, USA (<http://www.science.oregonstate.edu/ocean.productivity/index.php>); y de ZEU, se descargaron datos mensuales de nivel 3

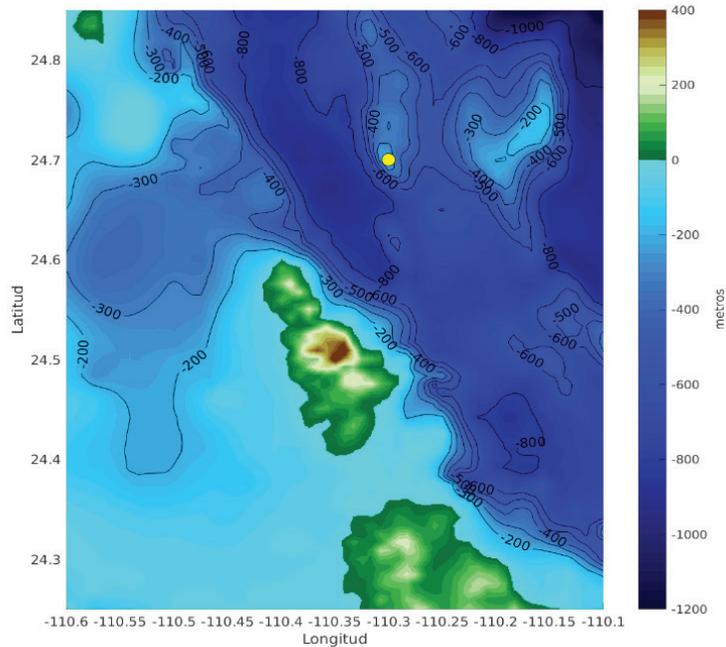


Figura 2. Batimetría en las inmediaciones de EBES (círculo amarillo) a partir de datos de GEBCO (<http://www.gebco.net>), con una resolución espacial de 30 segundos de arco.

de 4x4 km, del OceanColor home page de la NASA (<https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>); como estos contienen información global fue necesario extraer la información correspondiente al EBES, localizada en la longitud 100.3°W y latitud 24.7°N, para cada variable. Con estos datos se construyeron series de tiempo para los periodos de cada variable; en el caso de los datos diarios TSM y CLO se les aplicó el filtro de Lanczos de paso bajo con una ventana de 30 días (Emery & Thompson, 2004) para hacerlos comparables con los datos mensuales de PPN y ZEU.

Con la finalidad de determinar las principales frecuencias (periodos) en las series de tiempo, así como como el porcentaje de explicación de dicha frecuencia con respecto a la variación total de la serie, se realizó la extracción de los principales componentes armónicos; para ello se utilizó la técnica descrita por González-Rodríguez *et al.* (2015).

RESULTADOS

Productividad y Nutrientes

Existen pocos trabajos que exploren estas características en EBES. Por ejemplo, para la región, los trabajos de Verdugo-Díaz *et al.* (2006; 2008) son pioneros, donde se estudian nutrientes y productividad primaria para EBES. Estos autores realizaron muestreos durante octubre y diciembre de 2004 y febrero y mayo de 2005, empleando un perfilador de fluorescencia natural (PNF-300) para determinar la productividad primaria, y por medio de muestras de agua analizaron nutrientes inorgánicos (nitritos, nitratos y fosfatos).

En el estudio de 2004 y 2005, Verdugo-Díaz *et al.* (2006) reportan que en EBES se presenta un pulso de productividad con un valor integrado (0 a 100 m) de 115.18 mg C m⁻² h⁻¹, asociado con la profundidad de la termoclina y a la disponibilidad de nutrien-

tes. Este pulso se presentó en mayo de 2005 (Fig. 3d), cuando los vientos que provienen de Bahía de La Paz hacia afuera de la costa son más intensos y generan una capa de mezcla mayor de ~50 m. Mayo sobresale por ser el único periodo cuando el máximo de productividad se encuentra en la base de la termoclina, lo que es típico de sistemas de mesoescala o de surgencia. El resto de los muestreos, octubre y diciembre de 2004 y febrero de 2005 presentaron valores de menor productividad integrada (51.03, 53.85 y 33.20 mg C m⁻² h⁻¹, respectivamente; Figs. 3a, 3b 3c). En diciembre y febrero se observaron valores mínimos de productividad integrada, pero con máximos de productividad puntual en superficie (Fig. 3).

En cuanto a los nutrientes, presentan valores máximos durante diciembre, cuando la capa de mezcla es más profunda, seguido por febrero (Verdugo-Díaz *et al.*, 2006). En contraste, los valores mínimos se observan en mayo, cuando hay más productividad, y en octubre. Los nitritos presentaron un valor máximo de 0.28 µM y un mínimo de 0.01 µM. Los nitratos mostraron valores de 2.8 y 0.1 µM, respectivamente para los mismos meses, mientras que los fosfatos observaron 0.29 y 0.08 µM. Los autores asocian los valores de nutrientes a la actividad biológica. Por ejemplo, los valores mayores para nutrientes durante los meses fríos en zonas subtropicales ya han sido documentados y se relacionan con proliferaciones de grupos fitoplanctónicos de mayor tamaño como diatomeas (Martínez-López *et al.*, 2001).

En el trabajo de Verdugo-Díaz *et al.* (2008) se muestran resultados de productividad en 4 estaciones aledañas a EBES durante febrero 2005 (Fig. 4) realizando un comparativo entre dichas estaciones y 4 estaciones en una montaña submarina localizada cerca de Cabo San Lucas, B.C.S., conocida como

