

METALES TRAZA (Ni, V, Pb)

Responsable: Dra. María Lucila del Carmen Lares Reyes, CICESE

Participantes: Isabel Hernández Candelario, Juan Carlos Pérez Rodríguez, Andrea Santa, Pamela Ocampo Chavira, CICESE

Antecedentes

En seguimiento a los muestreos de metales disueltos en la columna de agua del GM, realizados en noviembre de 2010 (campaña oceanográfica XIXIMI-1) y en julio de 2011 (campaña oceanográfica XIXIMI-2) se realizó una tercer campaña en febrero-marzo de 2013 (XIXIMI-3). Esta tercer campaña se realizó con el propósito de comparar las distribuciones de estas variables en diferentes estaciones del año y así tener una idea de la variabilidad intraanual. Los metales propuestos son aquellos cuya abundancia es mayor en el petróleo (V y Ni).

Objetivos

Determinar las distribuciones de las concentraciones de vanadio y níquel disueltos de la campaña oceanográfica XIXIMI-3 realizada en febrero-marzo de 2013.

Metodología

Estrategia de muestreo

La campaña oceanográfica se llevó a cabo del 20 de febrero al 10 de marzo de 2013. Se tomaron muestras a las siguientes profundidades: 10, 150, 400, 600, 800 1000 m y a las profundidades máximas posibles (máx. 3722 m) en un total de 32 estaciones. Las estaciones muestreadas fueron menos que en los cruceros anteriores ya que hubo varios nortes durante los cuales no se pudieron tomar muestras. El total de muestras obtenidas fue de 172. Las muestras fueron tomadas con botellas Go-Flo (especiales para muestreo de metales traza) las cuales fueron previamente lavadas con ácido nítrico 0.1 M y agua destilada y desionizada (ADD) para evitar contaminación. El agua fue bombeada de la botella Go-Flo a un cuarto provisto de presión positiva con aire filtrado Clase-100 por medio de la inyección de nitrógeno gas ultrapuro. Todos los procedimientos para la toma de muestras, manejo y análisis se llevaron a cabo siguiendo procedimientos de técnicas "limpias" para el análisis de metales traza (EPA, 1996). En el cuarto "limpio" se filtraron dos litros (filtros de policarbonato de 0.4 μm , previamente lavados) de agua, los cuales fueron acidificados con HNO_3 grado Ultra ($\text{pH} < 2$) y almacenados en botellas de un litro en doble bolsa de plástico y en contenedores apropiados para evitar la contaminación durante el transporte y hasta su análisis.

Métodos de laboratorio y análisis

Las muestras para el análisis de vanadio (40 mL) fueron pre-concentradas por medio de resinas de intercambio iónico (Chelex-100) a pH de 4.5 (Abbase et al., 2002; Wang y Sañudo-Wilhelmy, 2008). Para la determinación de Ni las muestras fueron pre-concentradas por extracción con solventes orgánicos (APDC y DDDC), una doble extracción en cloroformo y una extracción de regreso con ácido nítrico. Estos procedimientos se llevaron a cabo en un cuarto “ultralimpio” bajo una campana de flujo vertical laminar Clase 10. La determinación se realizó por espectrofotometría de absorción atómica con horno de grafito (EAA-HG) en el laboratorio de Biogeoquímica de metales traza en el CICESE.

Conjuntamente al análisis de las muestras se corrieron blancos de procedimiento, así como material de referencia certificado de agua de mar (Nass-6 y Cass-5 de National Research Council of Canada) para determinar el grado de contaminación de los procedimientos así como la exactitud de los resultados. Los límites de detección del EAA-HG para V y Ni son 0.7 y 0.26 ppb, respectivamente. El factor de concentración de las muestras fue 4 para V y 100 para Ni.

Resultados y discusión

Los blancos de procedimiento se encontraron por debajo del límite de detección para V y alrededor del 1 % para Ni. Los valores medidos del material de referencia, Nass-6 (V, $1.28 \pm 0.26 \mu\text{g kg}^{-1}$) y Cass-5 (Ni, 0.358 ± 0.055) se encontraron dentro de los intervalos de los valores certificados (Nass-6: 1.42 ± 0.16 , V y Cass-5: 0.322 ± 0.022 , Ni) con un porcentaje de recuperación de 90 y 111 para V y Ni, respectivamente. Las profundidades en que fueron tomadas las muestras en esta campaña fueron iguales a las tomadas en la campaña XIXIMI-2, que incluyeron muestras recolectadas en el mínimo de oxígeno y a aproximadamente 40 m del fondo. Este esquema de muestreo se basa en que las concentraciones de vanadio disuelto han mostrado tener una relación con las concentraciones de oxígeno disuelto (Wang y Sañudo, 2008) y, además, se pretende relacionar las concentraciones del fondo con las obtenidas para los sedimentos.

El intervalo de las concentraciones de V disuelto obtenido de muestras recolectadas durante la campaña XIXIMI-3 (12 a 37 nM, ver Anexo) fue diferente al reportado en las campañas XIXIMI-2 (16 a 40 nM) y XIXIMI-1 (21 a 39 nM), con un mínimo y máximo menores (Figura 71). Cabe hacer notar que los valores bajos están siendo verificados ya que hubo algunos problemas con el espectrofotómetro. En todas las campañas el intervalo de concentraciones es más amplio que el reportado para el océano abierto del Atlántico norte (30.0 – 36.0 nM; Jeandel et al., 1987; Middelburg et al., 1988), pero similar al reportado para aguas de fondo de la plataforma de Louisiana (7-27 nM; Shiller y Mao, 1999). El valor medio obtenido (24 ± 6 nM) durante la temporada de invierno, en la cual se llevó a cabo el crucero (febrero-marzo, 2013), fue menor a los valores medidos en las dos campañas anteriores (29 ± 3 y 27 ± 5 nM) realizadas en noviembre 2010 y julio 2011, respectivamente. Esto puede deberse, como ya se mencionó antes, a los posibles errores de medición. En regiones más costeras del este

del Atlántico norte se han reportado concentraciones similares (28 nM; Santos-Echeandía et al., 2008) al promedio de las campañas anteriores.

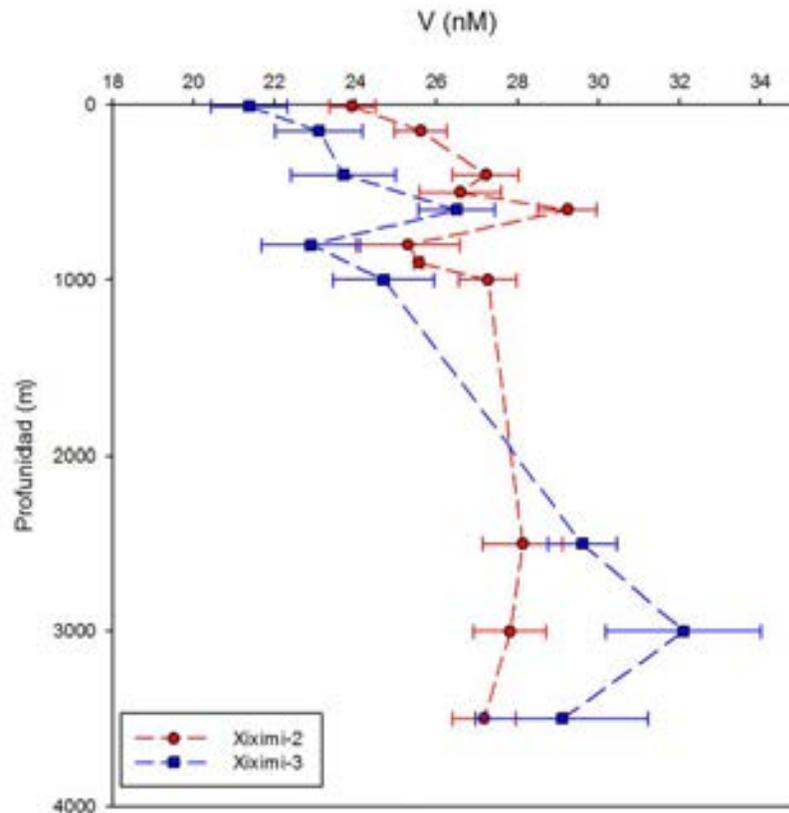


Figura 71. Distribución vertical de las concentraciones medias de V en la región de la zona profunda del GM en febrero-marzo de 2013 (XIXIMI-3) comparadas con la obtenidas en julio de 2011 (XIXIMI-2). Las barras horizontales representan \pm un error estándar.

La distribución vertical del V en la columna de agua para toda la región de la zona profunda del GM fue generada a partir de los valores promedio de las concentraciones en cada una de las diferentes profundidades muestreadas y se presenta en la Figura 71. En esta figura también se muestra la distribución obtenida en la campaña XIXIMI-2 (julio 2011) para efectos de comparación. La distribución vertical promedio de vanadio en febrero-marzo (2013) mostró, de forma general, al igual que las dos campañas anteriores (noviembre 2010 y julio 2011), una disminución en las concentraciones superficiales que se incrementan con la profundidad. Esta distribución vertical se puede explicar tanto por el involucramiento del V en los procesos biológicos (mínimo en superficie por utilización de fitoplancton y máximo relacionado a la regeneración de la materia orgánica), como por su relación con la salinidad dado su comportamiento cuasi-conservativo (Wang y Sañudo-Wilhelmy, 2009). El golfo presenta salinidades menores en la superficie que

incrementan con la profundidad hasta los 150 m aproximadamente para volver a incrementarse con la profundidad (ver sección Temperatura, salinidad y LADPC de este informe). En el océano Pacífico se ha reportado que este elemento presenta una distribución tipo nutriente dado su involucramiento con los procesos biológicos (Collier, 1984). Sin embargo, en el océano Atlántico no se ha observado esta distribución (Middelburg et al., 1988); posiblemente los procesos biológicos sean más importantes para determinar su distribución en un mar marginal como es el GM.

La variabilidad del vanadio también se ha relacionado al oxígeno disuelto. Wang y Sañudo-Wilhelmy (2009) reportaron una relación positiva del vanadio total disuelto con el oxígeno disuelto en aguas de fondo de la plataforma de Louisiana. Esta relación con el oxígeno no se observó en las muestras recolectadas durante XIXIMI-3, ya que se encontraron concentraciones elevadas cercanas al mínimo de oxígeno, como se ve en la Figura 72 en la capa de los 400 m. En esta capa se ve un aporte de aguas del Caribe con mayores concentraciones que puede deberse, en parte, a la degradación de la materia orgánica que pone en solución el V que estaba incorporado al fitoplancton, así como al aumento en la salinidad dado el aporte de agua de alta salinidad (36.6) que arriba al GM (AStSsC – agua subtropical subsuperficial del Caribe). Sin embargo las concentraciones vuelven a disminuir a mayores profundidades (800 m), posiblemente por la presencia en estas profundidades del Agua Intermedia Antártica, la cual tiene la salinidad más baja (34.86-34.89) que se presenta en el golfo (Monreal-Gómez et al., 2004). Cercano al fondo las concentraciones fueron elevadas principalmente en la región norte. La distribución horizontal por capas de profundidad (Figura 72) de las concentraciones de vanadio disueltas muestra un gradiente de concentración norte-sur (Figura 72, Figura 73, Figura 74, Figura 75) en las capas superficiales (10 y 150 m) y, en general, una distribución no homogénea (sin un gradiente definido en alguna dirección) lo cual sugiere que su distribución está posiblemente relacionada con la presencia de remolinos de mesoescala.

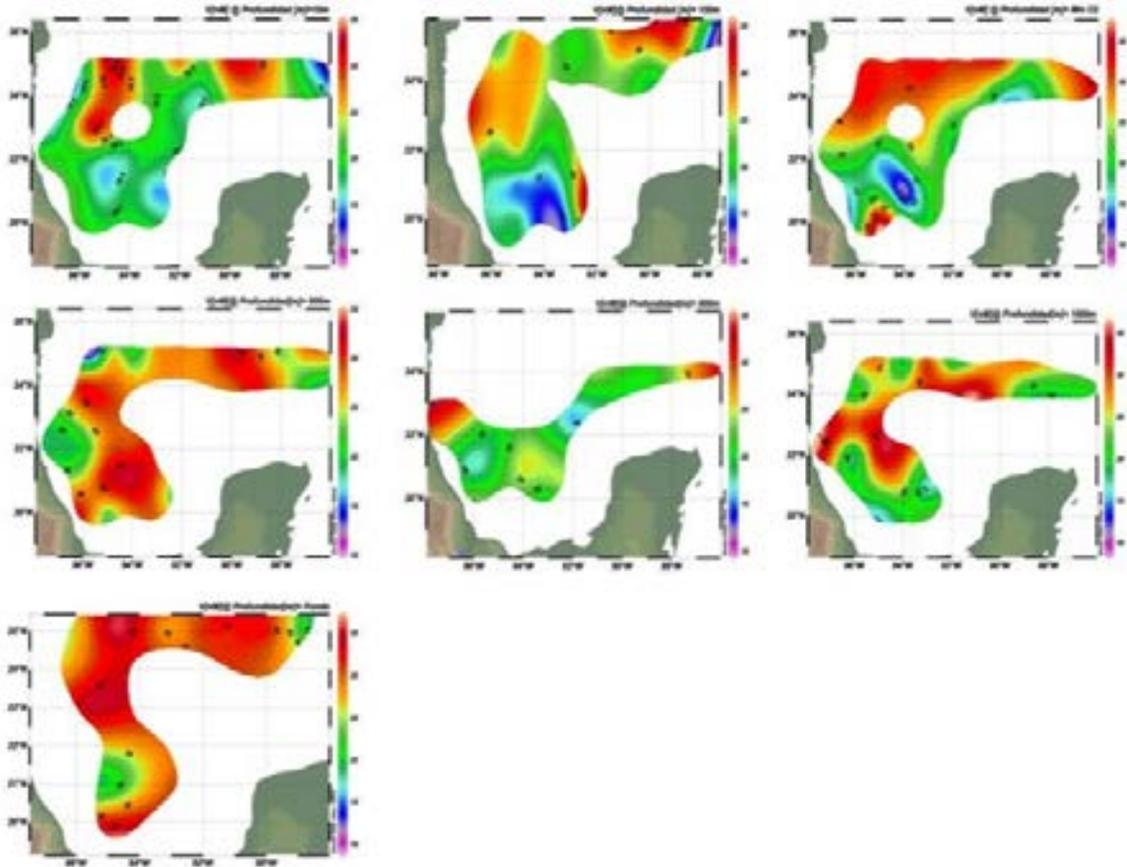


Figura 72. Distribución horizontal de las concentraciones de V en las diferentes profundidades muestreadas durante febrero-marzo de 2013.

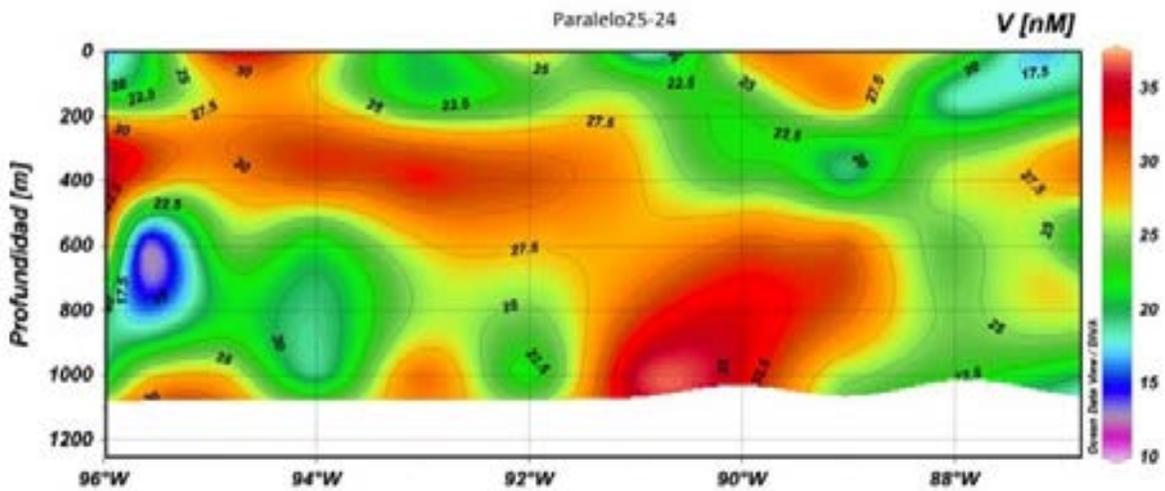


Figura 73. Distribución vertical de las concentraciones de V disuuelto en los paralelos 25-24 °N (superior e inferior, respectivamente) en febrero-marzo de 2013.

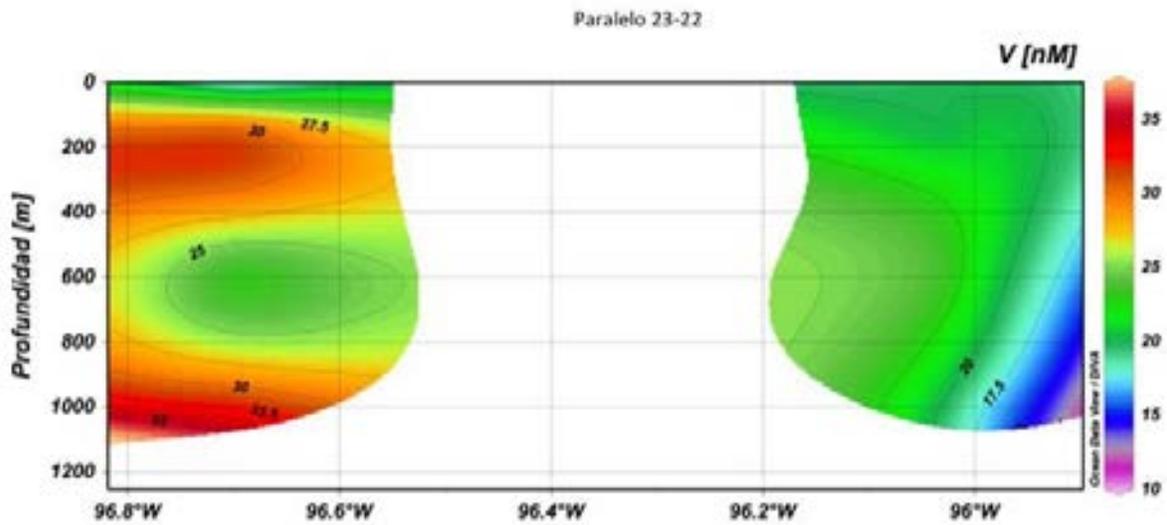


Figura 74. Distribución vertical de las concentraciones de V disuelto en los paralelos 23-22 °N (superior e inferior, respectivamente) en febrero-marzo de 2013.

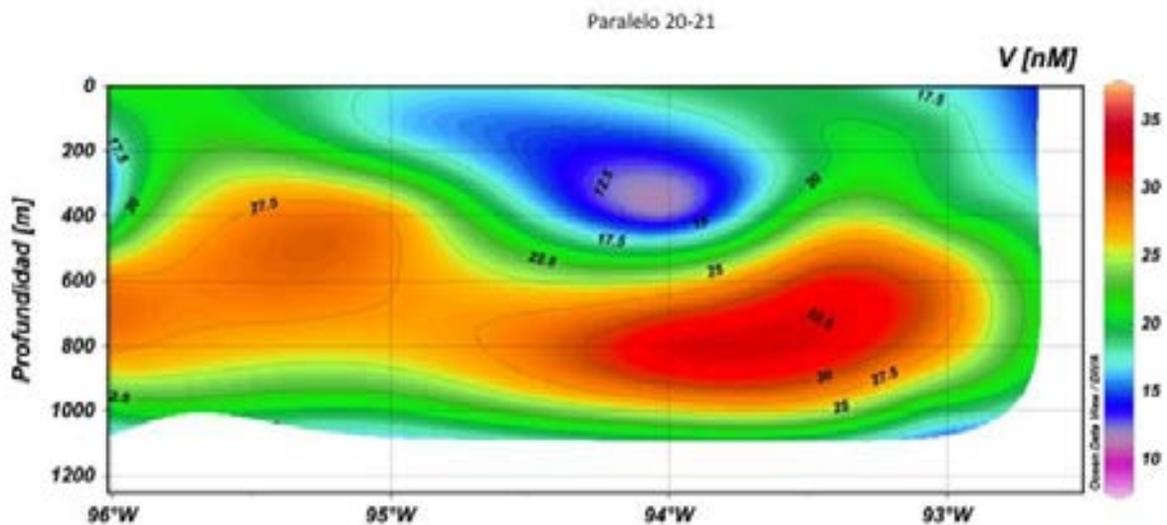


Figura 75. Distribución de las concentraciones de V disuelto en el paralelo 21-20 °N en febrero-marzo de 2013.

Las concentraciones de Ni presentaron valores desde 1.6 hasta 9.9 nM con una media de 4.7 ± 1.6 nM (Figura 76). Estos valores fueron similares, aunque ligeramente mayores, a los obtenidos en la campaña XIXIMI-2 (1.7 - 6.8 nM, media de 3.8 ± 1.1 nM). Sin embargo fueron más del doble del obtenido en la campaña XIXIMI-1, lo cual se esperaba ya que con el método de extracción utilizado en la primer campaña sólo se

recuperaba el 50 % del Ni. El valor mínimo obtenido durante la campaña XIXIMI-3 está en concordancia con lo reportado por Boyle et al. (1981) quienes mencionan que los valores más bajos de Ni en aguas superficiales, tanto del Pacífico como del Atlántico, son de 2 nM. Kremling (1985), por su parte, reporta un promedio de 1.88 ± 0.66 nM para aguas superficiales (6 m) oceánicas del Atlántico noreste en regiones entre 7S y 35N. Por su parte Bowie et al. (2002) también encontraron que el mínimo de Ni disuelto en el Atlántico es de 1.7 nM.

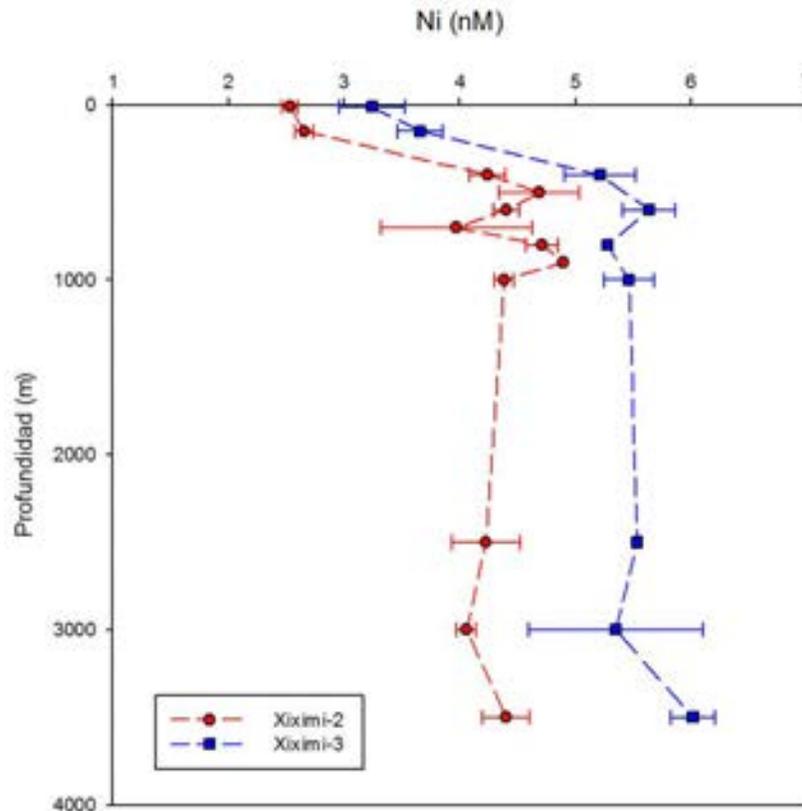


Figura 76. Distribución vertical de las concentraciones medias de Ni en la región de la zona profunda del GM en febrero-marzo de 2013 (XIXIMI-3) comparadas con la obtenidas en julio de 2011 (XIXIMI-2). Las barras horizontales representan \pm un error estándar.

Los valores máximos de Ni (6.6 - 9.9 nM), en el presente trabajo, se encontraron en aguas intermedias (350 - 1000 m) en las estaciones sureñas E35, E37, E39, E40 y E42, en la estación E15 al oeste y la E30 al este. Estas estaciones se encuentran al borde de la plataforma sobre la isóbata de los 1000 m (excepto E42, que se encuentra sobre la isóbata de los 500 m, y E37 y E40 que se encuentran sobre la isóbata de los 2000 m). También se encontraron concentraciones altas en aguas someras (10 m) en las estaciones E46, E12 y E19 y en aguas cercanas al fondo (2000 a 3600 m) en las estaciones, E3b, E15, E18 y E24. Concentraciones de Ni elevadas son características del Agua Antártica de Fondo (AABW, por sus siglas en inglés, 6.0 - 6.5 nM; Westerlund

y Ohman, 1991) y se han observado en aguas profundas (4000 m) del Atlántico noreste (Saager et al., 1997) y en aguas superficiales del Mar del Norte, lo que ha sido atribuido a aportes por ríos (Kremling y Pohl, 1989). Joung y Shiller (2013) reportan que el río Mississippi tiene una concentración de Ni de 21.3 nM. Las estaciones E12 y E46 se encuentran cerca de la plataforma por lo que los valores altos encontrados en estas estaciones a los 10 m de profundidad pueden ser atribuidos a aportes por ríos. Sin embargo las estaciones E37 (en la cual se encontró la concentración más alta a los 350 m, 9.9 nM), E19 (10 m, 6.6 nM) y E40 no lo están por lo que posiblemente estas concentraciones se deban a la concentración de metales debido a giros o emanaciones naturales de hidrocarburos, principalmente la E37 que se encuentra localizada en la Sonda de Campeche.

Es importante señalar que a profundidades intermedias (400 - 600 m) se encuentran los máximos valores de concentración de nutrientes (ver sección Concentración de Nutrientes, este informe). El Ni presenta una distribución vertical tipo nutriente (Danielsson et al., 1985), con valores bajos en la superficie que incrementan con la profundidad como se observa en su distribución promedio (Figura 76). Esto implica su involucramiento con el ciclo de la materia orgánica por lo que podría esperarse que las concentraciones sean mayores donde la regeneración de la materia orgánica es mayor (i.e., en el mínimo de oxígeno) y en zonas con influencia del aporte de ríos (Figura 77). El promedio de las concentraciones de Ni en las aguas superficiales (10 y 150 m) fue de 3.4 ± 1.3 nM lo que concuerda con lo reportado por diversos autores para el Atlántico noreste (Boyle et al, 1981; Kremling, 1985; Kremling y Pohl, 1989; Saager et al. 1997). Las aguas intermedias (400 - 1000 m) tuvieron un promedio de concentración de Ni de 5.4 ± 1.3 nM, similar al promedio de las aguas profundas (1000 - 3700 m) de 5.8 ± 0.8 nM. Este valor es mayor a las concentraciones que presenta el Agua Profunda del Noratlántico (NADW, por sus siglas en inglés; 3.5 - 4.0 nM) lo que puede deberse a una mezcla de esta masa de agua que penetra al GM con el Agua Intermedia Antártica que también se conoce que penetra y que posiblemente tenga valores de Ni mayores a la NADW (el agua del mar de Weddell tiene concentraciones de Ni de 6-7 nM; Westerlund y Ohman, 1991).

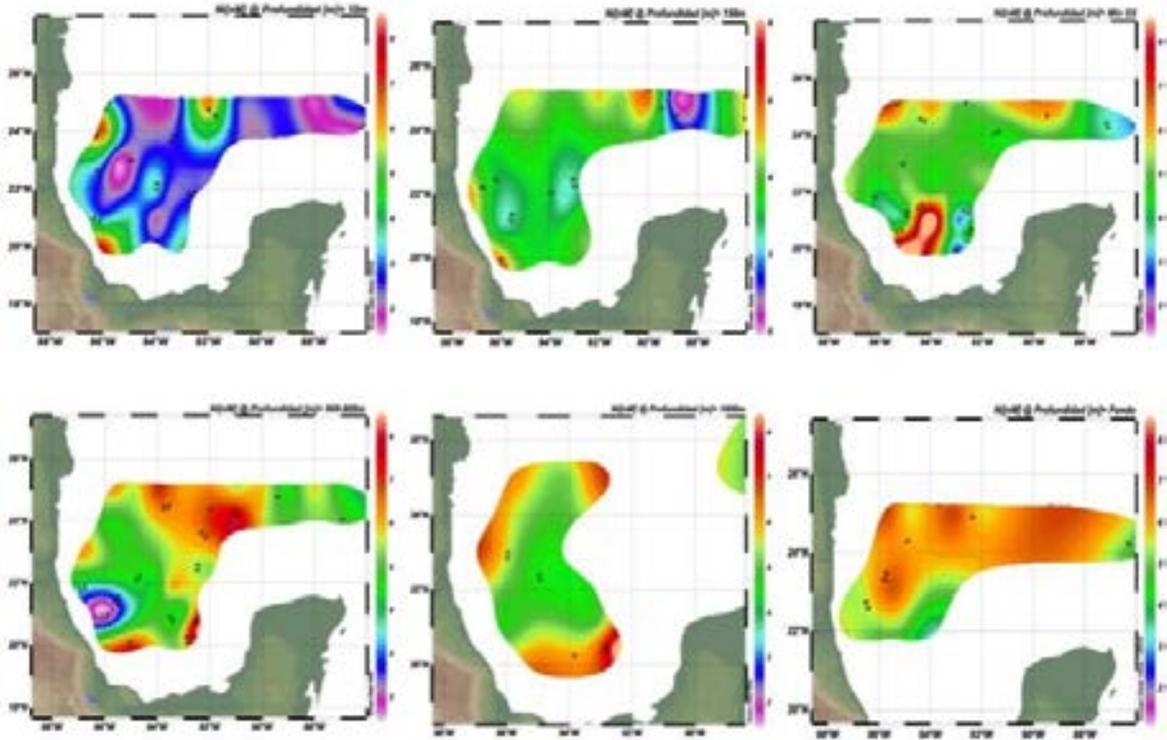


Figura 77. Distribución horizontal de las concentraciones de Ni en las diferentes profundidades muestreadas durante febrero-marzo de 2013.

La Figura 77 muestra las distribuciones horizontales de Ni por capa de profundidad donde se puede observar también que las concentraciones más bajas se encuentran a los 10 y 150 m. En esta figura también se observa el aporte de aguas de concentraciones bajas en el noreste del golfo hasta los 400 m de profundidad (en zona de la corriente del Lazo) y de manera más clara esto se ve en la Figura 78 donde se muestran cortes verticales de los paralelos 25 y 24-23 °N. En las muestras de fondo se ven concentraciones elevadas que podrían provenir de la plataforma del norte del golfo. En la Figura 79 se puede ver que la región más pobre en Ni es la zona central del golfo (22 °N) y el máximo a los 400 m en la E37 que se encuentra en el paralelo 21 °N. De manera general se puede decir que los aportes de Ni al GM se dan en la capa superficial (10 m) por ríos en la costa oeste del golfo, en la región de la Sonda de Campeche en la capa del mínimo de oxígeno (E37) y a profundidades mayores (cercasas al fondo) por aporte de la plataforma del norte del Golfo.

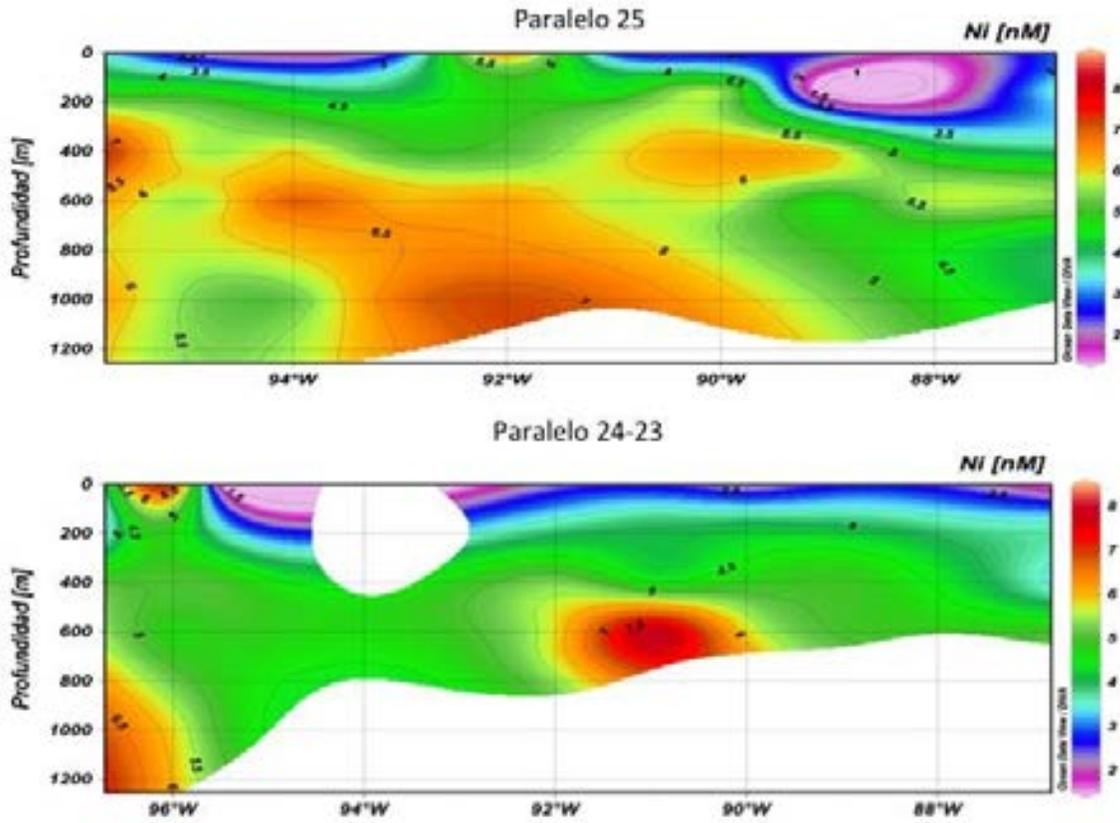


Figura 78. Distribución vertical de las concentraciones de Ni disuelto en los paralelos 25 y 24-23 °N (superior e inferior, respectivamente) en febrero-marzo de 2013.

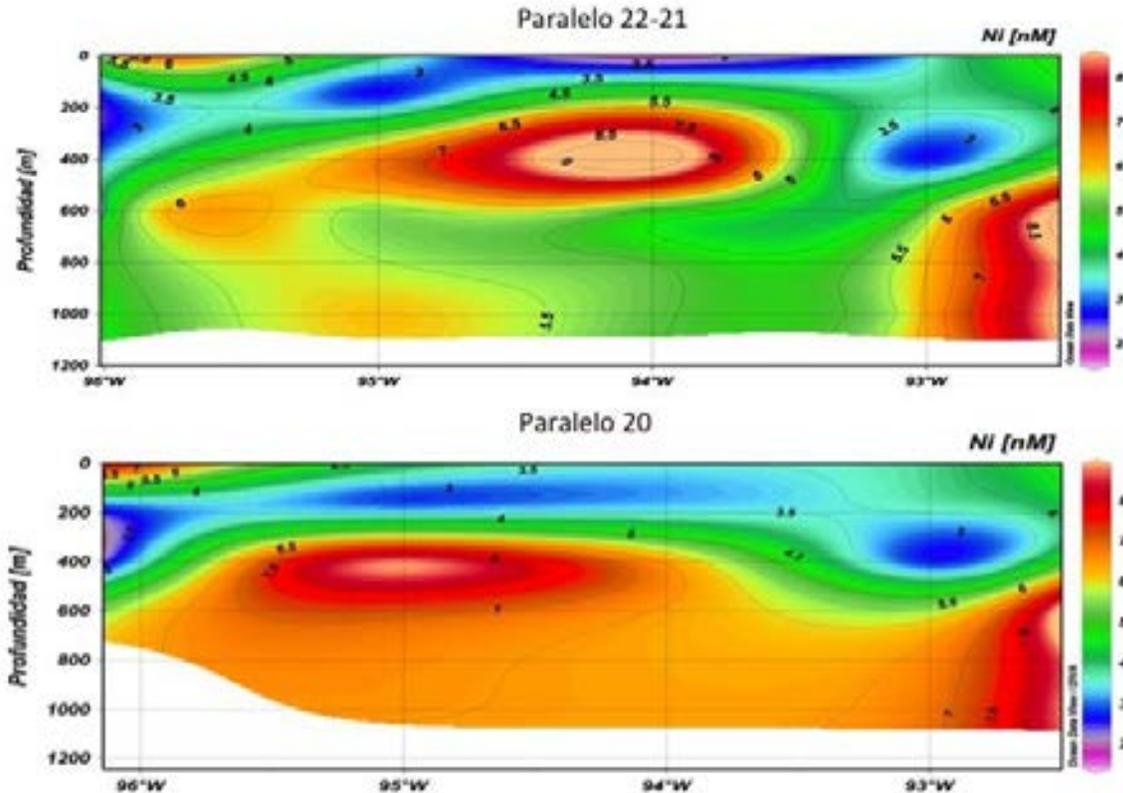


Figura 79. Distribución vertical de las concentraciones de Ni disuelto en los paralelos 22 y 21-20 °N (superior e inferior, respectivamente) en febrero-marzo de 2013.

Conclusiones

Las concentraciones de vanadio y níquel disueltos mostraron tener una alta variabilidad en el GM, con intervalos de concentración dentro de lo reportado para el Atlántico norte, para las aguas de fondo de la plataforma de Louisiana y las aguas del río Mississippi (en el caso del Ni). La distribución vertical promedio de vanadio en invierno de 2013 mostró, de forma general, al igual que en otoño de 2010 y verano de 2011, concentraciones menores en la superficie que incrementan hasta profundidades medias (400-600 m) y se mantienen o incrementan con la profundidad. Esta distribución vertical se puede explicar tanto por el involucramiento del V en los procesos biológicos (mínimo en superficie por utilización de fitoplancton y máximo relacionado a la regeneración de la materia orgánica), como por su relación con la salinidad (dado su comportamiento cuasi-conservativo). En general, el golfo presenta salinidades menores en la superficie que incrementan con la profundidad hasta los 150 m aproximadamente para volver a disminuir con la profundidad. Las mayores concentraciones de V se encontraron en la región norte cercanas al mínimo de oxígeno (400 m) lo que puede atribuirse en parte, a la degradación de la materia orgánica que pone en solución el V que estaba incorporado al fitoplancton, así como al aumento en la salinidad dado el aporte de agua del Caribe de

alta salinidad que arriba al GM. En general, las concentraciones de vanadio disueltas son menores al sur que al norte con una distribución no homogénea (sin un gradiente definido en alguna dirección), lo que sugiere que su distribución horizontal posiblemente esté relacionada a la presencia de remolinos de mesoescala. El Ni presentó una distribución vertical promedio tipo-nutriente, característica de este metal. Además, mostró una variabilidad horizontal con concentraciones mayores al norte hasta los 400 m, excepto en algunas zonas cercanas a aportes de ríos en la capa superficial (10 m) y a los 400 m (capa del mínimo de oxígeno) en la región de la Sonda de Campeche. En profundidades mayores (cercanas al fondo) se observó también un gradiente norte-sur posiblemente debido al aporte de la plataforma del norte del Golfo.

Referencias

- Abbasse, G., Ouddane, B., Fisher, J.C., 2002. Determination of trace levels of dissolved vanadium in seawater by use of synthetic complexing agents and inductively coupled plasma-atomic emission spectroscopy. *Analytical and Bioanalytical Chemistry* 374, 873-878. DOI 10.1007/s00216-002-1532-3.
- Bowie, A.R., Whitworth, D.J., Achterberg, E.P., Mantoura, R.F.C., Worsfold, P.J., 2002. Biogeochemistry of Fe and other trace elements (Al, Co, Ni) in the upper Atlantic Ocean. *Deep-Sea Research*, 49, 605-636.
- Boyle, E.A., Husted, S.S., Jones, S., 1981. On the distribution of copper, nickel, and cadmium in the surface waters of the North Atlantic and North Pacific Ocean. *Journal of Geophysical Research*, 86, C9, 8048-8066.
- Collier, R.W., 1984. Particulate and dissolved vanadium in the North Pacific Ocean. *Nature*, 309, 441-444.
- Danielsson, L.-G., Magnusson, B., Westerlund, S., 1985. Cadmium, copper, iron, nickel and zinc in the north-east Atlantic Ocean. *Marine Chemistry*, 17, 23-41.
- Environmental Protection Agency (EPA). 1996. Sampling ambient water for trace metals at EPA water quality criteria levels. Método 1669.
- Jeandel, C., Caisso, M., Minster, J.F., 1987. Vanadium behavior in the global ocean and in the Mediterranean Sea. *Marine Chemistry*, 21, 21-74.
- Joung, D., Shiller, A.M., 2013. Trace element distributions in the water column near the deepwater horizon well blowout. *Environmental Science & Technology*, 47, 2161-2168.

- Kremling, K., 1985. The distribution of cadmium, cooper, nickel, manganese, and aluminum in surface waters of the open Atlantic and European shelf area. *Deep-Sea Research Part A*, 32, 531-555.
- Kremling, K., Pohl, C., 1989. Studies on the spatial and seasonal variability of dissolved cadmium, copper and nickel in northeast Atlantic surface waters. *Marine Chemistry*, 27, 43-60.
- Middelburg, J.J., Hoede, D., Van Der Sloot, H.A., Van Der Weijden, C.H., Wijkstra, J., 1988. Arsenic, antimony and vanadium in the North Atlantic Ocean. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 52, 2871-287.
- Monreal-Gómez, M.A., Salas-del-León, D.A., Velasco-Mendoza, H., 2004. La hidrodinámica del GM. En: Diagnóstico ambiental del Golfo de México (Caso, M., Pisanty, I., Ezcurra E., compiladores), INE-SEMARNAT, Vol. I, 47-68 pp.
- Saager, P.M., de Baar, H.J.W., de Jong, J.T.M., Nolting, R.F., Schijf, J., 1997. Hydrography and local sources of dissolved trace metals Mn, Ni, Cu, and Cd in the northeast Atlantic Ocean. *Marine Chemistry*, 57, 195-216.
- Santos-Echeandía, J., Prego, R., Cobelo-García, A., 2008. Influence of the heavy fuel spill from the *Prestige* tanker wreckage in the overlying seawater column levels of copper, nickel and vanadium (NE Atlantic ocean). *Journal of Marine Systems*, 72, 350-357.
- Wang, D., Sañudo-Wilhelmy, S.A., 2008. Development of an analytical protocol for the determination of V (IV) and V (V) in seawater: Application to coastal environments. *Marine Chemistry*, 112, 72–80. doi:10.1016/j.marchem.2008.05.011
- Wang, D., Sañudo-Wilhelmy, S.A., 2009. Vanadium speciation and cycling in coastal waters. *Marine Chemistry*, 117, 52–58. doi: 10.1016/j.marchem.2009.06.001
- Westerlund, S., Ohman, P., 1991. Cadmium copper, cobalt, nickel, lead, and zinc in the water column of the Weddell Sea Antarctica. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55, 2127-2146.