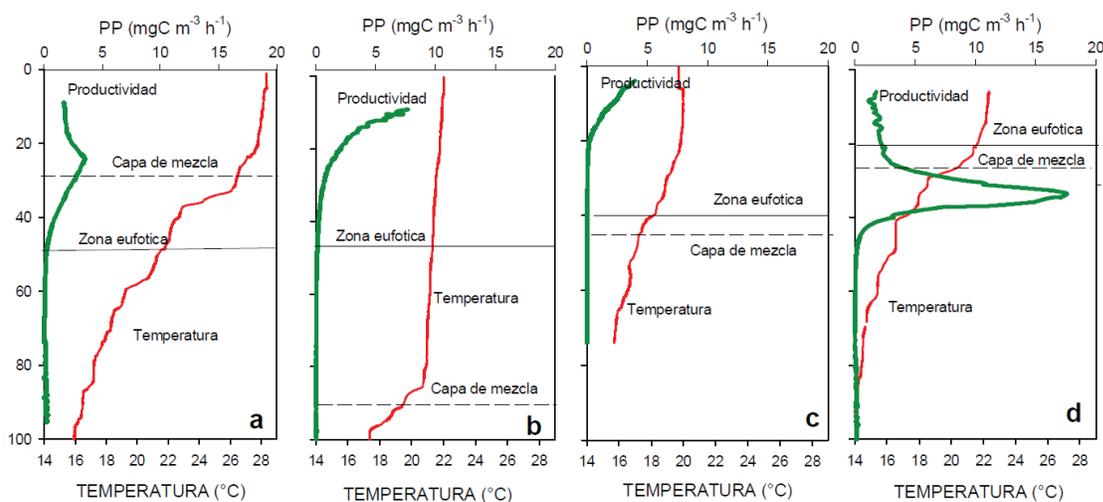


Figura 3. Perfiles de productividad primaria y temperatura para el EBES. Se muestran los meses de a) octubre y b) diciembre de 2004, c) febrero y d) mayo de 2005. La línea roja indica la temperatura (eje inferior), mientras que la línea verde indica la productividad primaria (modificada a partir de Verdugo-Díaz *et al.*, 2008)

Bajo Gorda (Fig. 1). Los valores de productividad primaria en EBES son similares entre sí, con máximos sub-superficiales de entre 5 y 6 mg C m⁻³ h⁻¹; además, no se observa una termoclina bien definida, la capa de mezcla tiene una profundidad de alrededor de 50 m, y la temperatura para los primeros 100 m de profundidad se ubica entre los 20 y 15°C. En comparación, El Bajo Gorda presenta valores máximos de productividad sub-superficial inferiores a los de EBES (<3 mg C m⁻³ h⁻¹) y prácticamente no se detecta productividad por debajo de los 20 m. Respecto a nutrientes, para EBES, los fosfatos variaron entre 0.55 y 0.71 µM; los nitratos presentaron un rango entre 0.42 y 1.1 µM; mientras que los nitritos presentaron las menores concentraciones, variando entre 0.034 y 0.01 µM. Para El Bajo Gorda los fosfatos se encontraron entre 0.30-0.34 µM; los nitratos entre 0 y 0.56 µM, y los nitritos entre 0 y 0.008 µM.

Los datos mostrados para productividad y nutrientes para EBES, aunque con un periodo de estudio corto sugieren estacionalidad para la región. Los niveles de productividad cambian; son bajos en

otoño e invierno y se elevan a finales de primavera. No se observan valores tan altos como los que se esperan en una zona de surgencias.

Aportes externos

El Bajo Espíritu Santo es una zona con gran importancia para el zooplancton debido principalmente a las características físicas y oceanográficas que ofrece para estas formas de vida. En este sentido, Valle-Levinson *et al.* (2004) registraron observaciones de un perfilador acústico Doppler de corrientes a ~1 km de la cresta norte de EBES a 300 m de profundidad. Además de medir corrientes, este equipo documenta el arribo de zooplancton que se distingue por su migración vertical. El transductor quedó a 50 metros del fondo marino, orientado hacia la superficie. Dicho sensor registró información de junio a diciembre de 1999. Sus resultados indican agrupaciones zooplancónicas que descienden entre las 05:30 y 07:00 h; mientras que los ascensos ocurren cerca de la puesta del sol entre las 18:00 y 20:00 h (Fig. 4). Asimismo, los autores inferen que, por la frecuencia del perfilador, detectan organismos del

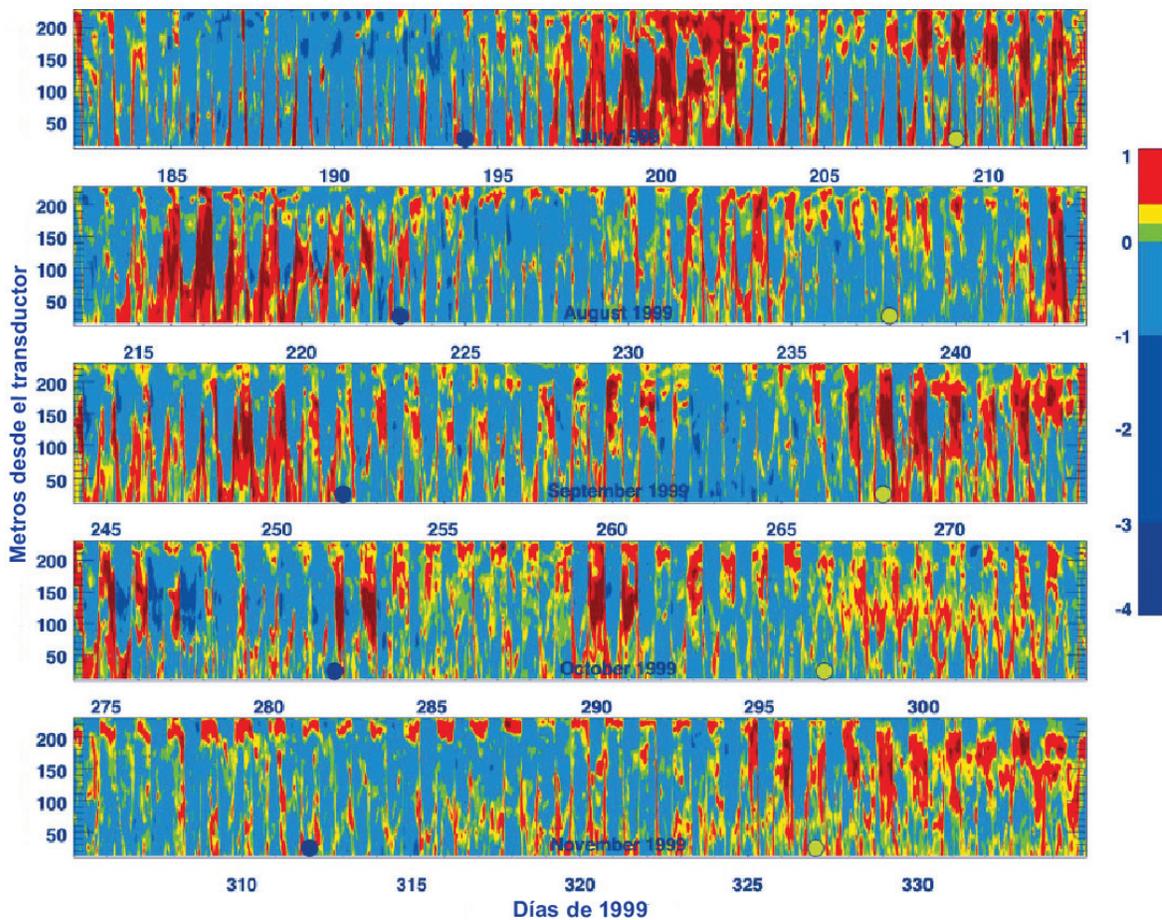


Figura 4. Contornos de la anomalía de la intensidad de la señal acústica vs. profundidad. Los círculos amarillos y oscuros indican los días de luna llena y nueva, respectivamente. Se observan máximos (en rojo) de intensidad de señal acústica que corresponde al arribo de biomasa de zooplancton dentro de remolinos (tomada de Valle-Levinson *et al.*, 2004).