HIDROCARBUROS DERIVADOS DEL PETRÓLEO

Responsable: Dr. José Vinicio Macías Zamora, IIO-UABC

Participantes: Ocean. Arturo Siqueiros, Yesenia González Esparza, Sara O. Topete Martínez, IIO-UABC

Introducción

Se ha reconocido por muchos autores previamente que la distribución de contaminantes orgánicos en agua de mar muestran una alta variabilidad espacial (Dach, et al., 2006; Camilli et al., 2010; Diercks et al., 2010; Hazen et al., 2010; Kujawinski et al., 2011; Valentine et al., 2010). Entre otra causas, esta variabilidad depende por supuesto de la cercanía a la fuente del sitio donde se tome la muestra en cuestión, de la substancia de que se trate, pero también a otra variedad numerosa de procesos. Entre ellos se incluyen los procesos de depositación seca y húmeda (ver por ejemplo González-Gaya, et al., 2014), que son en sí mismos altamente variables, y los procesos que involucran al ciclo del carbón en la columna de agua. Este último proceso tiene por supuesto componentes estacionales que en aguas oceánicas pueden no ser tan importantes como en zonas más costeros.

La temperatura es una variable que, en particular en el caso de aguas superficiales, lleva a una tasa de evaporación mayor de substancias volátiles y semivolátiles cuando es más alta. Por el contrario, hay una menor volatilización a temperaturas bajas. De igual manera, el viento es otra variable importante que influye sobre las concentraciones superficiales de substancias en el agua de mar. En particular, los modelos de volatilización muestran una alta dependencia directa de la velocidad del viento en la disminución de la capa de intercambio con la atmósfera (Broecker y Peng, 1974. Macías-Zamora et al., 2014). Finalmente, también existen otros procesos que no se mencionan aquí pero que todos ellos contribuyen a la alta variabilidad espacial de estos compuestos. Es por ello que la presencia de hidrocarburos, en particular aquellos derivados del petróleo, también sean altamente variables en sus distribuciones espaciales, particularmente los compuestos volátiles.

Estas substancias tienen en común con otros contaminantes su carácter de substancias hidrofóbicas, por lo que se asocian fuertemente a partículas. Por ende, tanto su presencia como su extracción en muestras de agua dependen de la presencia de partículas en el agua obtenidas durante todos los cruceros, incluyendo este tercer muestreo (XIXIMI 3).

Por supuesto, algunas de estas variables tienen una mayor importancia cerca de la superficie. Sin embargo, la presencia de remolinos de meso-escala, frecuentes en el GM, la productividad de parcelas particulares de agua con la consecuente generación de

material particulado, así como su hundimiento, la advección y otros procesos resultan en una característica distribución variable de los hidrocarburos.

Particularmente, la descomposición de hidrocarburos por bacterias ocurre tanto en la superficie como en aguas más profundas, particularmente en condiciones en las que existe suficiente oxígeno para efectuar la transformación de los hidrocarburos a CO₂ con la consecuente obtención de alimento. Estas bacterias se multiplican en número bajo la presencia de hidrocarburos y son capaces de formar bio-films y producir bio-surfactantes (Diener, 2010).

En nuestro caso particular, el retraso en la primera salida a colecta de muestras de aproximadamente seis meses de ocurrido el derrame inicial, hizo que la detección de hidrocarburos derivados del BP Deepwater Horizon en aguas superficiales oxigenadas con alta temperatura y vientos variables, a larga distancia de aguas mexicanas y con una frecuencia de muestras fijas y distantes fuese poco probable. Una mejor posibilidad existía en aguas intermedias a profundidades cercanas a los 1500 m, aunque reportes de hidrocarburos en aguas intermedias del GM después del derrame han sido hechas desde los 400m a 1000 m (Hollander et al., 2010; Zhang et al., 2011; Liu et al., 2011) y aún hasta 1200 m utilizando como indicadores BTEX a 27 km al sur-este del pozo Macondo (Reddy, et al., 2012).

La ausencia de una muestra directa de petróleo del derrame durante el desarrollo de estos tres años de trabajo ha hecho difícil encontrar suficientes coincidencias para poder decir con propiedad que existe presencia de petróleo originada en el pozo Macondo. Por esto, lo que se ha buscado es que existan parámetros que definen al petróleo de Macondo y que sean coincidentes con las trazas de hidrocarburos y con los biomarcadores típicos de ese origen.

Objetivos

Los objetivos establecidos desde el primer muestreo de nuestro trabajo son dos. Primero, se buscó establecer los niveles típicos de concentración de hidrocarburos y su tipo o características generales en las aguas profundas del GM. En segundo lugar, se planteó realizar los estudios de monitoreo necesarios para determinar la posible presencia en aguas mexicanas de hidrocarburos derivados del derrame del descontrolado pozo Macondo que operaba la compañías British Petroleum y que se convirtió en el peor desastre de liberación de hidrocarburos de la historia.

Para realizar estos propósitos, decidimos hacer un primer enfoque analizando de manera particular dos componentes del crudo que son asociados con el petróleo y que son los hidrocarburos lineales saturados. El otro grupo de importancia y que puede analizarse como indicador adicional, son los compuestos aromáticos polinucleares, mejor conocidos por sus siglas en inglés de (PAHs). Se esperaba que este primer enfoque permitiera identificar sitios en donde existan posibles evidencias de un derrame potencial. Una vez pasada esta primera etapa, se planeaba el realizar un análisis más

detallado de aquellas muestras y estaciones particulares en las que la primera aproximación sugiriera como posibles sitios con derrame. De manera particular, los objetivos específicos incluyeron la separación, identificación y cuantificación de los hidrocarburos mas importantes para poder realizar el proceso de “fingerprinting” (Wang and Fingas, 2003. Raia et al., 2004). Para lograr esto, se busca en principio separar dos de los principales grupos de compuestos que constituyen el petróleo: por un lado, los hidrocarburos saturados, normales o alifáticos dado que son el mayor componente del petróleo y por el otro lado, separar, identificar y cuantificar los compuestos aromáticos poli-cíclicos (PAHs).

En el caso de los hidrocarburos lineales, en el análisis se incluyen los componentes que vayan desde hidrocarburo de 10 carbonos hasta el de 40 carbonos. En el caso de los hidrocarburos aromáticos polinucleares, se cuentan con aproximadamente 36 compuestos individuales estándares que son buscados en cada una de las muestras. Entre los parámetros importantes a considerar se incluyen la traza cromatográfica típica de los hidrocarburos del petróleo, su índice de preferencia del carbono (CPI), la presencia o ausencia de C17, pristano, C18 y fitano, así como las relaciones entre estos compuestos. También se evalúa la presencia o ausencia de lo que se conoce como UCM o material de carbono sin resolver. Cada uno de esos parámetros y otras relaciones tales como L/H, esto es, la relación que existe entre la suma de los hidrocarburos de bajo peso molecular (L) dividido por la sumatoria de los de alto peso molecular (H) serán calculadas e interpretadas a la luz de las relaciones que otros autores han reportado en la literatura. Debemos enfatizar que este es un trabajo sobre todo en la parte de interpretación, en progreso y que por lo tanto, un análisis mas detallado en el laboratorio, que agregue biomarcadores al análisis tales como los hopanos y esteranos puede ocasionar que algunas de las primeras indicaciones que se han vertido a partir de este análisis puedan cambiar.

Metodología

El método analítico se basa en la extracción repetida de muestras de agua mediante la utilización de embudos de separación para extraer los compuestos orgánicos. La extracción se realiza con tres porciones de 60 mL de cloruro de metileno grado reactivo ACS. Las extracciones repetidas son luego combinadas en un solo recipiente. Se concentra por rota-evaporación hasta aproximadamente unos dos mililitros. El extracto es luego concentrado en tubos de concentración Kuderna-Danish en baño maría, hasta un volumen final de 1 mL. El extracto es luego procesado a través de una columna cromatográfica de 30 cm de largo por 1 cm de diámetro que contiene sílica gel y alúmina desactivadas al 3%. Las proporciones en que se usan son 12 cm de sílica por 6 cm de alúmina. Dos fracciones son obtenidas a partir del extracto. La fracción uno contiene normalmente los hidrocarburos lineales, saturados o alifáticos ya que son extraídos o eluidos utilizando 20 mL de n-hexano. La segunda fracción, que es extraída con una mezcla de n-hexano-diclorometano (70:30 v:v) y contiene, entre otros compuestos, los aromáticos polinucleares.

El petróleo en la columna de agua, es extraído mediante el método de líquido-líquido, con la intención de eliminar la matriz acuosa, y tras someterse al proceso de limpieza en columna con sílice y alúmina como se describió previamente, la fracción apropiada (F1 o bien F2) es luego analizada mediante cromatografía de gases (GC) en columna capilar con detector de ionización de flama (GC-FID). El equipo es marca HP 6890 plus. La columna capilar que utilizamos es la HP-5 de 30 m de longitud con una longitud de 30 m y con un diámetro de 0.32 μ m y un grosor de capa de 0.25 μ m. La rampa de temperatura es de 60 °C el cual es mantenido durante tres minutos. La rampa de temperatura fue de 8 °C/min con una temperatura final 300 °C la cual es mantenida durante 40 min. La temperatura del inyector fue de 275 °C y la del detector fue de 315 °C.

Para la separación identificación y cuantificación de los compuestos aromáticos poli-nucleares que se obtienen en la segunda fracción, se analizaron utilizando un sistema gases masas (GC-MS) marca Agilent modelo 7890 equipado con modo de ionización de impacto electrónico y utilizando la técnica del ión común o SIM por sus siglas en inglés. En el modo SIM, se analizaron 11 grupos de compuestos en los que se incluyó un ión de cuantificación y dos iones de confirmación para cada compuesto. La columna empleada es la DB-5MS de 30 m de longitud y 0.25 μ m de diámetro interno y con 0.25 μ m de grosor de capa. La temperatura inicial fue de 70 °C mantenida durante 3 min con una rampa de temperatura 5 °C/ min hasta alcanzar una temperatura final de 300 °C y se la mantiene durante 11 min. Adicionalmente la temperatura del inyector fue de 280 °C y la de la fuente es de 250 °C y la del cuadrupolo se mantuvo a 150 °C. La inyección se realizó en el modo splittless y se inyectaron 2 μ L. Para controlar recuperaciones y en general la calidad del trabajo, para los hidrocarburos alifáticos se incluyeron dos estándares internos y dos compuestos surrogados. Los estándares internos fueron los alquenos 1-decene y el 1-eicosene . Los surrogados utilizados fueron 1-undecene y el 1-dococene. No sabemos de la existencia de un material estándar de referencia por lo cuál no se incluyó uno en el trabajo. Las calibraciones fueron externas utilizando al menos 5 niveles de concentración diferentes y utilizando estándares verdaderos.

Para los aromáticos polinucleares, se utilizaron los siguientes estándares deuterados y el estándar interno •Estándar surrogado: Acenafteno-d10, Criseno-d12, 1,4-diclorobenceno-d14, Naftaleno-d8, Perileno-d12, Fenantreno-d10; que corresponde a los compuestos semi volátiles de la mezcla de estándares internos. Y como estándar interno utilizamos el compuesto p-terfenil-d14 que es un C.R.M. (Certified Reference Material).

Cada corrida consta de seis muestras y dos blancos:

- Blanco de procedimiento: Que contiene únicamente el estándar surrogado.
- Blanco fortificado: Contiene estándares con todos los compuestos; para los hidrocarburos alifáticos TRPH Standard (Florida) (17 compuestos) y el Fuel Oil Degradation Mixture (4 compuestos). Para PAHS contiene el Standard Reference

Material 2260a (32 compuestos) Standard Reference Material 1491a (18 compuestos).

Resultados

Se ha generado una base de datos en Excel con las muestras pertenecientes a este tercer año de muestreo y se han construido mapas de distribución verticales en las diferentes líneas de muestreo que se presentan abajo con las principales tendencias. Algunas sugieren entradas de materiales, en este caso fragmentos de hidrocarburos de diferentes orígenes a nuestra zona de trabajo. En algunos casos, con base en las características de los cromatogramas y de sus trazas características, estamos sugiriendo orígenes potenciales. Una deficiencia de nuestro trabajo, pero que no dependió de nosotros, es que nunca pudimos obtener una muestra típica de petróleo de British Petroleum del pozo Macondo, lo cuál hace que nuestra identificación con características reportadas en la literatura se base en evidencias múltiples y no se base en algún típico componente muy particular o específico (o solo unos cuantos componentes). En otras palabras, nuestra posible identificación solo puede basarse en la acumulación de indicadores que indiquen semejanza con aquellas reportadas en la literatura para el petróleo original.

La Figura 80 muestra la distribución vertical de los hidrocarburos totales combinando las estaciones de las líneas de latitud 25 N y 24 N. En esta ocasión se incluyen ambas en la evaluación de la distribución vertical ya que debido a la ausencia de cobertura de varias estaciones de la línea 24N por mal tiempo durante el crucero, la extrapolación entre estaciones tan lejanas arroja resultados sin sentido. Agrupadas, ambas líneas sugieren, como ocurrió en el caso de XIXIMI 1, la entrada de fragmentos de hidrocarburos al GM, probablemente vía el canal de Yucatán o vía la corriente del Lazo. Este es un comportamiento que ya fue señalado en XIXIMI 1 como puede observarse en la Figura 81, que presenta un comparativo de los distintos perfiles verticales de XIXIMI 1, 2 y 3 respectivamente.

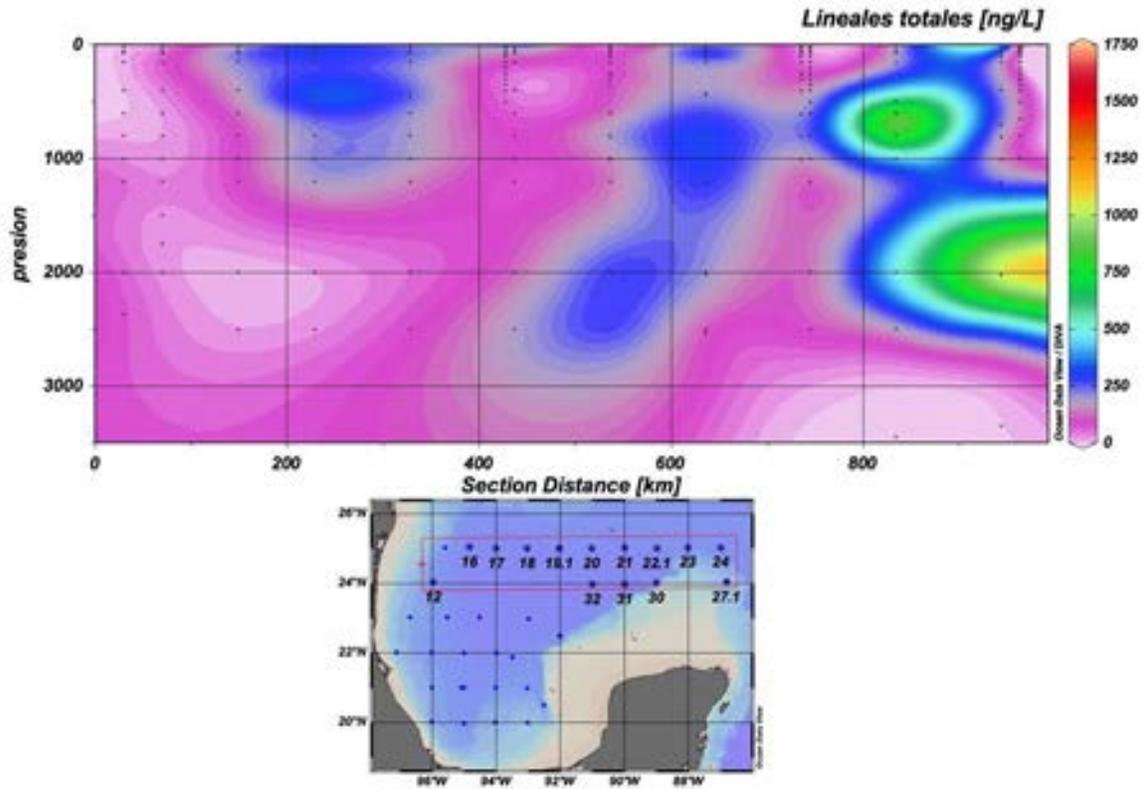


Figura 80. Distribución vertical de las líneas combinadas de latitud 25 N y 24 N. Las unidades de concentración se encuentran indicadas.

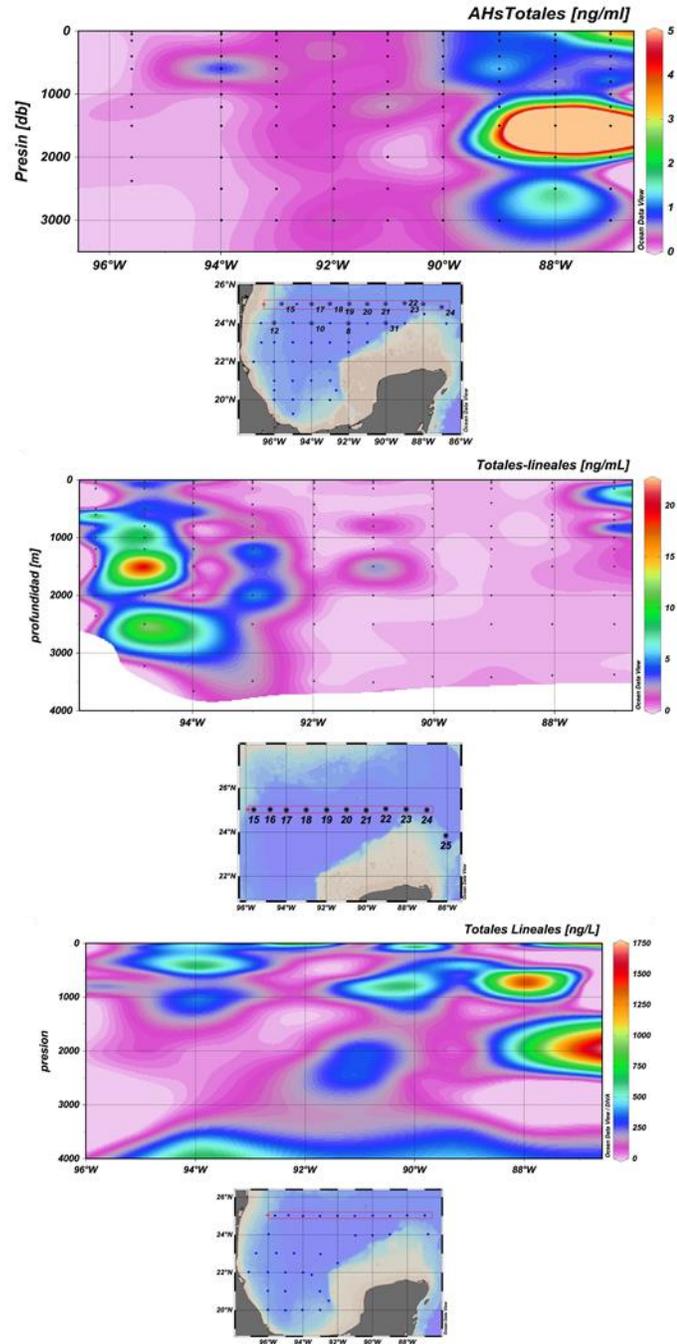


Figura 81. Distribución vertical de las línea de latitud 25Tab. Las unidades de concentración se encuentran indicadas. XIXIMI 1, 2 y 3 respectivamente.

De igual manera, se muestra en la Figura 82 la distribución superficial de hidrocarburos lineales y en la Figura 83 la distribución superficial de los compuestos aromáticos o PAHs. Dado que se ha sugerido la presencia de petróleo tratado con dispersantes a una profundidad de alrededor de los 1500 m, decidimos hacer también un análisis a diferentes profundidades para observar si existen patrones de entrada al área de estudio de estos compuestos analizados. Se puede observar, en la Figura 84, las tendencias de flujos están indicadas por los gradientes de concentración de los hidrocarburos lineales a 800m y a 1200m de profundidad. De manera similar, presentamos los resultados de las tendencias de flujos que sugieren los gradientes de concentración de los hidrocarburos aromáticos polinucleares en la Figura 85.

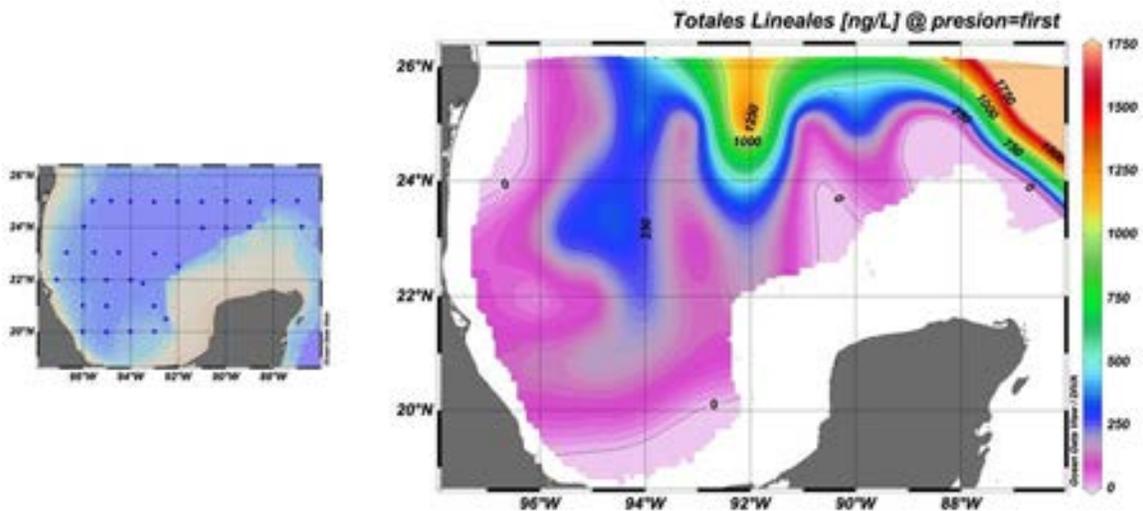


Figura 82. Distribución superficial de la suma de hidrocarburos lineales medidos en muestras cercanas a la superficie. Las unidades de concentración se encuentran indicadas.

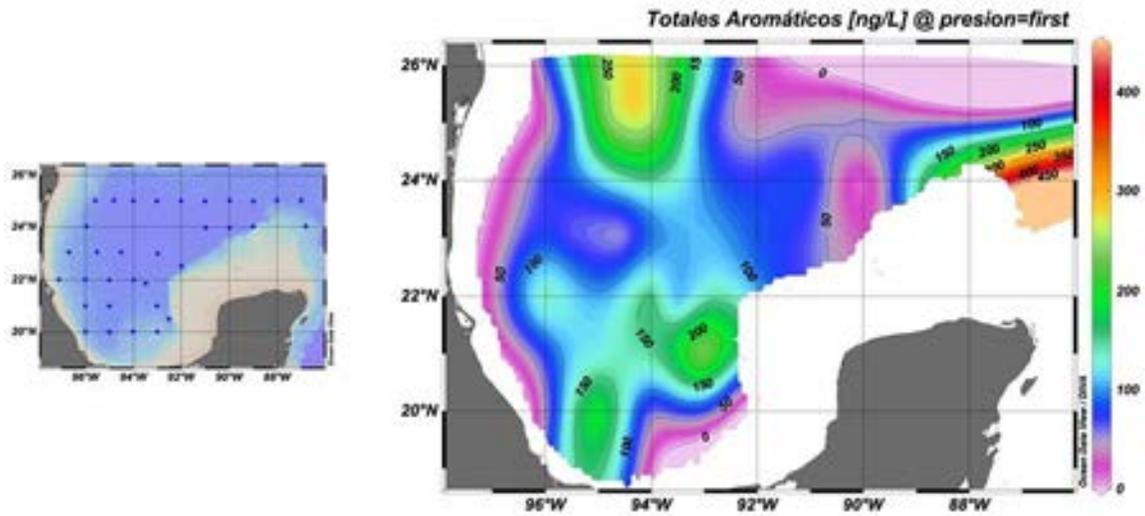


Figura 83. Distribución superficial de la suma de hidrocarburos aromáticos o PAHs medidos en muestras cercanas a la superficie. Las unidades de concentración se encuentran indicadas.

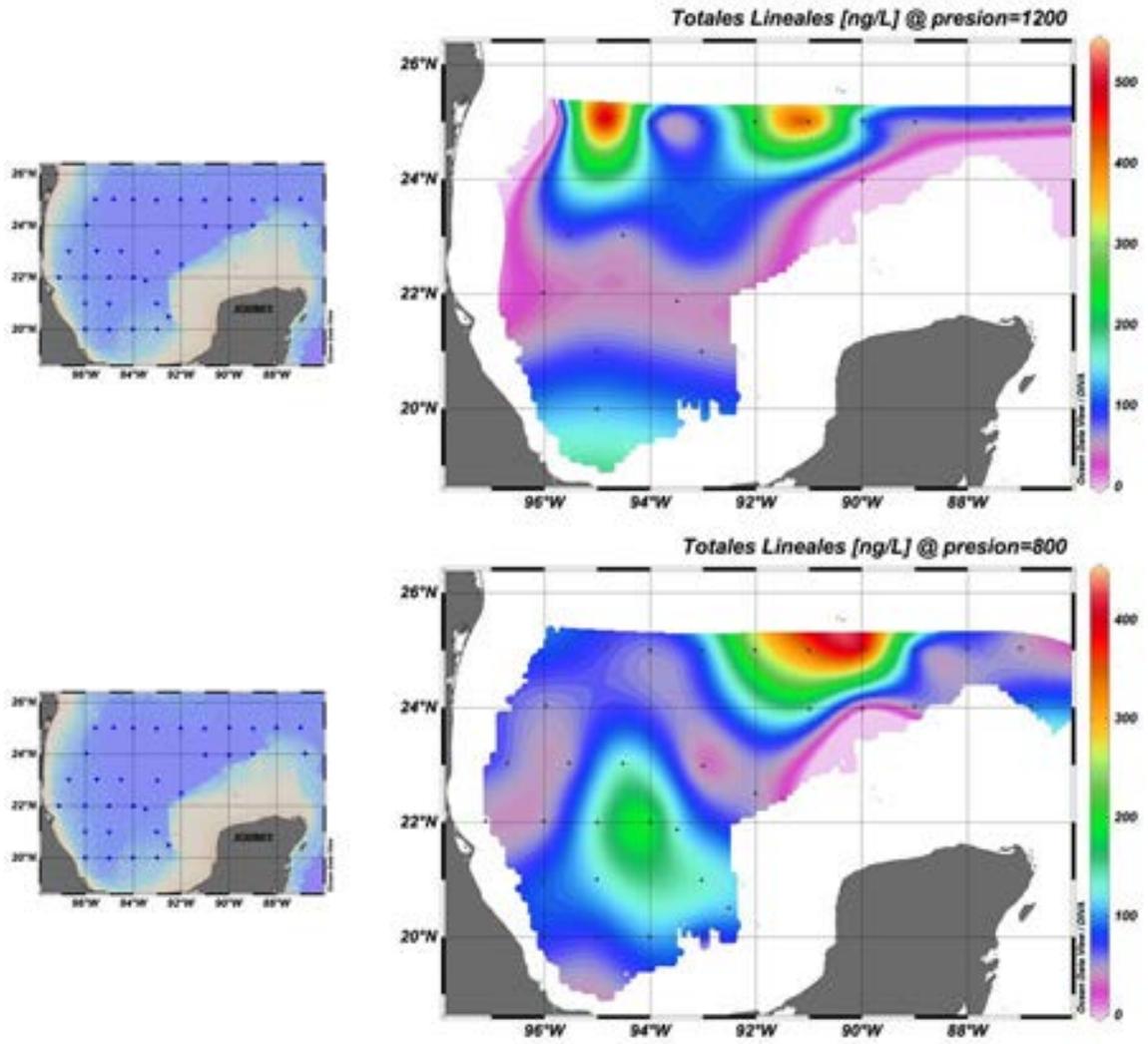


Figura 84. Distribución de la suma de la concentración de hidrocarburos lineales saturados a 1200m en la parte superior y a 800 m en la figura de la parte inferior.

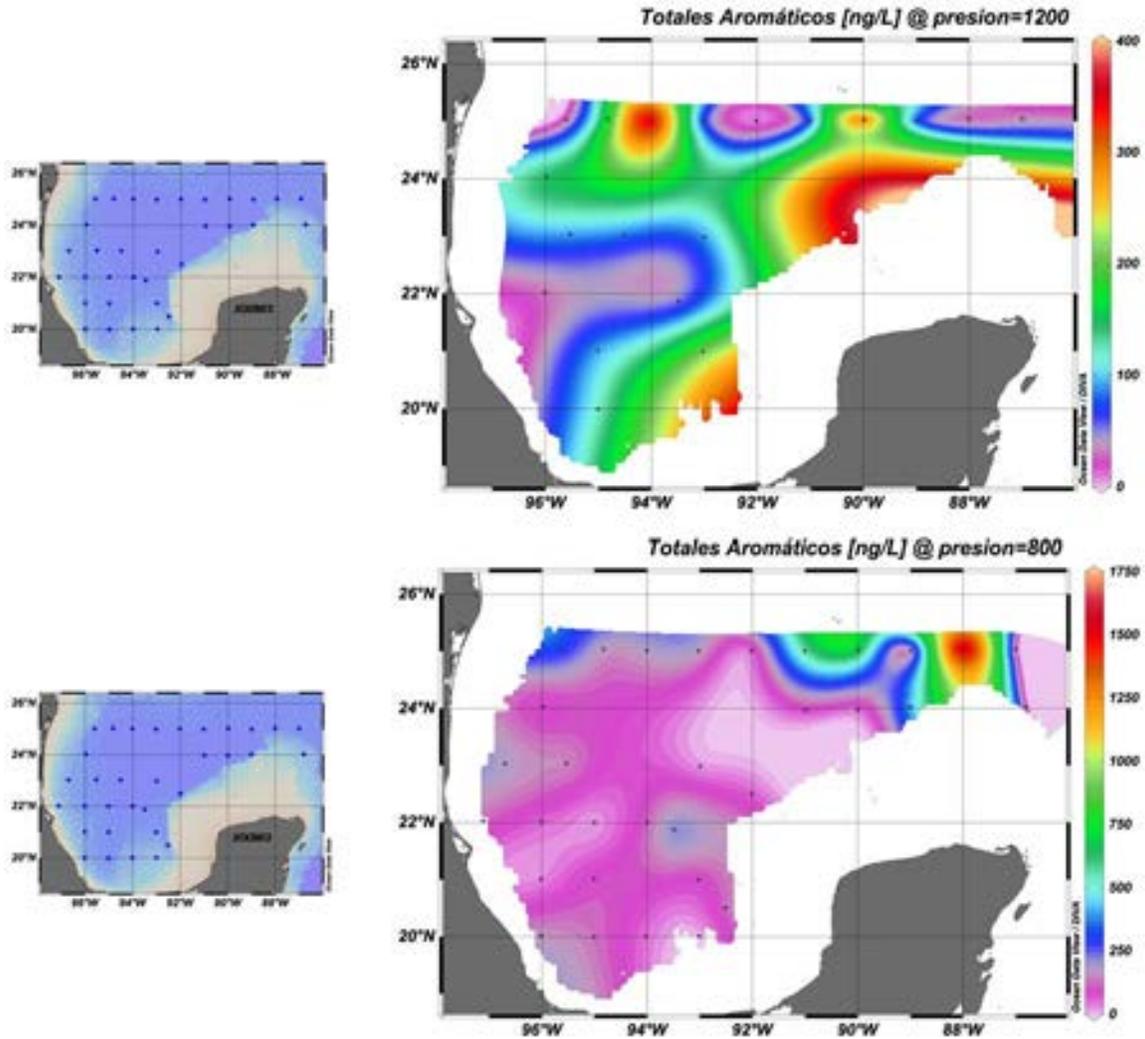


Figura 85. Distribución de la suma de la concentración de los hidrocarburos aromáticos polinucleares a 1200 m en la figura superior y a 800 m en la figura de la parte inferior.

Por otra parte, en la Figura 86 y Figura 87 se presentan diagramas de cajas y bigotes que muestran de manera resumida las distribuciones comparativas de los hidrocarburos lineales saturados y los hidrocarburos aromáticos polinucleares. En ambas figuras se puede observar que existe un amplio traslape en los valores, lo que sugiere que las concentraciones medidas a partir de las muestras recolectadas en los cruceros XIXIMI-1, XIXIMI-2 y XIXIMI-3 son similares e indistinguibles. En el caso de los hidrocarburos lineales, la mediana de las concentraciones fue de 0.35 ng/mL para 2011 y de 1.59 y 0.17 para 2012 y 2013, respectivamente. Con respecto a los hidrocarburos aromáticos polinucleares, las medianas de las concentraciones para los mismos años fueron de 0.02, 0.29 y 0.13 ng/mL respectivamente. Aunque en ambos casos existen diferencias de hasta un orden de magnitud, en ningún caso, ni en el de los hidrocarburos

lineales ni en el de los aromáticos, se encontraron diferencias estadísticamente significativas en las concentraciones debido a la variabilidad de las muestras.

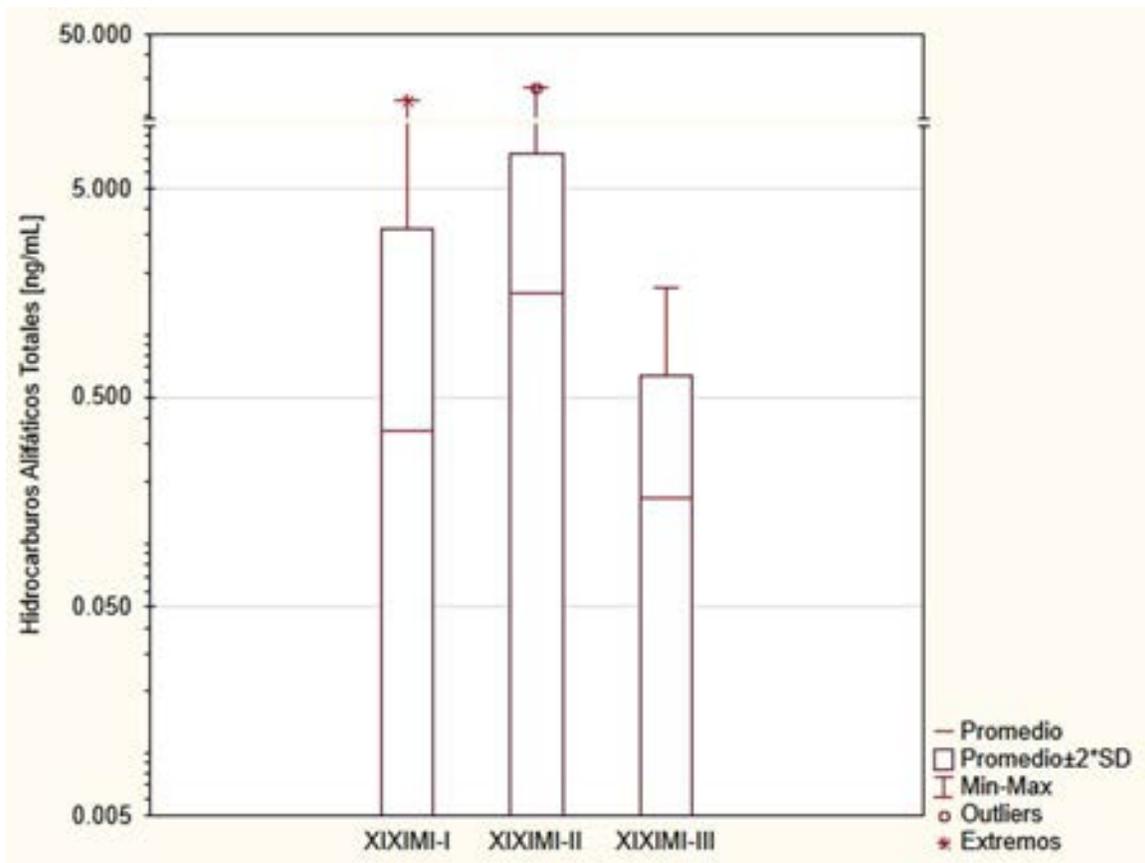


Figura 86. Diagrama de cajas y bigotes para hidrocarburos lineales saturados en los consecutivos muestreos de 2011, 2012 y 2013.

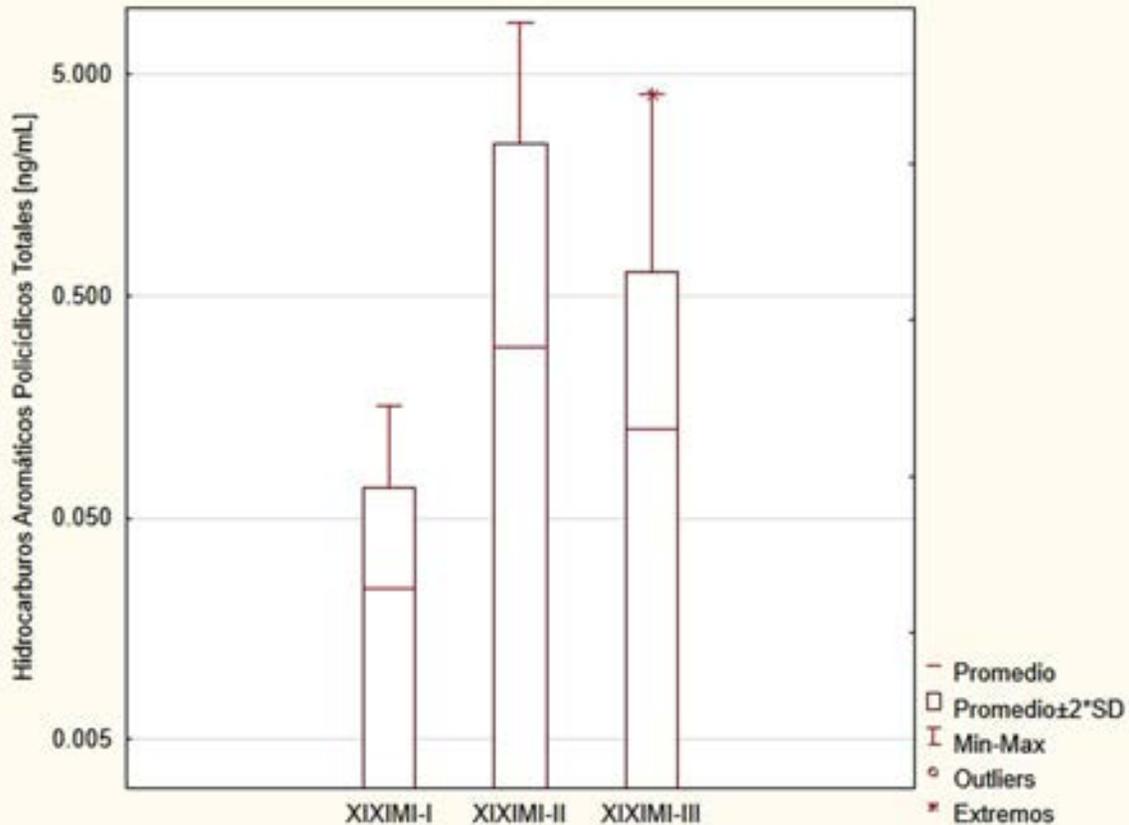


Figura 87. Diagrama de cajas y bigotes para hidrocarburos aromáticos policíclicos en los muestreos consecutivos de 2011, 2012 y 2013.

Discusión y conclusiones.

En resumen, se reporta como se puede observar en los resultados, la presencia de una variedad de hidrocarburos lineales (Figura 88) en todos los cruceros incluyendo en XIXIMI-3. Resulta interesante destacar que, como en muestreos previos, dentro de los resultados de los análisis de XIXIMI-3 se ha detectado la presencia de hidrocarburos o al menos fragmentos de distintos tamaños de estos compuestos en las estaciones E23 y E24 a profundidades de alrededor de 2000 m. Resultará muy interesante el analizar otros componentes del ciclo del carbono en estas estaciones y profundidades, así como la presencia o no un número importante de bacterias degradadoras de estos compuestos ya que el rasgo mostrado parece ser reiterativo para XIXIMI-1 y XIXIMI-3. De igual manera consideramos importante el contrastar esta información con otros grupos de investigadores que pudieran tener resultados más cercanos a la costa y vecinos a nuestra área de muestreo, para ver si existen evidencia parecidas que confirmen estos procesos. Esto ayudaría en confirmar la entrada de fragmentos al GM a través del canal de Yucatán.

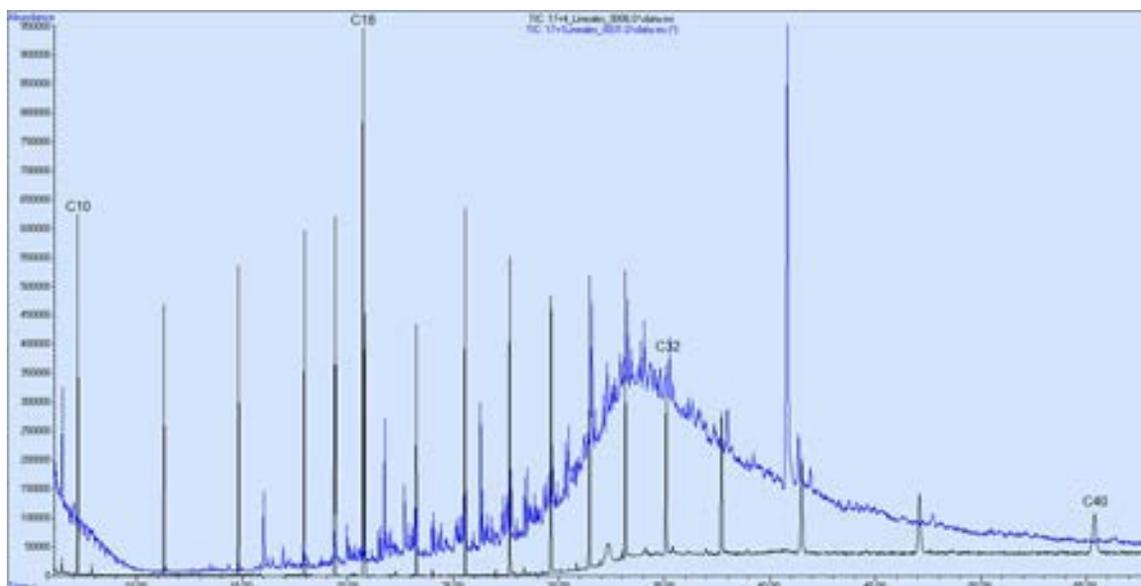


Figura 88. Cromatograma típico de hidrocarburos lineales saturados. La traza en azul corresponde a la de la muestra. La traza en negro sobrepuesta, corresponde a la serie de estándares verdaderos utilizados para identificación y cuantificación de los componentes encontrados en cada muestra.