zooplancton entre 1 y 4 mm de diámetro, del tamaño de copépodos, pterópodos, larvas de peces y eufáusidos (Rippeth & Simpson, 1998; Pinot & Jansa, 2001). La figura 4 muestra máximos en la intensidad de la señal acústica (equivalentes a incrementos en biomasa de zooplancton) que coinciden con el paso de un remolino de mesoescala sobre el EBES. Estos remolinos acarrear biomasa de las zonas de surgencia de la costa de Sinaloa hacia EBES.

Comunidades de Peces

En una serie de muestreos de ictioplancton realizados en EBES entre noviembre de 1995 y diciembre de 1996, se registraron 2107 larvas de peces, las cuales fueron identificadas y agrupadas en 48 familias, 84 géneros y 76 especies (González-Armas, 2002; González-Armas *et al.*, 2008). Estas representan cerca del 30% del total de las especies de peces del Golfo de California. Las familias que contribuyen con el mayor número de especies fueron: Blenniidae (4), Carangidae (1), Clupeidae (1), Exocoetidae (1), Myctophidae (1), Scombridae (5) y Serranidae (7).

Los taxa numéricamente dominantes están representados por individuos cuyos adultos pertenecen al hábitat mesopelágico, arrecifal y pelágico costero; especies de pelágicos mayores de origen oceánico también estuvieron presentes, aunque fueron más escasas. En general, el número de larvas se incrementa durante los meses de invierno, que corresponde con temporada de surgencias en zonas aledañas, y disminuye en los meses cálidos. Sin embargo, el número de especies es mayor de primavera a otoño y menor en invierno.

González-Armas *et al.* (2002) determinaron la influencia de EBES en la distribución y abundancia del zooplancton mediante muestreos durante un crucero oceanográfico en junio de 1999. Registraron 25 grupos de zooplancton (16 holoplanctónicos y 9 meroplanctónicos). Particularizando en copépodos, se registraron 46 especies, principalmente oceánicas, pero encontrando también lagunares y costeras. Esto último se explicó por la presencia de un frente termohalino proveniente de Bahía de La Paz que advectó nutrientes y plancton de origen costero.

Existen algunos trabajos que muestran la importancia de EBES en la ecología de las comunidades pelágicas de la región. Se consideran trabajos pioneros en EBES los realizados por Klimley y Nelson (1981; 1984) y Klimley y Butler (1998). Estos trabajos se enfocan en el tiburón martillo, sus movimientos y hábitos sociales, entre otros aspectos. En dichos trabajos se enfatizan las condiciones de EBES para ofrecer recursos a éstas y otras especies pelágicas planctívoras y depredadoras; es de notar particularmente la presencia de especies planctívoras como el cocinero, el pámpano, la manta y el tiburón ballena, cuando existen altas concentraciones de zooplancton. Como resultado de dicha abundancia,

depredadores como el mismo tiburón martillo y el huachinango, se hacían presentes. Posteriormente, Klimley y Butler (1998), estudiaron agrupaciones de peces mediante buceo y relacionan la presencia y abundancia de dichas agrupaciones con determinadas condiciones oceanográficas detectadas mediante satélite; observaron una relación directa con la temperatura y la clorofila, es decir, las agregaciones de peces tienden a hacerse presentes durante la advección de aguas cálidas y/o ricas en clorofila, disminuyendo durante la advección de aguas frías y/o bajas en nutrientes. Asimismo, mediante marcaje, notaron que EBES es un lugar frecuentado por algunas especies de tiburones y atunes que suelen realizar estadias cortas para regresar posteriormente de manera recurrente.

Resultados similares fueron obtenidos por Muhlia-Mehlo (1999) y Muhlia-Mehlo *et al.* (2003) mediante buceos realizados de diciembre de 1995 a diciembre de 1998, cuando se registró una mayor abundancia de especies pelágicas durante El Niño de 1997 (85 especies) que respecto al año anterior (1996, 57 especies). Durante las condiciones de El Niño, se registraron especies de afinidad más tropical, como son el atún aleta amarilla, pargos, cardenal y cabrilla arenosa. Asimismo, se realizaron experimentos de marcaje en 23 individuos de atún aleta amarilla y un tiburón sedoso entre abril y septiembre de 1998, registrando su presencia hasta febrero de 2000. Sus resultados indican que algunos atunes frecuentaron el bajo hasta 18 meses después del marcaje, siguiendo patrones de ausencia de entre 2 y 15 días.

Posteriormente, Rodríguez-Romero *et al.* (2005) describieron las comunidades de especies de peces en EBES y la Isla Espíritu Santo mediante transectos, realizando buceos en ambos sitios para el periodo de octubre de 1995 a noviembre de 1996. Sus resultados muestran agrupaciones en ambos sitios, con un total de 67 especies permanentes y 53 especies estacionales que en conjunto representan 36% de 333 especies de peces en el Golfo de California (Thomson *et al.*, 2000). Sin embargo, existen diferencias claras entre EBES y la Isla Espíritu Santo; por ejemplo, EBES registró un total de 83 especies, de las cuales 14 no estaban presentes en la isla; mientras que la isla registró 106 especies, de las cuales 34 no estaban presentes en EBES. Este último registra dominancia de especies de índole más pelágico, mientras que la isla presenta dominancia de especies arrecifales.

Ketchum *et al.* (2013) estudiaron la presencia y segregación del tiburón ballena en la región suroeste del Golfo de California. Sus resultados indican que el EBES es frecuentado por esta especie, desde juveniles a adultos de ambos sexos, con mayores avistamientos de mayo a junio, que concuerdan con los periodos de advección mencionados por González-Armas *et al.* (2002).

Finalmente, Jorgensen *et al.* (2016) realizaron 53 censos visuales submarinos mediante transectos lineales, registrando un total de 27 especies distribuidas en 7 familias. Estos autores registran una distribución temporal en las especies basada en la temperatura superficial y a 30m de profundidad, y definieron 3 agrupaciones: una de invierno-primavera (temperaturas bajas, $<25^{\circ}\text{C}$), otra de verano-otoño (temperatura cálida, $>25^{\circ}\text{C}$) y otra donde las especies se registran a lo largo de todo el año. Por ejemplo, encuentran especies como el jurel en la época fría ($\sim 20^{\circ}\text{C}$) y algunos lutjánidos bajo temperaturas más altas ($>27^{\circ}\text{C}$).

Características oceanográficas de EBES

En EBES ocurren procesos oceanográficos a diferentes escalas de tiempo que inducen la mezcla vertical y promueven el enriquecimiento de la columna de agua. Estos procesos pueden ser corrientes de marea, corrientes asociadas al paso de remolinos y mezcla por viento (Trasviña-Castro *et al.*, 2003).

Con respecto a los remolinos en la región, Emilsson y Alatorre (1997) fueron los primeros en reportar la presencia de giros después de examinar observaciones hidrográficas y el rastro de una boya de deriva en agosto de 1978. Desde entonces, la presencia de remolinos y corrientes de chorro en el Golfo de California ha sido reportado mediante imágenes satelitales de color e infrarrojas (Gaxiola-Castro *et al.*, 1999; Pagau *et al.*, 2002). Además, a partir del trabajo pionero de Hamman *et al.* (1988), estos

autores sugieren la posibilidad de que los filamentos funcionen como mecanismos de transporte de huevos y larvas en el Golfo de California. Figueroa *et al.* (2003) examinaron datos hidrográficos históricos del Golfo de California, encontrando que en la porción sur del mismo se presentan giros ciclónicos y anticiclónicos que alcanzan, al menos 500 m de profundidad. Amador-Buenrostro *et al.* (2003), muestran la presencia de un remolino al oeste de la bahía que influencia a EBES (Fig. 5); este es similar al reportado por Emilsson y Alatorre (1997), y alcanza unos 120 km de ancho.

De manera similar a la marea, las brisas son fenómenos de período diario. Trasviña-Castro *et al.* (2003) muestran un ejemplo de brisa que sopla desde tierra sobre Bahía de La Paz, y alcanza EBES. En dicho trabajo se usan datos hidrográficos e imágenes satelitales para describir el impacto de un viento local durante junio (Fig. 6). Este genera una salida de agua de baja temperatura desde Bahía de La Paz que alcanza la región sobre el EBES. El forzamiento se debe a rachas de viento intenso de horas de duración, muy comunes en mayo y junio en Bahía de La Paz. Dichos eventos se conocen como vientos ‘Coromuel’ y provienen de la costa del Pacífico. Klimley y Butler (1998) ya habían reportado condiciones similares en imágenes de satélite de EBES. Trasviña-Castro *et al.* (2003) describieron otros procesos que influyen en la dinámica superficial sobre EBES y aportan nutrientes. Estos autores reportan un incremento del corte vertical de las corrientes

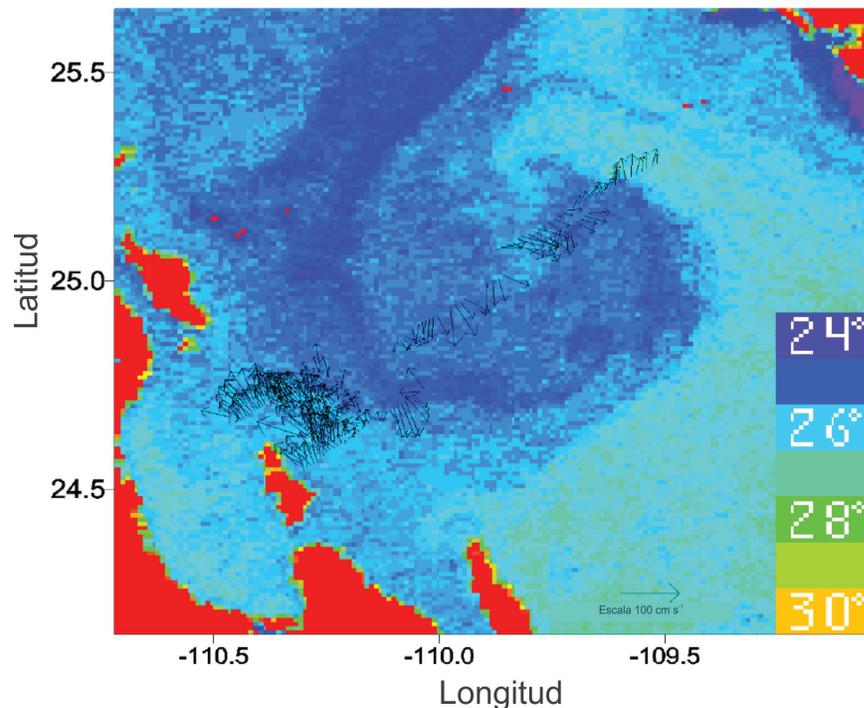


Figure 5. Imagen de satélite del 17 noviembre de 1995 mostrando la temperatura superficial del mar. Obsérvese la presencia de un giro ciclónico afuera de la Bahía de La Paz. Las flechas indican la corriente superficial, calculada mediante un perfilador acústico Doppler (tomada de Amador-Buenrostro *et al.*, 2003).