Como hemos sugerido, y tomando en cuenta que en general los valores medidos de estos hidrocarburos son bajos, se observa con bastante claridad aportes al GM de estos compuestos en diversas regiones, particularmente desde el norte del GM. También ha resultado clara la presencia de un gradiente de concentración, quizá mas evidente en el caso de los aromáticos polinucleares (Figura 85 parte superior), de la entrada de material desde el sur, quizá asociado a las operaciones de PEMEX cerca del área donde aparece el gradiente (Bahía de Campeche) o, de manera alternativa, quizá debido al arrastre de material vía los ríos y a través de la Laguna de Términos.

En relación a la calidad de los hidrocarburos lineales encontrados, se puede mencionar que existen indicaciones de que su origen es de más de una fuente (Figura 89). En particular, si bien existen muchas estaciones con un CPI aproximadamente igual a la unidad, lo que sugiere la falta de preferencia para la formación de hidrocarburos ya sean con números de carbono pares o nones, y esto indicaría mas bien una formación típica de petróleo, pero su origen no es claro. Esto es, sus orígenes potenciales incluyen, entre otros; derrames directos desde pozos de extracción o de exploración, derrames originados durante el transporte de petróleo crudo o de combustible, desde chapopoterías, entre otros.

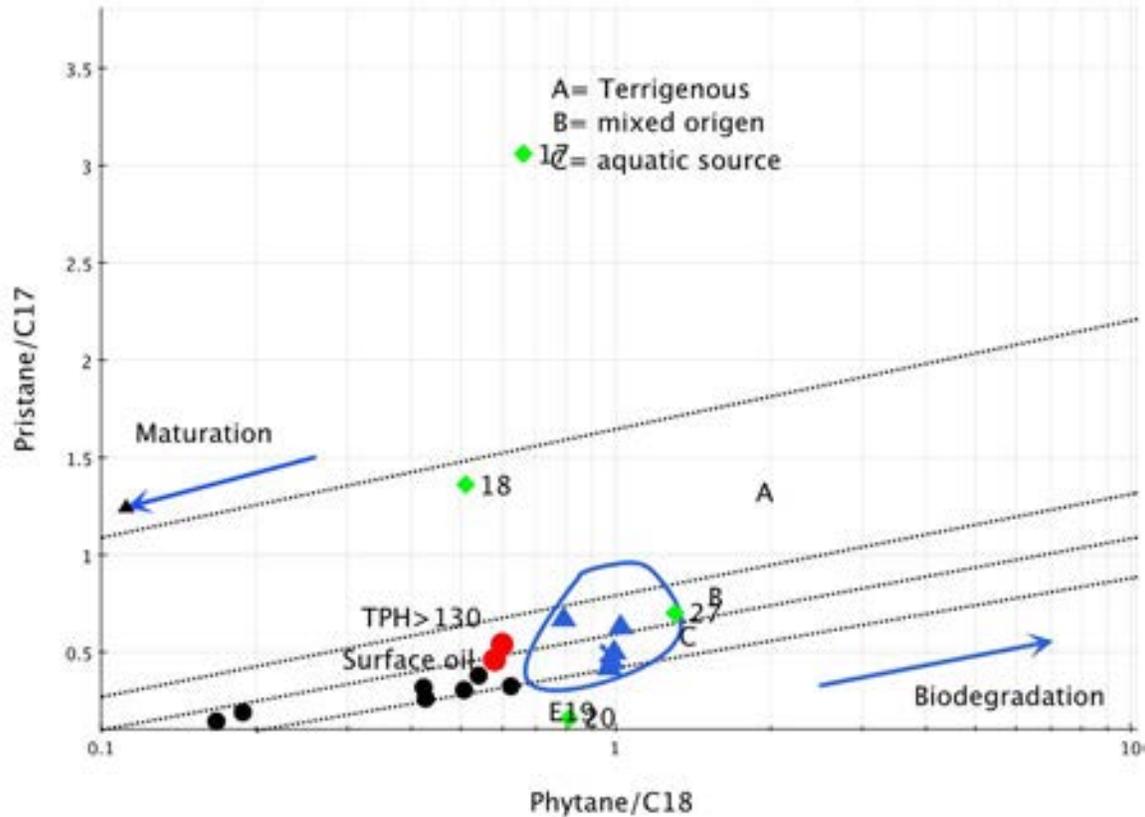


Figura 89. Gráfica de las relaciones de biomarcadores pristano y fitano con los hidrocarburos asociados C17 y C18 respectivamente. Esta figura muestra en los diamantes de color verde (XIXIMI 3), diferentes estaciones con combinaciones de estos parámetros sugiriendo orígenes distintos.

Otros parámetros también parecen confirmar que tenemos una mezcla de hidrocarburos de diferentes fuentes incluyendo la medición de los parámetros de L y H y consecuentemente, la relación L/H para hidrocarburos lineales que muestra valores menores a la unidad y valores cercanos a esta para un buen número de estaciones. La conclusión de estos datos sugiere de nuevo un origen mezclado (Figura 89) entre biogénico y petrogénico por supuesto sin asignar un origen particular.

Referencias

Bergquist, D.C., C. Fleckenstein, J. Knisel, B. Begley, I.R. MacDonald, and C.R. Fisher. 2005. Variations in seep mussel bed communities along physical and chemical environmental gradients. *Marine Ecology Progress Series* 293:89–97.

Broecker, W. S. And Peng, T. H. 1974. Gas Exchange rates between air and sea. *Tellus* 26 (1-2):21-35

- Camilli, R., Reddy, C.M., Yoerger, D.R., Van Mooy, B.A.S., Jakuba, M.V., Kinsey, J.C., McIntyre, C.P., Sylva, S.P., Maloney, J.V., 2010. Tracking hydrocarbon plume transport and biodegradation at Deepwater Horizon. *Science* 330, 201e204.
- Boehm, P. and Saba T. 2004. Identification and Allocation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs). *Environmental Forensic Notes*. Vol 4:1-5.
- Budzinski, H., Jones, I., Bellocq, J., Piñerard, C., Garrigues, P., 1997. Evaluation of sediment contamination by polycyclic aromatic hydrocarbons in the Gironde estuary. *Mar. Chem.* 58, 85-97.
- Cooper, J.E., Bray, E.E., 1963. A postulated role of fatty acids in petroleum formation. *Geochim. Cosmochim. Acta* 27, 1113– 1127.
- Diercks, A.R., Highsmith, R.C., Asper, V.L., Joung, D.J., Zhou, Z.Z., Guo, L.D., Shiller, A.M., Joye, S.B., Teske, A.P., Guinasso, N., Wade, T.L., Lohrenz, S.E., 2010. Characterization of subsurface polycyclic aromatic hydrocarbons at the Deep-water Horizon site. *Geophysical Research Letters* 37, 1-6.
- González-Gaya, B., Zuñiga-Rival, J., Ojeda, M-J. Jiménez, B. and Dachs, J. 2014. Field Measurements of the Atmospheric Dry Deposition Fluxes and Velocities of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons to the Global Oceans. *Environmental Science and Technology*. [dx.doi.org/10.1021/es500846p](https://doi.org/10.1021/es500846p)
- Hazen, T.C., Dubinsky, E.A., DeSantis, T.Z., Andersen, G.L., Piceno, Y.M., Singh, N., Jansson, J.K., Probst, A., Borglin, S.E., Fortney, J.L., Stringfellow, W.T., Bill, M., Conrad, M.S., Tom, L.M., Chavarria, K.L., Alusi, T.R., Lamendella, R., Joyner, D.C., Spier, C., Baelum, J., Auer, M., Zemla, M.L., Chakraborty, R., Sonnenthal, E.L., D'haeseleer, P., Holman, H.-Y.N., Osman, S., Lu, Z., Nostrand, J.D.V., Deng, Y., Zhou, J., Mason, O.U., (2010). Deep-sea oil plume enriches indigenous oil-degrading bacteria. *Science* 330, 204e208.
- Hollander, D.J., Freeman, K.H., Ellis, G., Diefendorf, A.F., Peebles, E.B., Paul, J. 2010. Long-lived, sub-surface layers of toxic oil in the deep-sea: a molecular organic and isotopic geochemical approach to understanding their nature, molecular distribution, origin, and impact to the northern Gulf of Mexico. *Am. Geophys. Union, Fall Meeting 2010*, tr#OS21G-02.
- Iliffe, T.M. and J.A. Calder (1974). Dissolved hydrocarbons in the Eastern Gulf of Mexico Loop Current and the Caribbean Sea. *Deep-Sea Research*, 21:481-488.
- Kennicutt MC, Barker C, Brooks JM, DeFreitas DA, Zhu GH. 1987. Selected organic matter source indicators in the Orinoco, Nile and Changjiang deltas. *Organic Geochemistry* ; 11: 41-51.

- Kujawinski, E.B., Soule, M.C.K., Valentine, D.L., Boysen, A.K., Longnecker, K., Redmond, M.C., (2011). Fate of dispersants associated with the Deepwater Horizon oil spill. *Environmental Science & Technology* 45, 1298-1306.
- Liu, Y., MacFadyen, A., Ji, Z.-G., Weisberg, R.H., 2011. Monitoring and Modeling the Deepwater Horizon Oil Spill: A Record-Breaking Enterprise. *Geophys. Monogr. Ser.* 195, Am. Geophys. Union, Washington, DC.
- Macías-Zamora, J V., Castro Morales K., Burke., R. A., and López-Mariscal, M. (2013). Dissolved methane in the sills area, Gulf of California. *Ciencias Marinas*. 39(2): 1–17. <http://dx.doi.org/10.7773/cm.v39i2.2232>
- Valentine, D.L., Kessler, J.D., Redmond, M.C., Mendes, S.D., Heintz, M.B., Farwell, C., Hu, L., Kinnaman, F.S., Yvon-Lewis, S., Du, M.R., Chan, E.W., Tigreros, F.G., Villanueva, C.J., (2010). Propane respiration jump-starts microbial response to a Deep Oil spill. *Science* 330, 208-211.
- Wang, Z. and Fingas, M. (1999). Identification of the source(s) of unknown spilled oils. *International Oil Spill Conference Proceedings: March 1999, Vol. 1999, No. 1*, pp. 211-218. <http://dx.doi.org/10.7901/2169-3358-1999-1-211>
- Zhang, Y., McEwen, R.S., Ryan, J.P., Bellingham, J.G., Thomas, H., Thompson, C.H., Rienecker, E., 2011. A peak-capture algorithm used on an autonomous underwater vehicle in the 2010 Gulf of Mexico oil spill response scientific survey. *J. Field Rob.* 28, 484–496. <http://dx.doi.org/10.1002/rob.20399>.

Glosario de términos

CPI. “Carbon preference Preference lindex”. Índice de preferencia del carbón. Representa una medida de la selectividad en la formación de los hidrocarburos. Normalmente puede calcularse un CPI para compuestos de bajo peso molecular y otro para aquellos de alto peso molecular.

$$CPI_L = \frac{1}{2} \left(\frac{(C_{15} + C_{17} + C_{19})}{(C_{14} + C_{16} + C_{18})} + \frac{(C_{15} + C_{17} + C_{19})}{(C_{16} + C_{18} + C_{20})} \right)$$

$$CPI_H = \frac{1}{2} \left(\frac{(C_{25} + C_{27} + C_{29} + C_{31} + C_{33})}{(C_{24} + C_{26} + C_{28} + C_{30} + C_{32})} + \frac{(C_{25} + C_{27} + C_{29} + C_{31} + C_{33})}{(C_{26} + C_{28} + C_{30} + C_{32} + C_{34})} \right) \text{ (Cooper and Bray, 1963).}$$

UCM. “Unresolved Complex Mixture”. Mezcla compleja sin resolver. Se refiere a compuestos orgánicos generalmente altamente ramificados y/o con anillos aromáticos en sus ramificaciones y que aparecen por debajo de la traza cromatográfica elevando la línea base. Estos compuestos no son separados por el sistema cromatográfico y generalmente se asocia a la presencia de derrames.

L / H. La razón L/H es otra manera de diferenciar orígenes de los hidrocarburos, aunque algunos autores se refieren a este parámetro como una medida de la “frescura” del derrame. Entonces, L/H menor a la unidad indica probablemente entradas de tipo biogénicas naturales de origen terrestre y marino y cerca de la unidad (1) mas posiblemente de origen petrogénico.

L frecuentemente se ubica desde C11 a C24 y H, normalmente incluye C25 a C35 (Duan, et al., 2010)

TAR. “Terrestrial to Aquatic Ratio”. Razón de fuente Terrestre vs Acuático.

$$TAR = (C27+C29+C31) / (C15+C17+C19)$$

Créditos

Deseamos expresar nuestro agradecimiento a INECC (SEMARNAT) por el soporte económico proporcionado para la realización de este proyecto. De igual manera, deseamos agradecer a la tripulación del B/O Justo Sierra de la UNAM por su tiempo y ayuda. Especial consideración y reconocimiento al Ocean. Arturo Siqueiros y a Sara O. Topete por su incansable apoyo durante la colecta de las muestras. Finalmente, nuestro reconocimiento al IIO por todo el apoyo con el equipo analítico con que se cuenta para el desarrollo de esta investigación

BACTERIOLOGÍA

Responsables: Dr. Alexei Licea, Dr. Leonardo Lizárraga, CICESE

Participantes: Ricardo González, Noemí Sánchez y Salvador Dueñas, CICESE

Antecedentes

Las bacterias son organismos procariontes, es decir, que carecen de núcleo celular. Dentro de los procariontes, se encuentran dos grandes grupos, las Eubacterias y las Arqueobacterias. Las Eubacterias, o bacterias verdaderas, son las que encontramos en ambientes idóneos para la sobrevivencia del reino animal. Por otro lado, las Arqueobacterias no poseen paredes celulares con peptidoglicanos, poseen secuencias únicas en su ARN y lípidos de membrana diferentes a las de las eubacterias y los eucariontes. Pueden ser metanogénicas (que crecen bajo condiciones anaeróbicas oxidando el hidrógeno como sustrato), halófilas (que se desarrollan en ambientes salinos), termófilas (viven a temperaturas de 80-100 °C) y tolerar niveles de pH extremadamente bajos.

El grupo de las Eubacterias contiene a las Gram-Positivas y las Gram-Negativas. Dentro de las Gram-Negativas, encontramos a las proteobacterias y a su vez, este grupo está conformado por proteobacterias alfa, beta, gama, delta y épsilon. Se han registrado géneros de proteobacterias capaces de degradar los hidrocarburos provenientes del petróleo, por lo que resulta de suma importancia el establecer la línea base de los diferentes tipos de bacterias que se encuentran en el GM. De esta manera, en caso de que se presentase un derrame de petróleo, esta información servirá de base para evaluar la capacidad de respuesta de la comunidad bacteriana.

El petróleo está compuesto de hidrocarburos que pueden utilizarse como fuente de alimento en el medio marino e incluso existen bacterias que evolucionaron y adquirieron la capacidad de degradarlos. Cada año se vierten aproximadamente 1,300,000 toneladas de petróleo en el mar, la gran mayoría a través de filtraciones naturales y, en menor cantidad, como consecuencia del tráfico de embarcaciones marinas. Las filtraciones naturales de petróleo son lentas y permiten que las comunidades microbianas lo degraden conforme entra al ambiente. Sin embargo, cuando ocurren derrames causados por el hombre, esto provoca cambios rápidos en la composición de la flora bacteriana natural, por lo que las bacterias degradadoras de petróleo que eran casi indetectables por su baja abundancia, pueden convertirse en dominantes en un tiempo corto. De hecho, en el GM, los niveles de oxígeno bajos, alrededor del petróleo en mar abierto, indican proliferación bacteriana y actividad de degradación biológica (reminerización) en respuesta a la presencia del crudo.

Se han utilizado distintos métodos para estudiar los mecanismos mediante los cuales las bacterias marinas degradan el petróleo. Uno de ellos consiste en cultivar

bacterias directamente en petróleo. Bajo estas condiciones, las bacterias utilizan como su única fuente de alimento los compuestos orgánicos del petróleo. Kato y Watanabe (2009) observaron que el crudo se emulsificó y los alcanos fueron removidos después de 7 días de cultivo, y además notaron que las cepas predominantes fueron *Alcalinovorax* spp. e identificaron a *Maricaulis* spp. y *Marinobacter* spp. Ese mismo método de cultivo le permitió a Vila et al. (2010) identificar exactamente cuáles sustratos degradaron por completo cada una de las especies mencionadas anteriormente en un período de 60 días. En ese estudio, los autores utilizaron bacterias recolectadas de la arena de la costa española afectada por un derrame de crudo en el 2002.

Para estudiar la degradación de los componentes del petróleo de Túnez (de la zona petrolera de Zarzatine) Zrafi-Nouira et al. (2009) enriquecieron la microbiota indígena del agua costera contaminada, aumentando la concentración de petróleo. Cultivaron la microbiota y evaluaron su capacidad biodegradadora y la dinámica poblacional de la microbiota cada semana durante 28 días (7, 14, 21 y 28 días). Se demostró que la degradación del petróleo depende de la actividad de un consorcio bacteriano especializado y dinámico que está compuesto de diferentes taxones filogenéticos y que depende de la complejidad del sustrato. El análisis filogenético de la microbiota demostró la presencia de cuatro grupos filogenéticos: Proteobacteria, Firmicutes, Actinobacteria y Bacteroidetes, siendo las proteobacterias las predominantes (>80%) durante los días 7, 14 y 21 de sus experimentos.

Rosano-Hernández et al. (2009) evaluaron la diversidad bacteriana de los sedimentos someros (≤ 100 m) del sur del GM en zonas de emanaciones naturales de petróleo. Emplearon técnicas moleculares que incluyeron la extracción de DNA bacteriano, la amplificación de rDNA 16S-23S, el análisis de patrones de bandas mediante RISA (rDNA Intergenic Spacer Region Analysis), y la clonación, secuenciación y análisis del rDNA para la identificación taxonómica. Con dichas técnicas, se identificó molecularmente la presencia de los géneros *Marinobacter*, *Idiomarina*, *Marinobacterium* y *Frateuria*, además, se determinó que la identificación de bacterias en sedimentos someros se puede usar como indicador de la presencia de hidrocarburos marinos en el sureste del GM.

Otra técnica molecular que ha sido utilizada para detectar la presencia de distintos grupos bacterianos en muestras de petróleo y de aguas cercanas a los pozos petroleros, es la llamada DGGE (Denaturing Gradient Gel Electrophoresis). Esta técnica permite caracterizar el rRNA 16S bacteriano, y con esto se ha encontrado que las comunidades bacterianas son mucho más variadas en muestras de agua sin petróleo, que en las muestras que sí lo contienen (Liu et al. 2009).

Actualmente, se utiliza PCR en tiempo real (RT-PCR), el cual se emplea para identificar el ADN de una bacteria o célula eucariota. El RT-PCR es una técnica que no es dependiente del cultivo, y que se puede utilizar para identificar genes de interés en muestras ambientales (Pérez-de-Mora et al. 2010). Esta técnica molecular se basa en la detección de señales fluorescentes emitidas por la síntesis de productos de PCR, las

señales son monitoreadas utilizando un fluoróforo llamado SYBR Green que se une al DNA de doble cadena. A diferencia del PCR convencional, la cuantificación por RT-PCR está basada en el incremento continuo de la señal fluorescente, la cual se mide al terminar cada ciclo. Este método se ha utilizado para evaluar la presencia de hidrocarburos, que se consideran los principales contaminantes de suelos, como resultado de derrames petroleros y de eliminación de desechos al ambiente. Por ejemplo, mediante su uso se pueden identificar y cuantificar los genes involucrados en la degradación de hidrocarburos, tal como el operón *Alk*, que es de importancia crucial para la degradación de alcanos en diferentes suelos.

La técnica molecular de amplificación de DNA por PCR ha sido utilizada para detectar la presencia de genes específicos de bacterias degradadoras de hidrocarburos, como por ejemplo, los genes que codifican la enzima alcano monooxigenasa (*Alk*). Esta aproximación permite estudiar la dispersión y diversidad de dichos genes en ambientes marinos. Se ha encontrado que hay una distribución diferenciada de bacterias en diferentes sitios de muestreo y se especificó la necesidad de hacer más estudios en el ambiente marino (Kuhn et al. 2009). Otro estudio se enfocó en las aguas superficiales del Océano Atlántico y demostró una alta diversidad de genes de organismos procariotas capaces de degradar petróleo, así como variación en la distribución geográfica en ambientes marinos (Wang et al. 2010). Los autores mencionan la importancia de continuar con análisis que se enfoquen en la detección de las enzimas alcano monooxigenasas, especialmente en las áreas pelágicas.