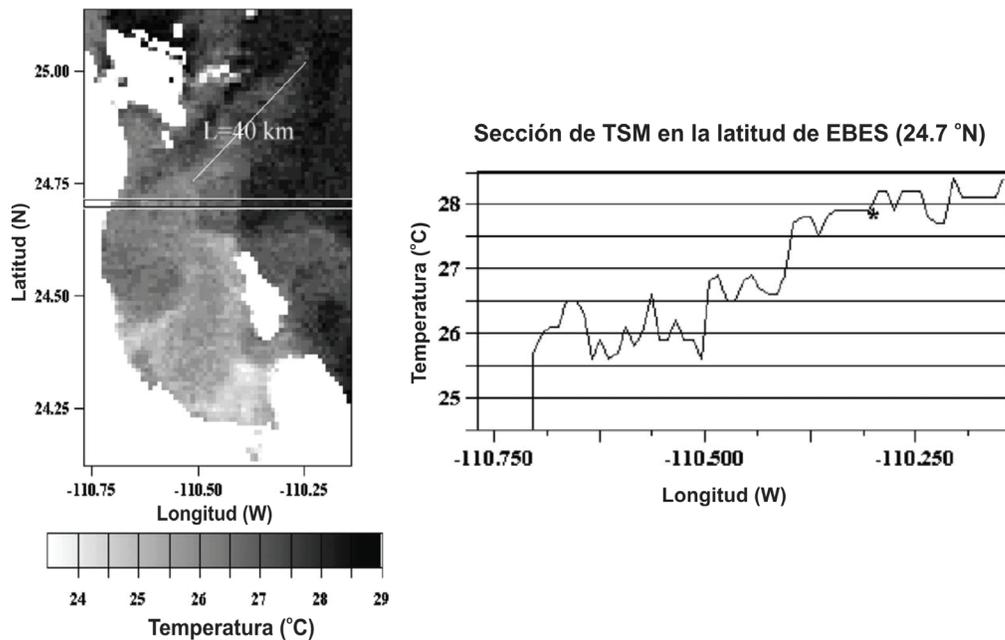


Figura 6. a) Imagen de temperatura superficial del mar del satélite AVHRR (izquierda). Imagen del día 18 de junio de 1999. Nótese el agua de menor temperatura proveniente de la bahía de la Paz. b) La figura de la derecha muestra las temperaturas a lo largo del transecto indicado a la izquierda (tomada de Trasviña-Castro *et al.*, 2003).

sobre la cima del bajo que genera inestabilidad dinámica y mezcla. La figura 7a muestra una región de inestabilidad sobre la cima de EBES. La mezcla vertical es un mecanismo de fertilización del océano superior por el cual llegan a la superficie agua rica en nutrientes. También existe un cambio de la estructura tridimensional de las corrientes por la presencia de la montaña submarina. Trasviña-Castro *et al.* (2003) muestran cómo la temperatura varía con la marea de manera periódica, lo que conlleva que las temperaturas sobre el bajo disminuyen hasta 7 grados. Este proceso es más intenso en mareas vivas y se atribuye a la elevación de la estructura vertical y consiguiente ascenso de las corrientes, cuando la corriente de marea choca con el obstáculo (Fig. 7b). Roden y Taft (1982) reportan observaciones parecidas en los flancos de las montañas Emperador, en el centro del Pacífico Norte, consistentes con procesos de afloramiento y hundimiento.

Variabilidad interanual; series derivadas de sensores remotos

Las series de tiempo para el periodo julio 2002-abril 2017, se obtuvieron sobre la cima de EBES para observar la variación de TSM, CLO, PPN y ZEU (Fig. 8). La serie de TSM muestra un comportamiento claramente estacional a lo largo de todo el periodo. Las temperaturas mínimas ($\sim 20^{\circ}\text{C}$) ocurren en invierno (febrero-marzo), mientras que las máximas ($\sim 30^{\circ}\text{C}$) se presentan en verano-otoño (septiembre-octubre); el promedio de toda la serie es de 25°C .

La serie de CLO también presenta un patrón estacional, pero no tan claro como el de la TSM; a simple vista se nota una frecuencia bimodal en la mayoría de los años. Los picos máximos se observan a inicios del invierno (finales de diciembre y/o principios de enero) con valores superiores a 2 mg m^{-3} y en primavera (junio) con valores entre 1 y 2 mg m^{-3} ; el promedio de toda la serie fue de 0.62 mg m^{-3} .

La serie de PPN muestra un patrón estacional con valores máximos en diciembre-enero, similar a CLO. Los picos máximos se registraron en 2006, 2008 y 2017 con valores mayores a $3500 \text{ mg C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. En 2004, 2007-2009, 2012 se aprecia un segundo pico de menor intensidad con valores por encima de la media del periodo ($1031 \text{ mg C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$). Los valores mínimos estuvieron por debajo de los $500 \text{ mg C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ en otoño.

La serie de ZEU también muestra un patrón claramente estacional con máximos (de hasta 80 m) en verano y mínimos en invierno (20 m); el promedio de la serie es de 46.5 m . A simple vista también se observa el patrón bimodal anual y en contra-fase con las series de CLO y PPN.

Las cuatro series indican claramente que el patrón dominante es el estacional, con una relación directa entre CLO y PPN, e inversa entre PPN, TSM y ZEU. Es decir, cuando la PPN incrementa, ésta se asocia a un aumento en la CLO y a una disminución en la TSM y en la penetración de la luz.

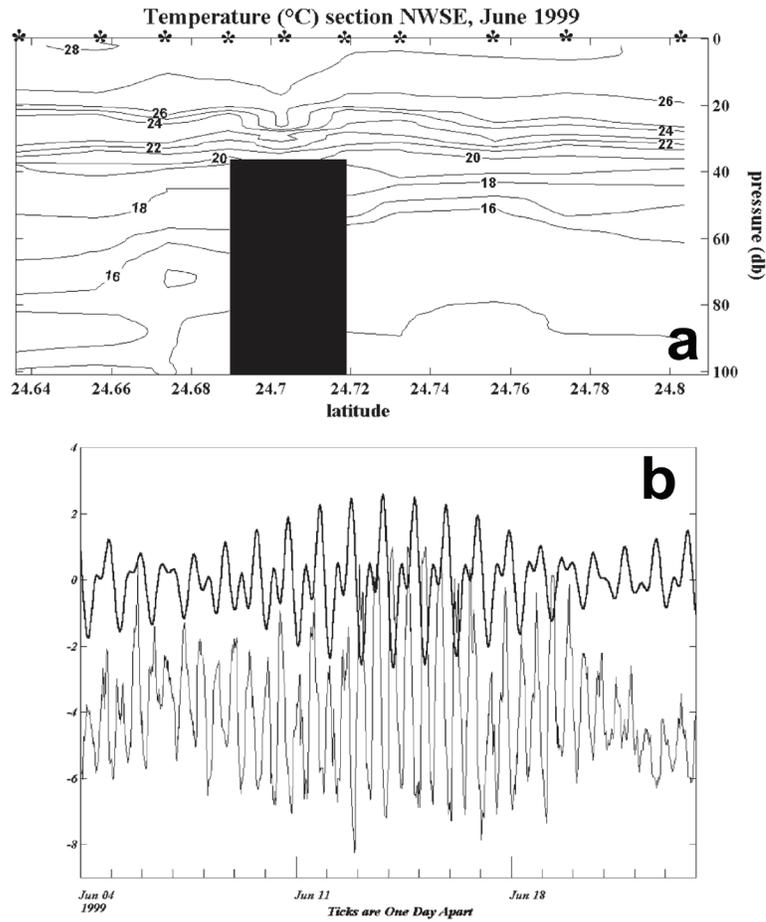


Figura 7. a) Corte latitudinal sobre el EBES (cuadro negro), note la inestabilidad en la superficie el mismo. b) Nivel del mar (sin tendencia, línea gruesa) y temperatura superficial (sin tendencia y sin promedio). Durante mareas vivas se observan fluctuaciones de temperatura intensas de hasta 7oC cada 12 horas

El análisis de frecuencias de las series se presenta en la tabla 1. Para efectos del presente estudio solo se presentan los 4 principales armónicos significativos. Los resultados indican que los periodos más importantes son de 12 y 6 meses para las 4 series, lo que confirma que la variación está dominada por la frecuencia estacional y semestral que se observó visualmente en las series. Los porcentajes de explicación de la variabilidad de la frecuencia de 12 meses fueron 0.86, 0.33, 0.6 y 0.46 para TSM, CLO, PPN y ZEU, respectivamente; para la de 6 meses

fueron 0.028, 0.124, 0.106 y 0.176. Los periodos 3 y 4 correspondieron a periodos interanuales con valores de 91 y 61 meses para TSM, 68 y 106 meses para CLO, 64 y 90 meses para PPN y 60, y 82 meses para ZEU. Estos resultados señalan que la variabilidad en EBES está modulada primero por la variabilidad intra-anual (entre el 60 y 90% de la variación), seguida por fenómenos interanuales entre 5 y 7.5 años que explican ~10% de la variación.

DISCUSIÓN

Tabla 1. Periodos y porcentaje de variación explicada acumulada por los mismos para las series de temperatura, clorofila, productividad primaria y zona eufótica

TSM		CLO		PPN		ZEU	
Periodo	%	Periodo	%	Periodo	%	Periodo	%
12	0.866	12	0.328	12	0.6	12	0.437
6	0.894	6	0.452	6	0.706	6	0.613
91	0.901	68	0.5	64	0.727	60	0.642
61	0.911	106	0.533	90	0.731	82	0.658

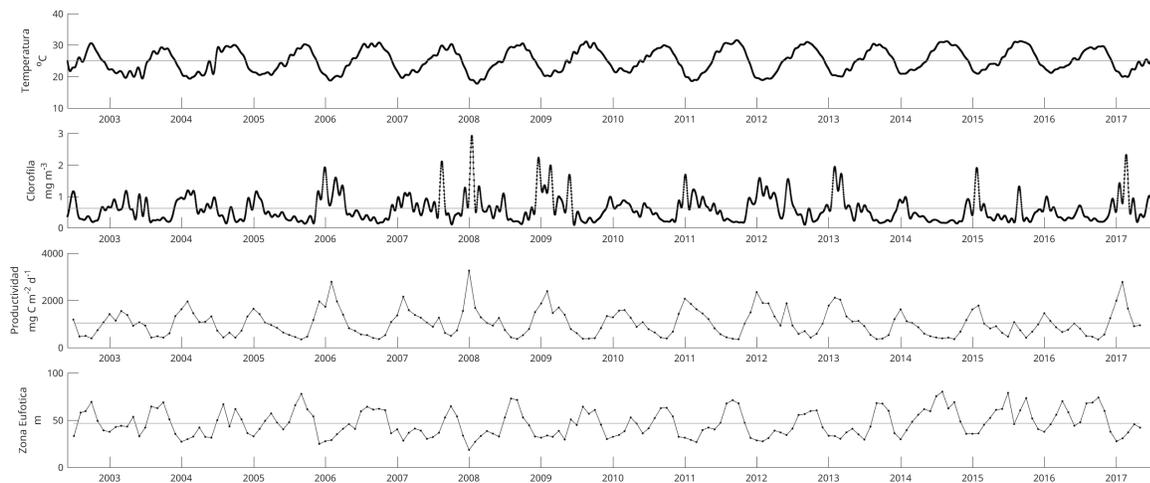


Figura 8. Series de a) temperatura superficial del mar, b) clorofila-*a*, c) productividad primaria y d) zona eufótica, tomadas de diferentes sensores (ver sección de métodos).

Diversos autores, así como los resultados de PPN, indican que en realidad la productividad del EBES no es particularmente alta en comparación de regiones de alta productividad, como zonas de surgencia. ¿Qué es, entonces, lo que provoca que esta región mantenga una comunidad diversa de zooplancton a lo largo de los muestreos realizados? Existen varias explicaciones. La advección desde Bahía de La Paz aporta nutrientes que enriquecen el EBES y zonas aledañas, promoviendo una diversidad alta de especies. Esto es reportado por González-Armas *et al.* (2002) quienes registran especies de copépodos oceánicas y costeras sobre esta montaña. Trasviña-Castro *et al.* (2003) reportan, además, la presencia de un frente de agua fría proveniente de Bahía de La Paz, inducido por una brisa de tierra en junio de 1999. Estas brisas son comunes en mayo y junio. Esto mismo se refleja en los valores de productividad para mayo reportados por Verdugo-Díaz *et al.* (2008) como los más altos del año.

Los factores físicos que propician agregación de organismos también han sido estudiados. Los estudios oceanográficos realizados en EBES no encuentran presencia de remolinos o columnas de Taylor atrapados sobre la montaña. En latitudes medias ($> 30^\circ$ de latitud) los fenómenos de período diurno (marea, brisas) son capaces de crear remolinos que se atrapan por la topografía. Sin embargo, en esta latitud (24.5°N) el período inercial es de 29 h y, consecuentemente, las brisas y la marea de período diurno son demasiado rápidos para generar un remolino estable (geostrofico). En una montaña submarina subtropical como EBES, los mecanismos de retención de zooplancton son distintos a los de latitudes medias. En invierno las estructuras de mesoescala (remolinos, filamentos) en la mitad sur del Golfo de California son capaces de un transporte significativo de plancton, incluyendo huevos y larvas de

peces (Hamman *et al.*, 1988; Green-Ruiz & Hinojosa-Corona, 1997). Amador-Buenrostro *et al.* (2003) reportan un giro de mesoescala al este de EBES que afecta los campos hidrográficos (Fig. 5). Valle-Levinson *et al.* (2004) documentan el arribo de nubes de zooplancton a EBES y lo atribuyen al arribo de un remolino de mesoescala. Estos autores concluyen que la persistencia de las señales de migración vertical atribuible al zooplancton es un aspecto importante y novedoso que puede atribuirse a episodios advectivos por remolinos de mesoescala que inyectan organismos a la región. Proponen, además, que una vez que los organismos llegan a las áreas adyacentes a EBES, aquellos que presentan migración vertical exhiben un mayor grado de retención en la vecindad de la montaña; permanecen en áreas con fondos marinos someros (< 200 m) porque se limitan sus migraciones verticales. El obstáculo que representa la montaña evita que se alejen rápidamente; por esto permanecen más tiempo e incrementan la abundancia de alimento en beneficio de los niveles tróficos superiores. La advección por remolinos y la retención por la presencia del obstáculo se combinan para explicar agregación sobre EBES.