Un estudio llevado a cabo en la zona costera del sur del GM, destacó los aspectos generales de las comunidades de bacterias que tenían la capacidad de degradar petróleo. También evaluó el efecto que tenía el petróleo sobre la comunidad bacteriana y la respuesta de las bacterias de acuerdo a la magnitud de los aportes recibidos. Se observó que existe un patrón estacional con mayor presencia de dichas bacterias en la temporada de lluvias, mismo que no se observa en las zonas cercanas a las plataformas petroleras (Lizárraga-Partida 1996). Sin embargo; se sabe que el género *Vibrio* forma parte de las comunidades bacterianas que habitan el GM, y se cree que se encuentra asociado a la degradación de petróleo (com. pers. Lizárraga y Coldwell).

El 20 de abril del 2010, un derrame accidental de la plataforma “Deepwater Horizon” liberó aproximadamente 731 millones de litros de petróleo en aguas del norte del GM a una profundidad de 1525 metros, razón por la cual, se detectaron 2 incidentes: la bien conocida marea negra, provocada por el petróleo flotante en la superficie del mar, cuyos efectos de permanencia son relativamente cortos, y un fenómeno nuevo conformado por una densa estela de petróleo que hizo contacto con el fondo marino y perduró durante 1 mes en algunos sitios de las aguas profundas del GM, la cual, provoca efectos crónicos en la columna de agua, que limitan la recuperación de las poblaciones de los organismos expuestos (Montagna et al., 2013).

Como consecuencia de dicho derrame accidental en el GM, se han realizado diversos cruceros para evaluar efectos de diferente índole, entre los cuales, destacan

aquellos que están enfocados al estudio de bacterias de la subclase gamma, cuya población es predominante en el GM, como consecuencia del derrame de petróleo en abril del 2010 (Hazen et al., 2010), así como los estudios enfocados en las bacterias degradadoras de hidrocarburos como *Vibrio*, *Alcanivorax* y *Marinobacter* (Kostka et al., 2011; Bruns y Berthe-Corti, 1999).

Por otra parte, análisis moleculares realizados por Röling et al. (2004) demostraron la importancia y la rápida proliferación de *Alcanivorax* spp. en presencia de petróleo, lo que sugiere que este género es importante en la degradación de contaminación por hidrocarburos en ecosistemas marinos (Kostka et al. 2011).

Zettler et al. (2013) estudiaron la comunidad microbiana que habita los escombros plásticos marinos de distintas latitudes (23.292, 26.082, 31.46 y 31.628 °N) del Atlántico norte mediante microscopía electrónica de barrido y secuenciación de siguiente generación, y mencionan que lograron identificar varios genes bacterianos degradadores de hidrocarburos a través de la subunidad pequeña de rRNA. Esto apoya la posibilidad de que los microorganismos juegan un papel importante en la degradación de los escombros plásticos; además, reportan que dichos organismos pueden ser patógenos oportunistas, como algunos miembros específicos del género *Vibrio*, que dominaron una de sus muestras.

Ya son varios los autores que han informado sobre la anomalía de oxígeno observada en la estela del petróleo que se derramó en aguas profundas en luego de la explosión del Deepwater Horizon. Estos sugieren que el enriquecimiento de las bacterias indígenas dentro de la columna de agua ha sido mediada por la inyección de hidrocarburos (Kessler et al. 2011; Hazen et al. 2010; Valentine et al. 2012; Montagna et al. 2013). Además, han documentado incrementos en la abundancia de bacterias y la expresión de sus genes, tanto en las investigaciones de la estela de aguas profundas como en los humedales costeros (Hazen et al. 2010; Lu et al. 2012; Beazley et al. 2012). Los afloramientos bacterianos pueden haber resultado de un aumento en el flujo de materia orgánica disuelta o particulada en los sedimentos, lo cual, enriqueció las comunidades bentónicas. El aumento en la abundancia de nemátodos en relación con la abundancia de copépodos, reportada por Montagna et al. (2013), puede ser una primera respuesta a la posibilidad de que el derrame de petróleo del 2010 haya enriquecido la comunidad de bacterias indígenas, que a su vez podrían estar disponibles como alimento para la infauna en aguas profundas.

La degradación del petróleo en el ambiente marino está limitado por la temperatura, la disponibilidad de nutrientes (especialmente nitrógeno y fósforo), la biodegradabilidad de hidrocarburos específicos, la presencia de carbono orgánico y la presencia de microorganismos con enzimas degradadoras de petróleo (Das y Chandran, 2011; Beolchini et al., 2010). La temperatura de las aguas profundas en el GM es de alrededor de 4°C, y las concentraciones de carbono orgánico total y de nutrientes son bajas, por lo que es probable que los hidrocarburos presentes en los sedimentos, se

degradarán más lentamente que en la columna de agua o en la superficie (Baguley et al., 2008; Rowe et al., 2008).

Por otra parte, el GM es uno de los pocos sitios a nivel mundial donde se ha realizado la explotación de hidratos de gas, tanto termogénicos (gases de hidrocarburos derivados de la degradación térmica del petróleo) como biogénicos (compuestos de metano a partir de la metanogénesis biológica) (Lanoil et al. 2001). Géneros de la clase Archea con capacidad metanogénica como Methanometylovorans y Methanosaeta pueden utilizar metano como fuente de carbono; este hidrocarburo esta asociado a los compuestos fósiles que conforman el petróleo. Por tal motivo, dichos géneros han sido ampliamente estudiados por su capacidad para degradar el metano asociado al petróleo (Yu et al. 2005).

Objetivos

Establecer la composición de los grupos bacterianos presentes en la zona de aguas profundas del GM a diferentes profundidades, así como en sedimentos marinos.

Metodología

Estrategia de muestreo

Toma de muestras de la columna de agua.

Se recolectaron muestras de agua desde los 150 m hasta el fondo. Se filtraron 2 litros (L) de agua marina de cada una de las botellas oceanográficas, tanto Niskin como GoFlo. Para esto, se colocaron 2 L de agua marina de cada una de las botellas de la roseta dentro de botellas Nalgene de 2 L para microbiología. El contenido de cada botella fue filtrado mediante una bomba peristáltica Cole Parmer Easy Load Modelo 7518-00, colocando en el extremo de salida un filtro Sterivex de 0.22 µm de Millipore (Cat. No. SVGP01050). Una vez que los 2 L de agua marina de cada botella fueron filtrados, se les removió el agua que quedó dentro del filtro con ayuda de una jeringa cargada con aire. Cada uno de los filtros fue rotulado, se cubrió con parafilm en ambos extremos y se colocó de regreso en su empaque, el cual también fue rotulado. Todos los filtros se almacenaron a -20 °C.

Toma de muestras de sedimentos marinos.

Se tomaron muestras de sedimento con el multinucleador. Se tomaron cinco submuestras de uno de los subnúcleos introduciendo cinco cilindros de plástico (jeringas sin punta) de 10 mililitros. Se llevaron al laboratorio a bordo, se tomó 1 ml de cada uno de los cilindros y se colocó en un tubo eppendorf de 1.5ml rotulado y se rotularon y se almacenaron a -20°C.

Métodos de laboratorio

Diseño y síntesis de oligonucleótidos.

Se diseñaron oligonucleótidos específicos para cada uno de los grupos de proteobacterias con base en el gen del 16S ribosomal a excepción de los grupos *Vibrio* spp. e hidrocarbonoclasticas, cuyas secuencias fueron tomadas de la literatura (Liu et al. 2006 y Kuhn et al. 2009).

Para el diseño de los oligonucleótidos específicos se utilizaron los programas de cómputo MacVector versión 11.1.2 y CLC DNA Workbench versión 6, para lo cual se tomaron secuencias consenso de cada grupo de proteobacterias provenientes de la base de datos de la NCBI. Por último, se mandaron sintetizar las secuencias de cada par de oligonucleótidos específicos para cada grupo de proteobacterias, las cuales se muestran en la Tabla 16.

Tabla 16. Grupos bacterianos a identificar empleando oligonucleótidos específicos.

Grupos bacterianos	Secuencia de oligonucleotidos
Alfa proteobacteria	F 5'-ARCGAACGCTGGCGGCA-3' R 5'-TACGAATTTYACCTCTACA-3'
Beta proteobacteria	F 5'-GGGGAATTTTGGACAATGGG-3' R 5'-ACGCATTTCACTGCTACACG-3'
Gamma proteobacteria	F 5'-CMATGCCGCGTGTGTGAA-3' R 5'-ACTCCCCAGGCGGTCDACTTA-3'
Delta proteobacteria	F 5'-TTCCTTGGAAACAGGGAGTG-3' R 5'-TTCATGGAGTCGAGTTGCAG-3'
Épsilon proteobacteria	F 5'-ATGACGCATTTTCGGTGTGTA -3' R 5'-GTTTAGGGCGTGGACTACCA-3'
Hidrocarbonoclasticas (alk) alcano monooxigenasa	F 5'-GCI CAI GAR ITI RKI CAY AA-3' R 5'-GCI TGI TGI TCI SWR TGI CGY TG-3'
<i>Vibrio</i> spp.	F 5'-GGA TAA CT/TA TTG GAA ACG ATG-3' R 5'-CAT ATG AGT GTC AGT G/ATC TG-3'
<i>Alcanivorax</i> spp.	F 5'-GAG TAC TTG ACG TTA CCT ACA G R 5'-ACC GGA AAT TCC ACC TC
<i>Marinobacter</i> spp.	F 5'-TGG CTA ATA CCC ATG AGG R 5'-TAG GTG GTT TGG TAA GCG
<i>Methanomicrobiales</i>	F 5'-ATC GRT ACG GGT TGT GGG R 5'-CAC CTA ACG CRC ATH GTT TAC
<i>Methanomethylovorans</i> spp.	F 5'-GGGATAATTCCGGATAGAT R 5'-ATTTATACATATGGACAGCCAAC
<i>Methanosaeta</i> spp.	F 5'-TAGGTGTCTGGCCACGGT R 5'-CGGCCATGCACCICICTC

Extracción de DNA bacteriano de las muestras de la columna de agua

Para la extracción de DNA se utilizó el “Wizard Genomic DNA Purification Kit” de Promega y para poder realizar la extracción de DNA en el interior de los filtros Sterivex de Millipore de 0.22 µm, se modificó el protocolo de lisis celular de la siguiente manera:

Se añadieron 600 µl de la solución de lisis nuclear (nuclei lysis solution) a los filtros Sterivex, se cubrieron con parafilm ambos extremos de cada filtro y se colocaron dentro de un horno de hibridación con carrusel UVP HL-2000 HybriLinker a una temperatura de 80°C durante 10 minutos. Posteriormente, se enfriaron hasta temperatura ambiente (23°C) y el líquido contenido en cada filtro se traspasó a tubos de 1.5 ml con ayuda de una jeringa. Se les añadieron 3 µl de “RNase Solution Mix” y se mantuvieron a 37°C durante 30 minutos en una incubadora SHEL LAB Modelo 1510E. Una vez transcurrido el tiempo de incubación, se dejaron enfriar hasta temperatura ambiente y se añadieron 200 µl de la solución precipitadora de proteínas del kit (Protein Precipitation Solution), se mezclaron mediante vórtex (IKA Works Modelo MS1-S1) y se incubaron en hielo durante 5 minutos.

Los tubos se centrifugaron a 13000 rpm durante 3 minutos en una microcentrífuga Eppendorf modelo 5414D. Se transfirió el sobrenadante a un tubo de 1.5 ml que contenía 600 µl de isopropanol a temperatura ambiente y se mezcló levemente. De nuevo se centrifugaron a 13000 rpm durante 2 minutos, pero esta vez se descartó el sobrenadante. Se añadieron 600 µl de etanol al 70% a temperatura ambiente y se mezcló levemente, después se volvieron a centrifugar a 13000 rpm durante 2 minutos y el etanol se aspiró con una micropipeta. El pellet de DNA se dejó secar durante toda la noche y a la mañana siguiente fue rehidratado con 80 µl de agua libre de nucleasas. Cada muestra fue congelada y mantenida a -20°C.

Una vez que las muestras se rehidrataron durante un mínimo de 24 horas, se les midió la concentración de DNA mediante un espectrofotómetro GE Nanovue 28924403 y posteriormente, todas las muestras fueron ajustadas con agua libre de nucleasas para alcanzar una concentración final de 2-3 ng/µl de DNA.

Extracción de DNA bacteriano de las muestras de sedimento marino

Para la extracción de DNA se utilizó el “UltraClean Soil DNA Isolation Kit” de MoBio. Se añadieron 60 µl de Solución S1 y se mezcló por vortex, se añadieron 200 µl de solución removedora de Inhibidores (IRS) y se colocaron en vortex por 10 minutos con las cuentas de vidrio. Una vez transcurrido el tiempo, se transfirió el sobrenadante a un tubo limpio y se le añadieron 250 µl de la Solución S2, se colocaron en el vortex durante 5 segundos y se incubaron a 4°C durante 5 minutos para después centrifugarlos a 10,000 x g. Se transfirieron 450 µl del sobrenadante a un tubo limpio y se añadieron

900 µl de Solución S3 y se colocaron en el vortex durante 5 segundos. Se tomaron 700 µl de la solución, se colocaron en el filtro y se centrifugó por 1 min a 10,000 x g. Se añadieron 300 µl de la solución S4 y se centrifugó por 30 segundos, se desechó el líquido y se volvió a centrifugar el filtro a 10,000 x g por 1 minuto. Se colocó el filtro en un tubo nuevo y se añadieron 50 µl de agua libre de nucleasas y se centrifugó a 10,000 x g durante 30 segundos. Las muestras se almacenaron a -20 °C.

Estandarización de las amplificaciones de DNA por RT-PCR

Para poder llevar a cabo la amplificación del DNA bacteriano por RT-PCR, fue necesario estandarizar la concentración de DNA y de los oligonucleótidos. Se utilizó como estándar para pruebas una muestra de 2 L de agua de mar proveniente de la costa de Ensenada, BC, la cual fue filtrada del mismo modo que a bordo del barco en un filtro Sterivex. Se le extrajo el DNA con la finalidad de simular una de las muestras, sin desperdiciar ninguna muestra de las originales en las pruebas de estandarización.

Se midió la concentración de DNA de la muestra utilizada como estándar con un espectrofotómetro GE Nanovue empleando una longitud de onda de 230 nm. Se prepararon 5 diluciones de la muestra: 1 ng, 0.1 ng, 0.01 ng, 0.001ng y 0.0001 ng de DNA. Cada una fue analizada por triplicado para llevar a cabo reacciones de amplificación de DNA por medio de la técnica de RT-PCR en un StepOnePlus de Applied Biosystems. Posteriormente, se calculó la concentración de DNA en cada una de las muestras estándar con la siguiente fórmula (1) obtenida mediante la siguiente ecuación en el programa de cómputo MatLab (Figura 90).

$$(1) \text{ Concentración de DNA en la muestra} = 9.7654E+31 * \text{VALOR (CT)}^{-21.849}$$

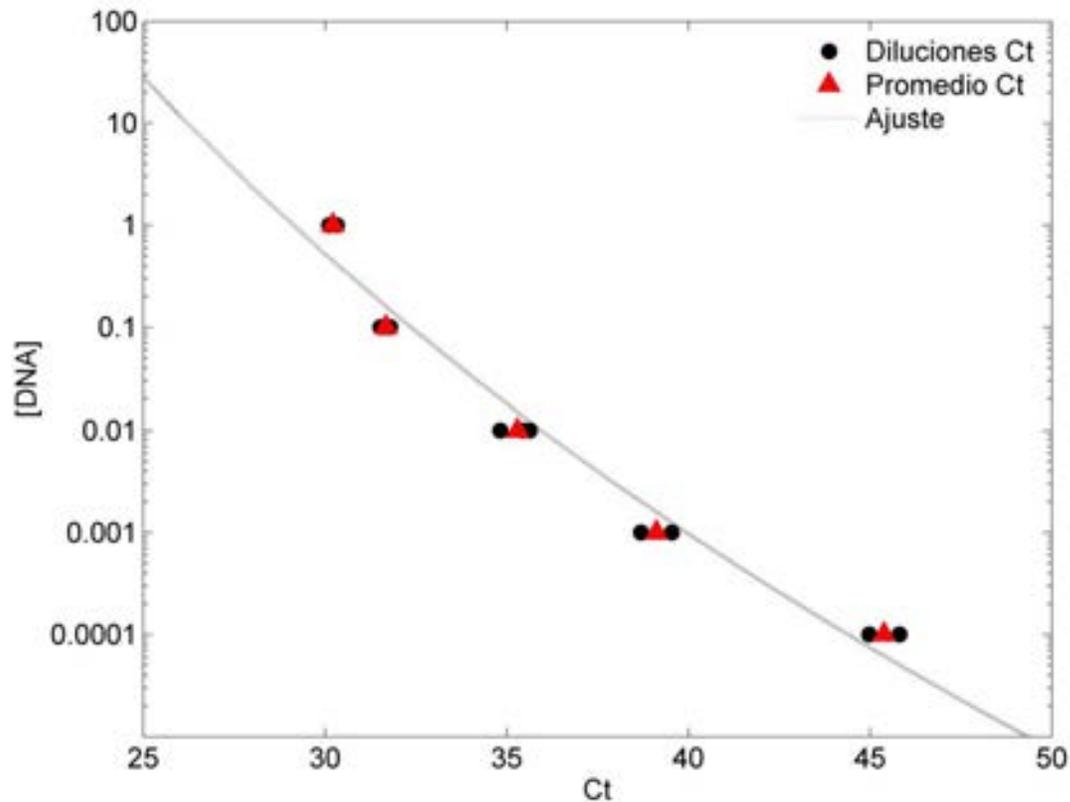


Figura 90. Amplificaciones de las diluciones del DNA de proteobacterias de la muestra estándar por triplicado, obtenidas mediante RT-PCR, utilizadas para determinar la concentración de DNA de cada dilución, por medio de la aplicación de una ecuación logarítmica.

Amplificaciones de DNA de los grupos bacterianos por RT-PCR

Las amplificaciones de DNA de cada grupo bacteriano se llevaron a cabo mediante RT-PCR en placas ópticas de 96 pozos MicroAmp de Applied Biosystems, utilizando 5 μ l del reactivo Fast SYBR Green Master Mix, también de Applied Biosystems, 0.3 μ l de cada oligonucleótido a una concentración de 20 μ M y una concentración de 10 ng de DNA de muestra por cada reacción. Después, cada placa fue centrifugada en una Multifuge 1S-R de Heraeus durante 2 minutos a 4400 rpm a 23°C y finalmente colocada en el RT-PCR para realizar la reacción de amplificación del DNA.

Las condiciones de amplificación, consistieron en una desnaturalización inicial a 95°C durante 5 minutos y 50 ciclos de 95°C por 30 segundos, 55°C por 1.5 minutos y 72°C por 1 minuto.

Métodos de Análisis

Grupos bacterianos presentes en la columna de agua

Para identificar los grupos bacterianos que estuvieron presentes en las muestras de la columna de agua del GM, el valor de CT obtenido de cada una de las muestras se sustituyó en la fórmula 1 para calcular la concentración de DNA.

En una primera fase de análisis de los datos, se normalizaron en relación a la máxima concentración de DNA que se encontró en cada profundidad y se graficaron las concentraciones de DNA de las 5 subclases de proteobacteria (Alfa, Beta, Gamma, Delta y Epsilon). En una segunda fase, las concentraciones de DNA de las bacterias Hidrocarbonocásticas y metanomicrobiales, así como géneros representativos de estos grupos bacterianos (Alcalinovorax, Marinobacter, Vibrio, Methanomethilovorans y Methanosaeta) se normalizaron de la misma manera que en el caso anterior, es decir, considerando como unidad la máxima concentración de DNA encontrada en ese punto..

Una vez realizadas las amplificaciones de DNA de las muestras de agua de cada una de las estaciones a las diferentes profundidades, se procedió a determinar la cantidad de DNA de cada uno de los grupos taxonómicos, tal como se menciona en métodos de laboratorio y de análisis.

Grupos bacterianos presentes en el sedimento marino

Para determinar qué grupos bacterianos están presentes en el sedimento marino del GM, los valores de CT de cada una de las muestras de sedimento también fueron sustituidos en la fórmula 1. Sin embargo, se analizaron de manera diferente que en el caso de las muestras de agua, ya que en este caso, las concentraciones de DNA de todas las estaciones se normalizaron y graficaron juntas.

Resultados

Se analizaron todas las profundidades para las cuales se recolectaron muestras (150 m hasta 1000 m en estaciones someras y de 150 m hasta cerca al fondo en las estaciones profundas). Sin embargo, para simplificar la presentación de los resultados, se decidió graficar solo cuatro profundidades: 400, 1200, 2000 m y Fondo (botella disparada a aproximadamente 40 m del fondo marino). En esta sección se muestran solo resultados representativos, y se incluyen como anexo (Anexo X) los resultados por estación y profundidad.

Se seleccionó la profundidad nominal de 400 m/mínimo de oxígeno como una de las profundidades para las cuales se presentarían los resultados gráficos en este informe. Como se detalla en el informe del crucero XIXIMI-3 (Herzka et al. 2013), la profundidad

a la cual se disparó la botella fue o 400 m o en la zona mínima de oxígeno. Ésta es una zona de un alto nivel de actividad biológica en la columna de agua. Para simplificar la presentación de resultados, nos referimos a la muestra del mínimo en la concentración de O₂ como “400 m”.

La profundidad de 1200 m fue seleccionada debido a que está muy cercana a la profundidad en la cual se registró el derrame del pozo Macondo y corresponde a una profundidad intermedia para el GM. Las profundidades de 2000 m y fondo fueron seleccionadas debido a que de existir emanaciones naturales de petróleo en el fondo del GM, la comunidad bacteriana de esta masa de agua podría verse afectada por este fenómeno natural.

Identificación de Alfa, Beta, Gama, Delta y Épsilon Proteobacterias

Dentro de los diferentes grupos que conforman a las proteobacterias, se pueden encontrar géneros con capacidad para degradar los hidrocarburos provenientes del petróleo, específicamente de los grupos gama y delta, por lo que, en caso de encontrar la presencia de petróleo en alguna de las muestras, se podría esperar que estos dos grupos incrementen su abundancia.

Los grupos de bacterias predominantes en la columna de agua en las muestras recolectadas durante el crucero XIXIMI-3 fueron las alfa y las beta proteobacterias para la mayoría de las estaciones y profundidades analizadas (Tabla 17), al igual que en los cruceros anteriores

Tabla 17. Abundancia relativa (estandarizada a la concentración de DNA) de grupos bacterianos por estación de la campaña XIXIMI-3. Se presentan los resultados siguiendo la secuencia de muestreo durante el crucero. En la casilla se indica el grupo más abundante y el porcentaje de abundancia de este. (X) Indica que no se recolectó esa muestra en esa estación

Estación	400 m profundidad	1200 m profundidad	2000 m profundidad	Profundidad Máxima (40 m del fondo)
1	Épsilon 46%	X	X	X
2	Beta 84%	X	X	X
12	Beta 95%	Beta 83%	Beta 62%	Beta 51%
15	Épsilon 49%	X	X	X
16	Beta 49%	Alfa 84%	Alfa 92%	Alfa 97%
17	Beta 52%	Alfa 44%	Alfa 82%	Alfa 50%
18	Beta 95%	Beta 82%	Beta 94%	Beta 61%
19	Beta 97%	Beta 91%	Beta 81%	Beta 81%
20	Beta 92%	Beta 91%	Beta 88%	Beta 86%
21	Beta 60%	Alfa 78%	Alfa 71%	Épsilon 44%
22	Beta 76%	Beta 50%	Beta 60%	Épsilon 29%
23	Beta 87%	Beta 97%	Beta 57%	Alfa 62%
24	Beta 73%	Beta 80%	X	Beta 65%

Tabla 17, continuación.

27	Alfa 98%	X	X	X
30	Beta 93%	X	X	X
31	Beta 99%	Beta 93%	Beta 50%	Beta 92%
32	Beta 57%	X	X	X
47	Alfa 61%	X	X	X
44	Beta 88%	Beta 89%	Beta 80%	Beta 86%
3	Beta 98%	Beta 75%	Alfa 81%	Alfa 55%
3B	Alfa 87%	Alfa 90%	Alfa 96%	Alfa 97%
4	Beta 54%	Alfa 82%	Alfa 50%	X
5	Beta 56%	X	X	X
7	Beta 69%	X	X	X
43	Beta 98%	Gamma 53%	Gamma 48%	Beta 61%
36	Alfa 95%	Beta y Épsilon 33%	Épsilon 50%	Alfa 78%
35	Alfa 96%	X	X	X
42	Alfa 80%	X	X	X
41	Beta 98%	X	X	X
37	Alfa 78%	X	X	X
38	Beta 86%	Alfa 78%	Beta 81%	X
40	Beta 95%	Beta 67%	Beta 95%	Beta 96%
46	Alfa 54%	X	X	X
39	Alfa 82%	X	X	X

Los resultados obtenidos para las 34 estaciones a la profundidad de 400 m indican una predominancia de la subclase alfa proteobacteria, que en promedio conformaron el 71% del total del DNA, mientras que el 29% del total del DNA correspondió a la subclase beta. Por otra parte las subclases gamma, delta y Épsilon proteobacteria mostraron una baja predominancia en cuanto a su abundancia, con menos del 1% del total de ADN en las muestras en promedio (Figura 91). En la Figura 92 se presentan algunos ejemplos de diferentes estaciones a 400 m en las cuales la subclase alfa predomina ampliamente sobre las demás subclases.

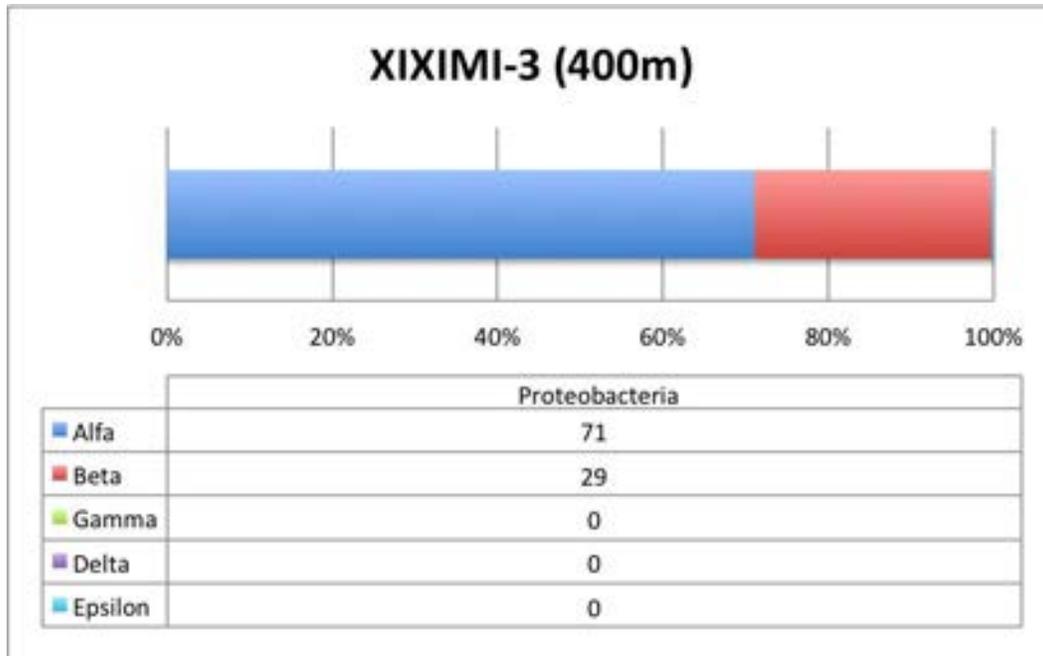


Figura 91. Porcentaje promedio de DNA de distintos grupos bacterianos a la profundidad nominal de 400m (en el mínimo de oxígeno) en el GM. La subclase alfa fue la predominante, con un promedio del 71% del total del DNA en las 34 estaciones.

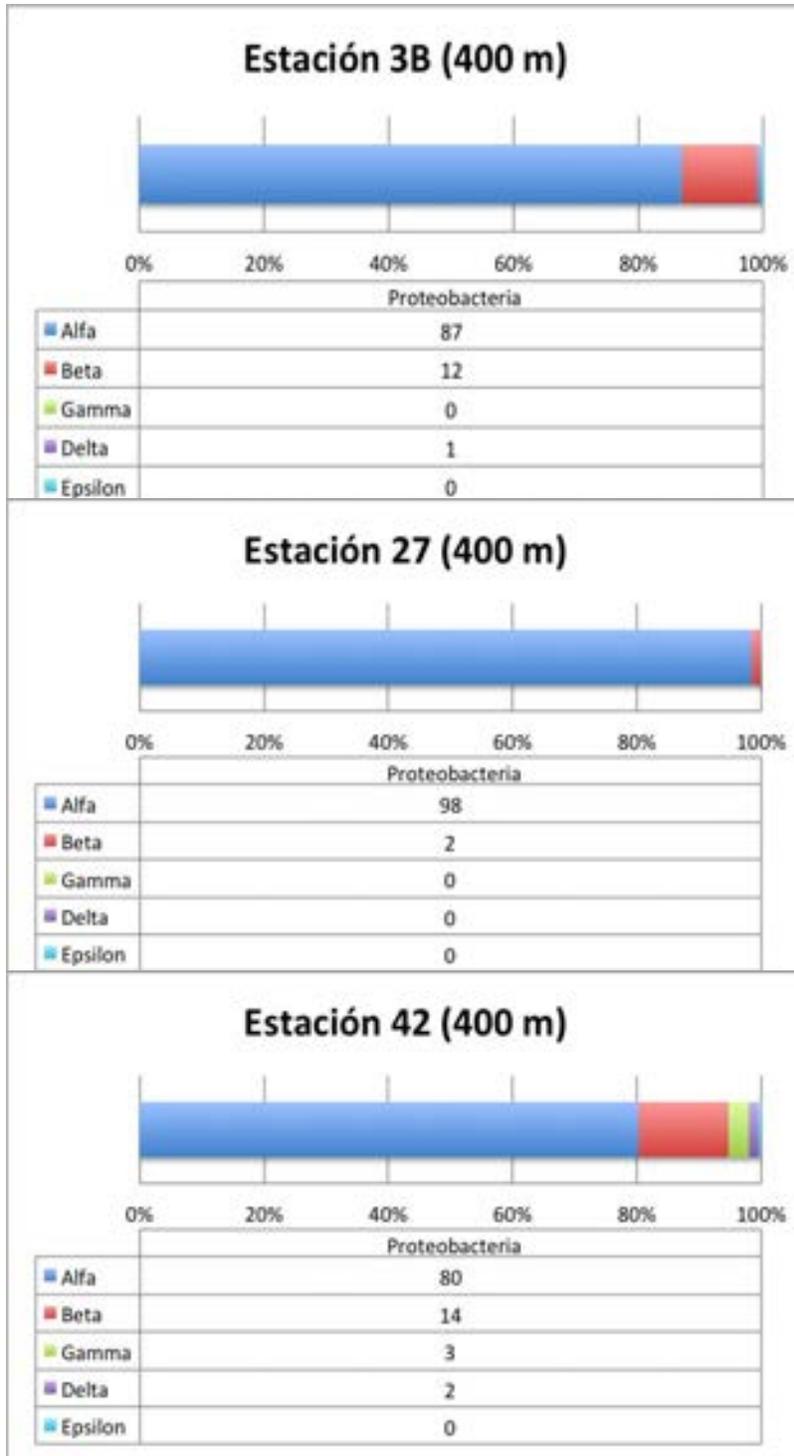


Figura 92. Ejemplos de las estaciones donde predominó la abundancia de DNA de la subclase alfa proteobacteria a una profundidad nominal de 400 metros (en el mínimo de oxígeno).

A una profundidad de 1200 m y considerando el total de estaciones, se observó la dominancia de la subclase beta con un promedio del 61% del total del DNA, seguido por la subclase alfa con 31% del total. A esta profundidad la subclase gamma y épsilon estuvieron presentes con tan solo un promedio de 3% respectivamente, mientras que el DNA de la subclase delta contribuyó tan solo el un 2% del total (Figura 93). La Figura 94 muestra ejemplos de los resultados de muestras de agua de diferentes estaciones a 1200 m, en las cuales se puede apreciar la dominancia de la subclase beta.

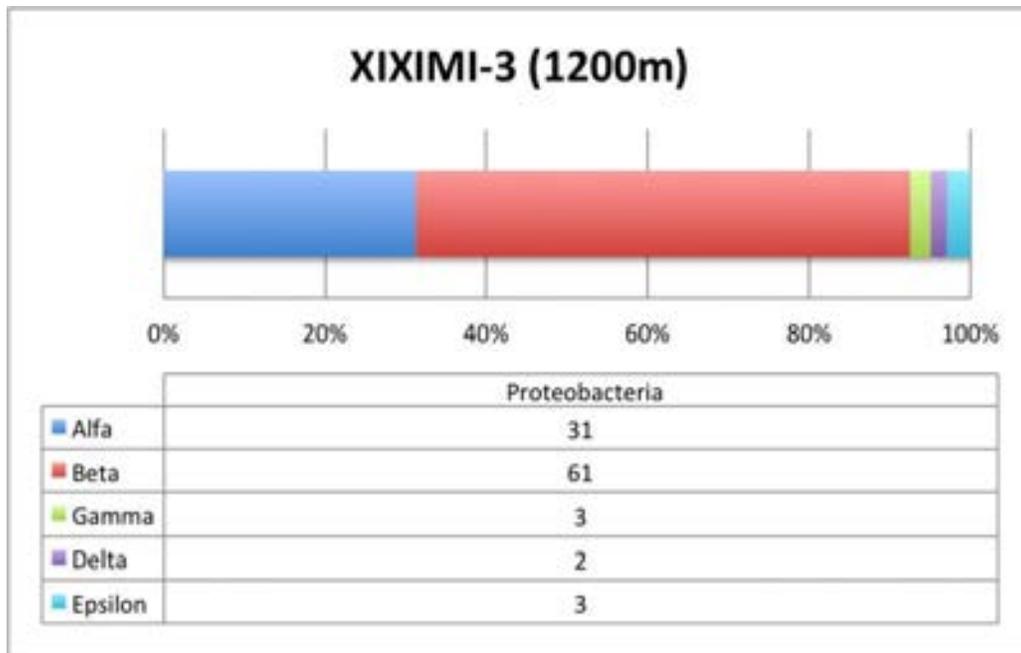


Figura 93. Porcentaje promedio de DNA de distintos grupos bacterianos a la profundidad nominal de 1200 metros en el GM. La subclase beta fue la predominante, con un 61% del total del DNA en las 34 estaciones.

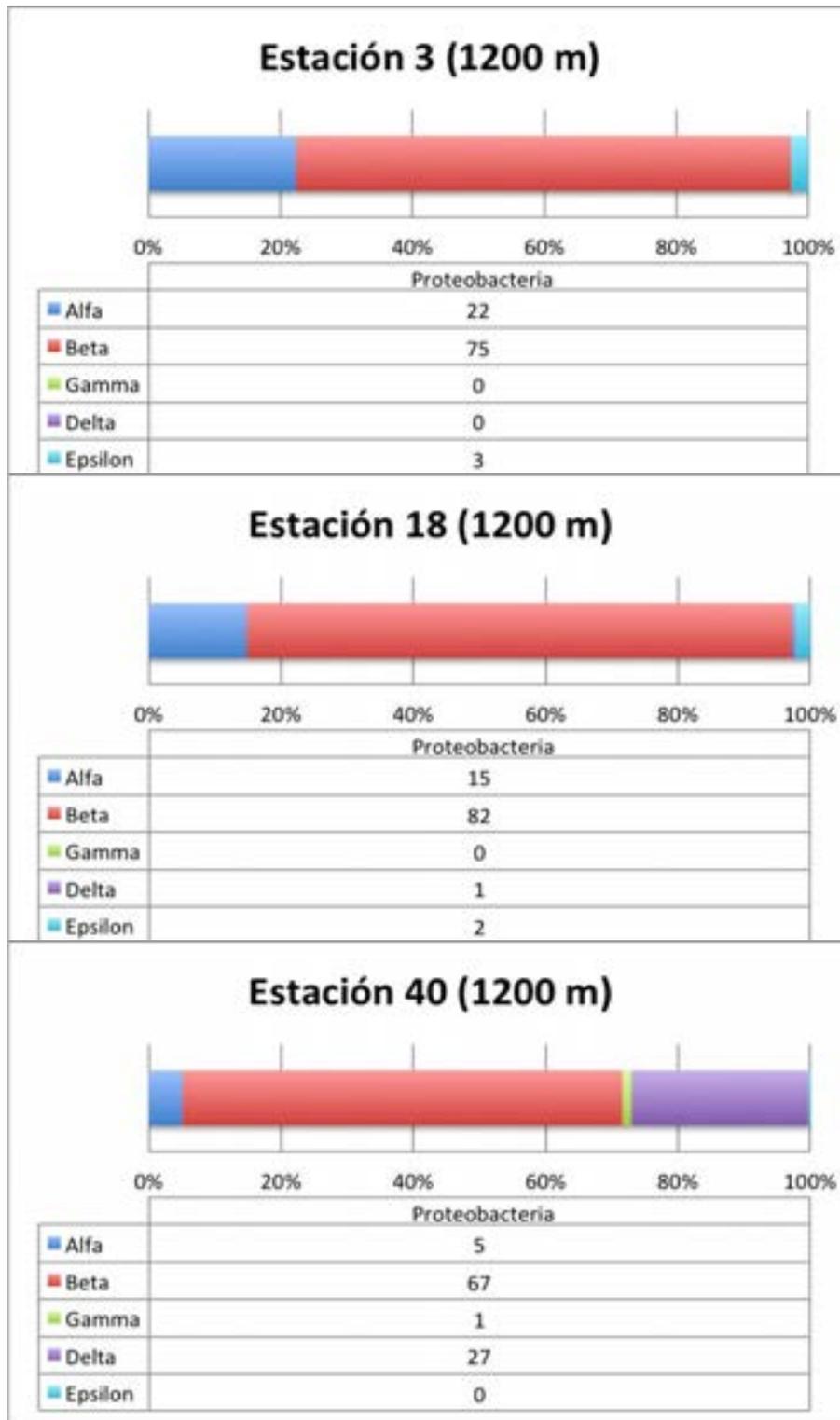


Figura 94. Ejemplos de las estaciones donde predominó la abundancia de DNA de la subclase beta proteobacteria a una profundidad nominal de 1200 metros

Los resultados del total de muestras recolectadas a 2000 metros mostraron una predominancia de la subclase alfa; en promedio del 56% del total de DNA corresponde a dicha subclase. A esta profundidad la dominancia de la subclase alfa está representada en menor proporción que en el mínimo de oxígeno y a los 1200 m, ya que se observó un aporte de las subclases beta del 32%, así como un 8% para la subclase gamma, 4% para la subclase épsilon y 1% para la subclase delta (Figura 95). La Figura 96 muestra ejemplos de diferentes estaciones a 2000 metros en las cuales se puede apreciar la dominancia de la subclase alfa.

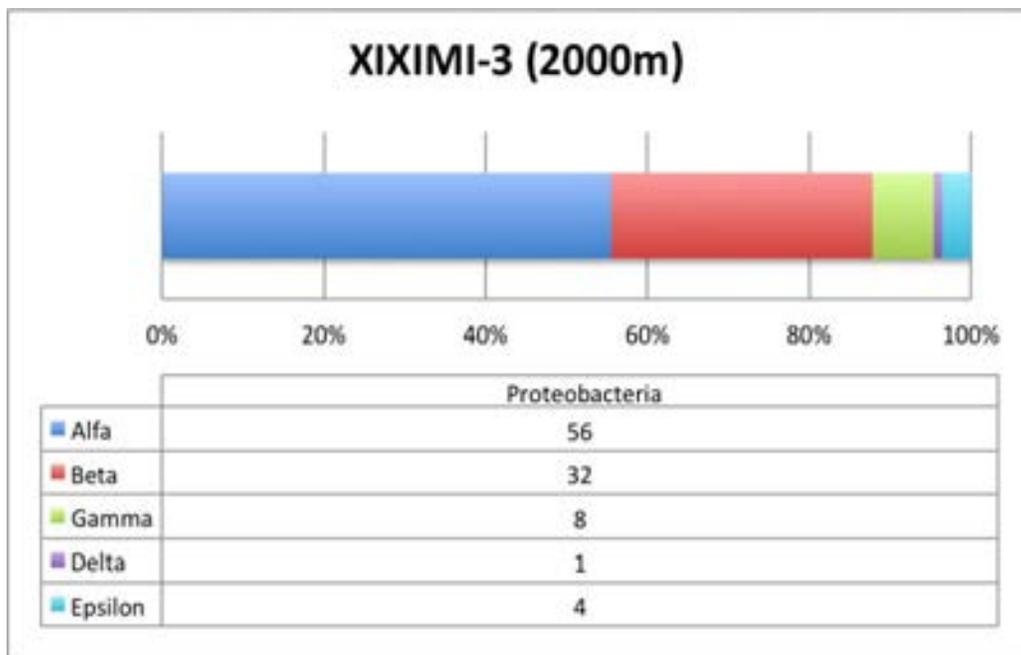


Figura 95. Porcentaje promedio de DNA de distintos grupos bacterianos a la profundidad nominal de 2000 metros en el GM. La subclase alfa fue la predominante, con un 56% del total del DNA en las 34 estaciones

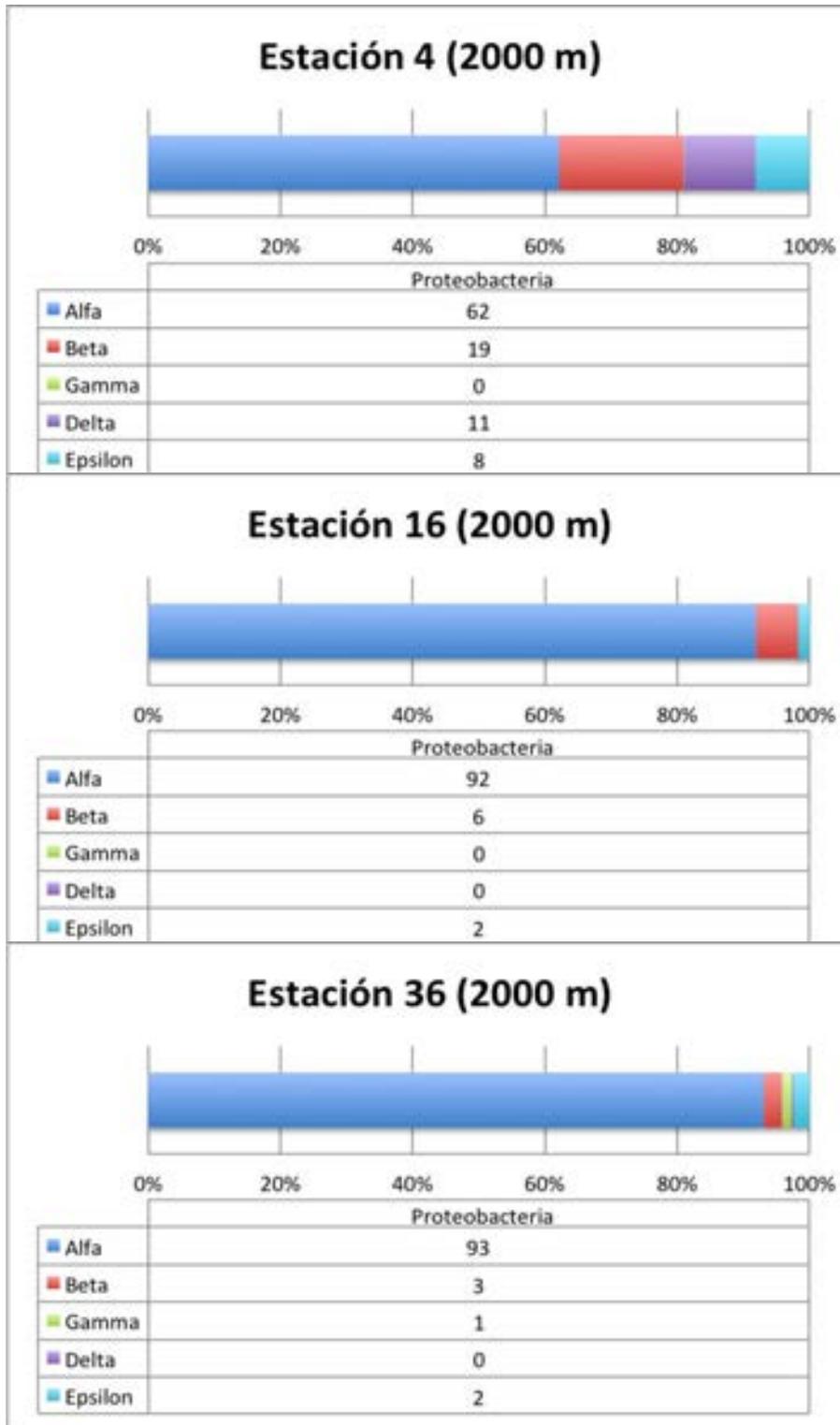


Figura 96. Ejemplos de las estaciones donde predominó la abundancia de DNA de la subclase alfa proteobacteria a una profundidad nominal de 2000 metros.