Por último, Trasviña-Castro *et al.* (2003) reportan dos procesos adicionales: mezcla debido al corte vertical de las corrientes y descensos bruscos de temperatura durante mareas vivas (Fig. 7). Esto es consistente con la existencia de: **a**) corrientes intensas sobre EBES, y **b**) eventos de afloramiento debido a la interacción de la marea con EBES. Este último se intensifica en mareas vivas y es un mecanismo periódico de fertilización de la superficie de EBES.

La variación estacional de los fenómenos descritos (brisas de tierra en primavera-verano, remolinos de mesoescala en invierno) se reflejan en el patrón estacional bimodal de las series CLO, PPN

y ZEU, y los armónicos con mayor explicación de variancia (Tabla 1, Fig. 8). Por otro lado, la variación interanual está dominada por una señal cuya frecuencia oscila entre 60 y 90 meses (Tabla 1); de acuerdo con Philander (1990) y Trenberth (1997) esta corresponde a la ocurrencia de la fase positiva de un ENSO.

Los cambios en las agregaciones de peces también han sido relacionados con la variabilidad hidrológica. Klimley y Butler (1998) y Jorgensen *et al.* (2016) reportan la ocurrencia de diferentes especies pelágicas de acuerdo con la influencia de diferentes masas de agua.

REFERENCIAS

- Amador-Buenrostro, A., A. Trasviña-Castro, A. Muhlia-Melo & M.L. Argote-Espinoza. 2003. Influence of EBES seamount and Farallon basin on coastal circulation in the Gulf of California, Mexico. *Geofísica Internacional*, 42(3): 407-418
- Boehlert, G. W., W. Watson & L. C. Sun. 1992. Horizontal and vertical distributions of larval fishes around an isolated oceanic island in the tropical Pacific. *Deep Sea Res.*, 39: 439-46 . [https://doi.org/10.1016/0198-0149\(92\)90082-5](https://doi.org/10.1016/0198-0149(92)90082-5)
- Emery, W. J. & R.E. Thomson. 2004. *Data Analysis Methods in Physical Oceanography*. Elsevier.
- Emilsson, I. & M.A. Alatorre. 1997. Evidencias de un remolino ciclónico de mesoescala en la parte sur del Golfo de California. 173–182, *In*: Lavín, M.F. (Ed.), *Contribuciones a la Oceanografía Física en México*. Monografía No. 3. Ensenada, B.C., México: Unión Geofísica Mexicana.
- Figueroa-Rodríguez, J.M., S.G.L. Marinone-Moschetto & M.F. Lavín-Peregrina. 2003. A description of geostrophic gyres in the southern Gulf of California. 237-255, *In*: Velasco-Fuentes, O.U., J. Sheinbaum & J.L. Ochoa-de la Torre. (Eds) *Nonlinear Processes in Geophysical Fluid Dynamics*. Kluwer Academic Pub. ISBN: 1-4020-1589-5. (PA: 9657) https://doi.org/10.1007/978-94-010-0074-1_14
- Forges, B.R., J.A. Koslow & G.C.B. Poore. 2000. Diversity and endemism of the benthic seamount fauna in the southwest Pacific. *Nature*, 405: 944-947 <https://doi.org/10.1038/35016066>
- Gaxiola-Castro, G., S. Álvarez-Borrego, M.F. Lavín, A. Zirino, A. & S. Nájera-Martínez. 1999. Spatial variability of the photosynthetic parameters and biomass of the Gulf of California phytoplankton. *J. Plankton Res.*, 21: 231–245. <https://doi.org/10.1093/plankt/21.2.231>
- González-Armas, R. 2002. *Agregación de larvas de peces en el Bajo de Espiritu Santo en el Golfo de California, sus cambios en los patrones de distribución y los procesos oceanográficos que los influyen*. Tesis Doctoral. Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C. 163 p.
- González-Armas, R., R. Funes-Rodríguez & A. Amador-Buenrostro. 2008. Estructura de la comunidad de larvas de peces en una montaña submarina del Golfo de California. *Hidrobiológica*, 18(1): 77-88.
- González-Rodríguez, E., H. Villalobos, V.M. Gómez-Muñoz & A. Ramos-Rodríguez. 2015. Application for extracting and modeling periodicities in time series. *Journal of Open Statistics*, 5: 604-617. <https://doi.org/10.4236/ojs.2015.56062>
- Green-Ruiz, Y.A., & A. Hinojosa-Corona. 1997. Study of the spawning area of the northern anchovy in the Gulf of California from 1990–1994: using satellite images of sea surface temperatures. *J. Plankton Res.*, 19: 957-968. <https://doi.org/10.1093/plankt/19.8.957>
- Hamman, M. C. G., T.R. Baumgartner & A. Badán-Dangon. 1988. Coupling of the Pacific sardine (*Sardinops sagax caeruleus*) life cycle with the Gulf of California pelagic environment. *CalCOFI Reports*, 29: 102-109.
- Jorgensen, S. J., A.P. Klimley, A. Muhlia-Melo & S.G. Morgan. 2016. Seasonal Changes in fish assemblage structure at a shallow seamount in the Gulf of California. *PeerJ*, 4:e2357. <https://doi.org/10.7717/peerj.2357>
- Ketchum, J. T., F. Galván-Magaña, F. & A.P. Klimley. 2013. Segregation and foraging ecology of whale sharks, *Rhincodon typus*, in the southwestern Gulf of California. *Environ. Biol. Fish.*, 96: 779–795. <https://doi.org/10.1007/s10641-012-0071-9>
- Klimley, A. P. & S.B. Butler. 1998. Immigration and emigration of a pelagic fish assemblage to seamounts in the Gulf of California related to water mass movements using satellite imagery. *Marine Ecology Progress Series*, 49: 11–20. <https://doi.org/10.3354/meps049011>
- Klimley, P. A. & D.R. Nelson. 1981. Schooling of the scalloped hammerhead shark, *Sphyrna lewini*, in the Gulf of California. *Fisheries Bulletin*, 79(2): 356–360.
- Klimley, P. A. & D.R. Nelson. 1984. Diel movement patterns of the scalloped hammerhead shark (*Sphyrna lewini*) in relation to el bajo Espiritu Santo: a refuging central-position social system. *Behav. Ecol. Sociobiol.*, 1-10. <https://doi.org/10.1007/BF00310214>
- Martínez-López, A., R. Cervantes-Duarte, A. Reyes-Salinas & J.E. Valdéz-Holguín. 2001. Cambio estacional de clorofila-a en la Bahía de La Paz, B.C.S., México. *Hidrobiológica*, 11(1): 45-52.

- Menard, H.W. 1964. *Marine Geology of the Pacific*. McGraw-Hill, New York.
- Muhlia-Melo, A. 1999. *Reporte anual al CONACyT del proyecto "Estudio de la comunidad de peces pelágicos de importancia ecológica y comercial en las montañas submarinas de la porción sur del Golfo de California durante y posterior a El Niño"*. 97 p.
- Muhlia-Melo, A., A.P. Klimley, R. González-Armas, S. Jorgensen, A. Trasviña-Castro, J. Rodríguez-Romero & A. Amador Buenrostro. 2003. Pelagic fish assemblages at the Espiritu Santo seamount in the Gulf of California during El Niño 1997-1998 and non-El Niño conditions. *Geofísica Internacional*, 42(3): 473-481
- Mullineaux, L. S. & S.W. Mills. 1997. A test of the larval retention hypothesis in seamount-generated flows. *Deep Sea Research I*, 44(5): 745-770. [https://doi.org/10.1016/S0967-0637\(96\)00130-6](https://doi.org/10.1016/S0967-0637(96)00130-6)
- Philander, S. G. 1990. *El Niño, La Niña, and the Southern Oscillation*. International Geophysics Series, Academic Press
- Pinot, J.M. & J. Jansa. 2001. Time variability of acoustic backscatter from zooplankton in the Ibiza Channel (western Mediterranean). *Deep-Sea Res., Part 1, Oceanogr. Res. Pap.*, 48: 1651– 1670. [https://doi.org/10.1016/S0967-0637\(00\)00095-9](https://doi.org/10.1016/S0967-0637(00)00095-9)
- Rippeth, T.P. & J.H. Simpson. 1998. Diurnal signals in vertical motions on the Hebridean Shelf. *Limnol. Oceanogr.*, 43: 1690-1696. <https://doi.org/10.4319/lo.1998.43.7.1690>
- Roden, G. I. 1986. *Aspects of oceanic flow and thermohaline structure in the vicinity of seamounts*. NOAA Technical Report NMFS3-12
- Roden, G. I. & B.A. Taft. 1982. Effect of Emperor Seamounts on the mesoscale thermohaline structure during the summer of 1982. *Journal of Geophysical Research*, 90: 839–855. <https://doi.org/10.1029/JC090iC01p00839>
- Rodríguez-Romero, J., A.F. Muhlia-Melo, F. Galván-Magaña, F.J. Gutiérrez-Sánchez & V. Gracia-López. 2005. Fish assemblages around Espiritu Santo island and Espiritu Santo seamount in the lower Gulf of California, Mexico. *Bull. Mar. Sci.*, 77(1): 33-50.
- Samadi, S., T. Schlacher, & B.R. Forges. 2007. Seamount Benthos, In: Pitcher, T.J., T. Morato, P.J.B. Hart, M.R. Clark, N. Haggan & R.S. Santos(eds). *Seamounts: Ecology, Fisheries and Conservation*. Blackwell Publishing, Oxford, U.K.
- Thomson, D. A., L.T. Findley & A.N. Kerstitch. 2000. *Reef fishes of the Sea of Cortez*. University of Texas Press, Austin. 374 p.
- Torres-Orozco, E. 1993. *Análisis volumétrico de las masas de agua del Golfo de California*. Tesis de Maestría. Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada, Ensenada, Baja California.
- Trasviña-Castro, A., G. Gutiérrez de Velasco, A. Valle-Levinson, R. González-Armas, A. Muhlia & M.A. Cosío. 2003. Hydrographic observations of the flow in the vicinity of a shallow seamount top in the Gulf of California. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 57: 149-162. [https://doi.org/10.1016/S0272-7714\(02\)00338-4](https://doi.org/10.1016/S0272-7714(02)00338-4)
- Trenberth, K. E. 1997. The definition of El Niño. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78(12): 2771–2777. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1997\)078<2771:TDOENO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1997)078<2771:TDOENO>2.0.CO;2)
- Valle-Levinson, A., A. Trasviña-Castro, G. Gutiérrez-de Velasco & R. González-Armas. (2004). Diurnal vertical motions over a seamount of the southern Gulf of California. *Journal of Marine Systems*, 50: 61-77. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2003.09.016>
- Verdugo-Díaz, G., R. Cervantes-Duarte & M.O. Albaladejo-Lucero. 2006. Variación estacional de la productividad primaria estimada por fluorescencia natural en el Bajo Espiritu Santo, B.C.S., México. *Naturaleza y Desarrollo*, 4(2): 35-40
- Verdugo-Díaz, G., R. Cervantes-Duarte & M.O. Albaladejo-Lucero. 2008. Estimación de la productividad primaria en dos bajos de la parte sur del golfo de California, México. *CICIMAR Oceanides*, 23(1,2): 39-43. <https://doi.org/10.37543/oceanides.v23i1-2.43>
- Wessel, P. 2007. Seamount characteristics. In: Pitcher, T.J., T. Morato, P.J.B. Hart, M.R. Clark, N. Haggan & R.S. Santos (eds). *Seamounts: Ecology, Fisheries y Conservation*. Blackwell Publishing, Oxford, U.K.

Copyright (c) 2018 González-Rodríguez, Eduardo, Armando Trasviña-Castro & Alejandro Ramos-Rodríguez



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0](#).

Usted es libre para **Compartir** —copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato— y **Adaptar** el documento —remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de:

Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

[Resumendelicencia](#) - [Textocompletodelalicencia](#)