Los resultados obtenidos para las muestras de agua recolectadas en las estaciones a 40 metros del fondo marino (fondo) mostraron una predominancia de las subclases alfa y beta con un 43% y 42% del DNA total, respectivamente. Las bacterias de la subclase épsilon conformaron el 12% del total. Por otro lado, la abundancia relativa de las bacterias de la subclase gamma fue del 2%, y la de subclase delta fue del 1% (Figura 97). La Figura 98 muestra ejemplos de estaciones en las cuales predominaron las bacterias de las subclases alfa y beta.

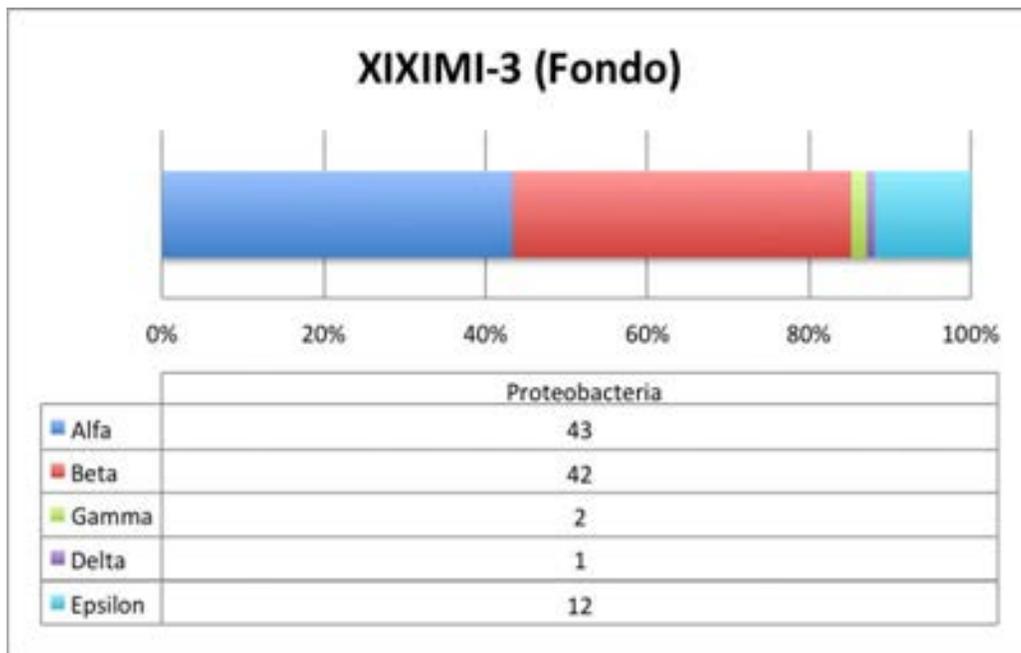


Figura 97. Porcentaje promedio de DNA de distintos grupos bacterianos a la profundidad nominal de 40 metros sobre el fondo marino del GM. Las subclases alfa y beta fueron predominantes, con un 43% y 42% del total del DNA en las estaciones muestreadas.

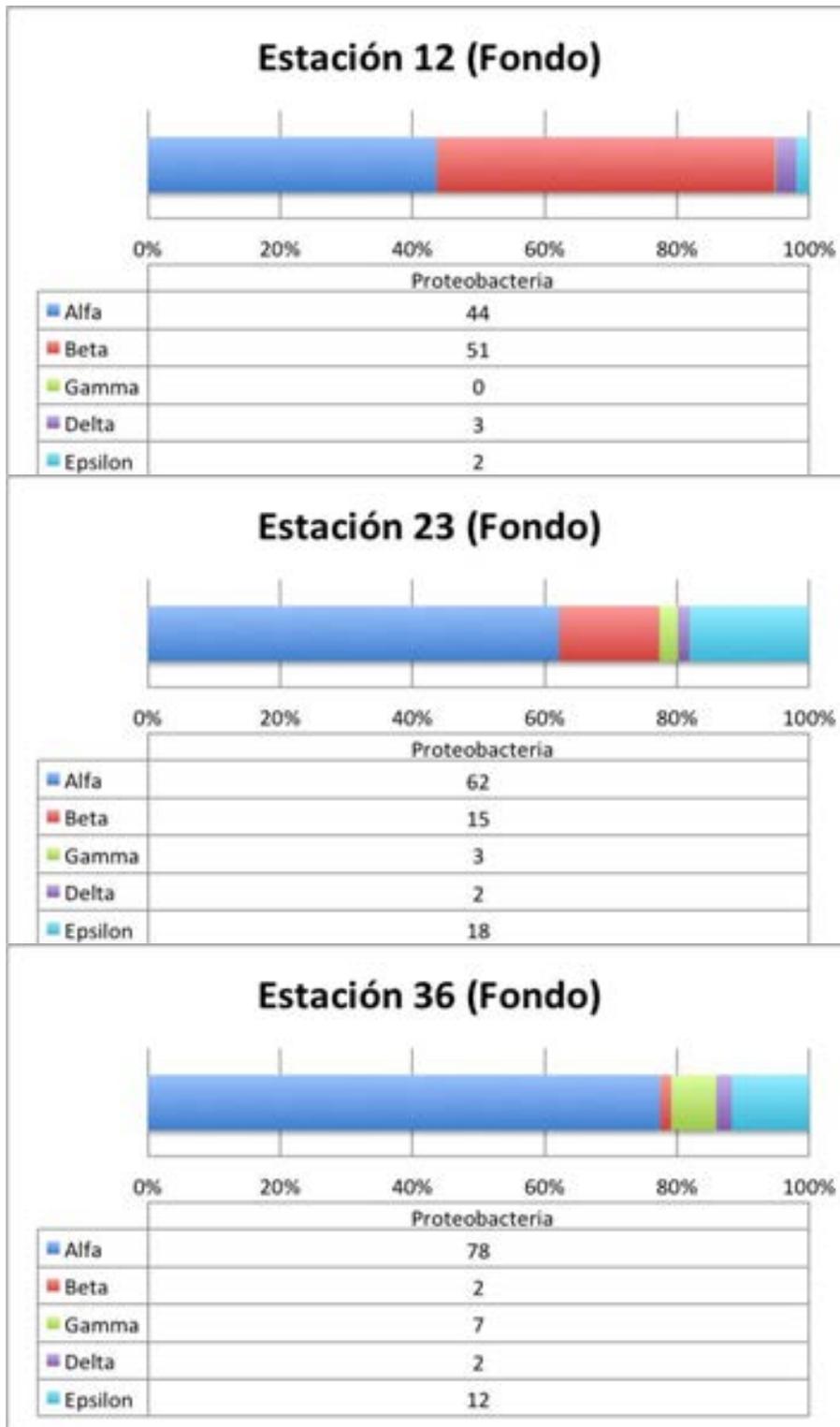


Figura 98. Ejemplos de las estaciones donde predominó la abundancia de DNA de la subclase alfa y beta proteobacteria a una profundidad nominal de 40 metros sobre el fondo marino.

Una vez analizados los resultados, se decidió dividir el GM en tres sectores, esto con la finalidad de evaluar si se aprecian diferencias en grandes sectores con características diferentes, nuestro sector 3, es el mas influenciado por la corriente del Lazo, el sector dos es mas estático en relación al tercero y no hay gran explotación de hidrocarburos, mientras que el la sector 1, es de gran explotación y se ve poco afectada por la corriente del Lazo Los sectores se dividió de la siguiente manera (Figura 99):

Sector 1= del paralelo 22°N al 19°N y del 97°O al 92°O

Sector 2= del paralelo 25°N al 23°N y del 97°O al 92°O

Sector 3= del paralelo 25°N al 23°N y del 91°O al 86°O

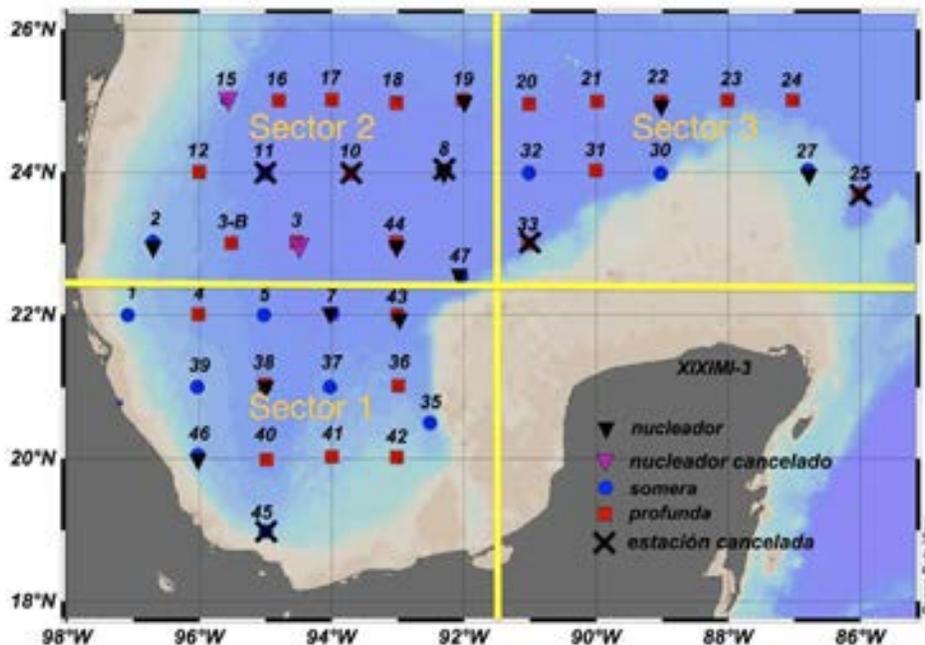


Figura 99. División por sectores que se empleó para el análisis de los datos correspondientes a la campaña oceanográfica XIXIMI-3.

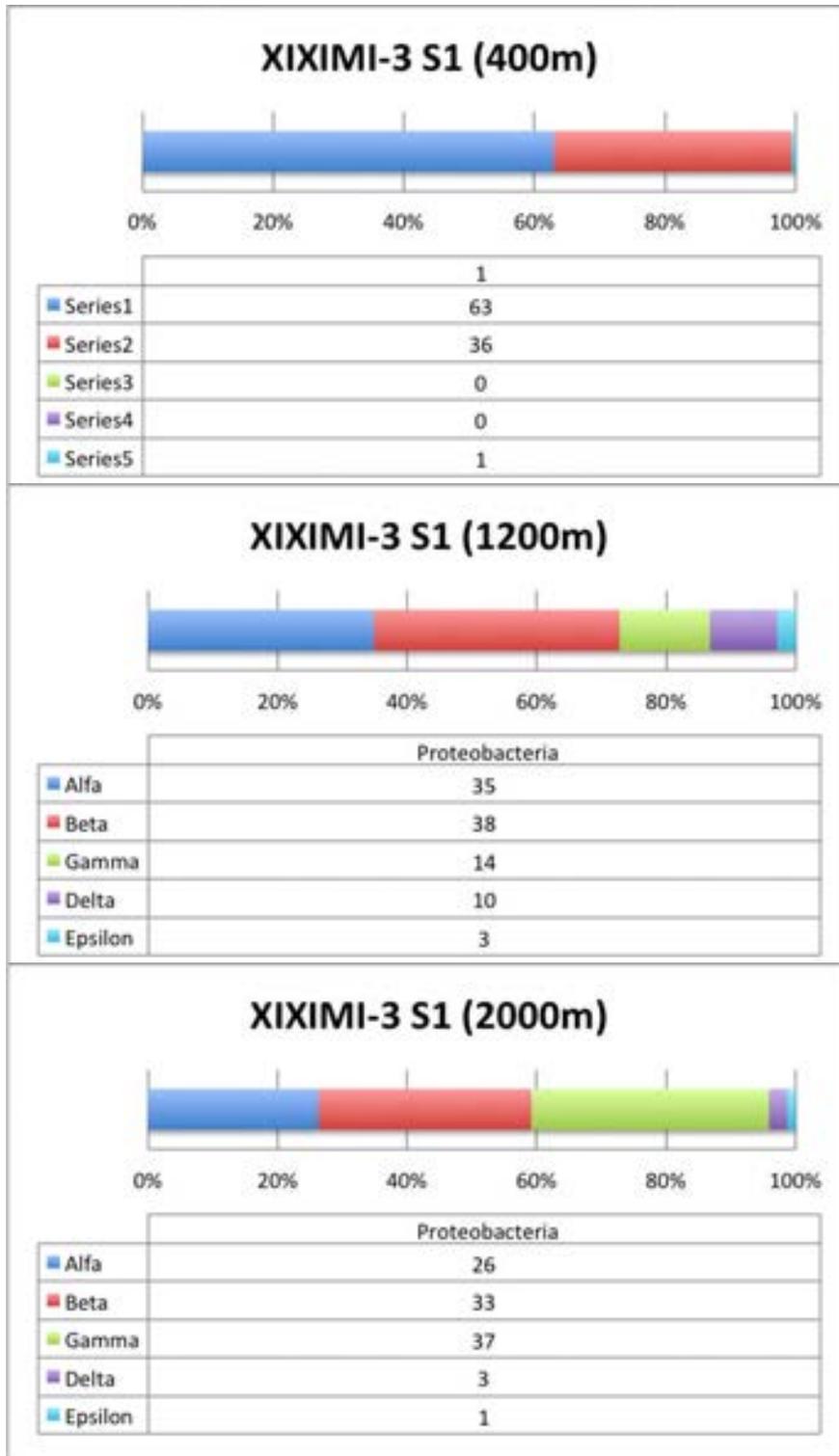


Figura 100. Sector 1 (suroeste de la zona de aguas profundas del GM). Se muestra un incremento en la presencia de la subclase gamma conforme aumenta la profundidad, y la disminución de la subclase alfa. Por otro lado la subclase beta se mantiene constante a lo largo de la columna de agua.

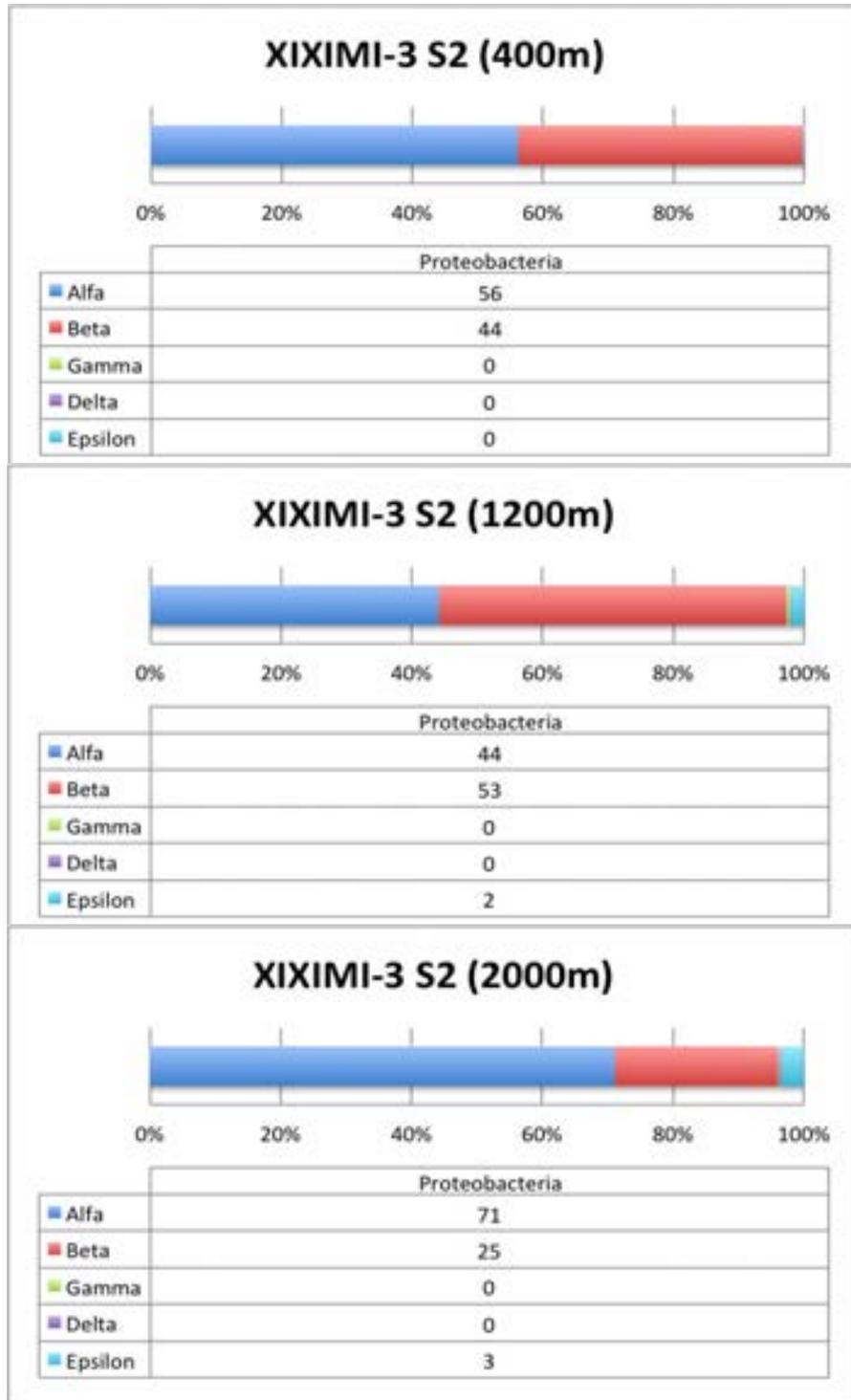


Figura 101. Sector 2 (noroeste de la zona de aguas profundas del GM). Se muestra una dominancia de las subclases alfa y beta, sin presencia significativa de las subclases gamma, delta y épsilon, esto independientemente de la profundidad a la que se analice la distribución bacteriana.



Figura 102. Sector 3 (noreste de la zona de aguas profundas del GM). Se muestra una marcada dominancia de Alfa proteobacteria, sin embargo este decrece en aguas profundas, dando lugar a un incremento de la presencia de la subclase beta.

Identificación de bacterias hidrocarbonoclasticas y metanomicrobiales

Dentro de las gamma proteobacterias podemos encontrar bacterias que presentan la capacidad de degradar hidrocarburos, tal es el caso de organismos como el género *Vibrio*, *Alcanivorax* y *Marinobacter*. Por otra parte, también se pueden encontrar organismos que utilizan como fuente de carbono al metano (Metanomicrobiales); tal es el caso de los géneros *Methanosaeta* y *Methanomethylovorans*. Si bien estos géneros no son los únicos que representan a los grupos que pueden degradar hidrocarburos y utilizar el metano como fuente de carbono, son con los que se contaba información genética al momento del estudio para poder amplificar regiones específicas de DNA e identificarlos. De continuar este estudio, se propone cambiar la estrategia experimental a metagenómica, con el fin de identificar todos los géneros y especies que se encuentran presentes en los diferentes puntos del GM. A continuación se muestran algunos ejemplos de estaciones profundas en aguas del GM en las cuales se puede observar la presencia de éstos organismos que tienen la capacidad de degradar hidrocarburos y metano.

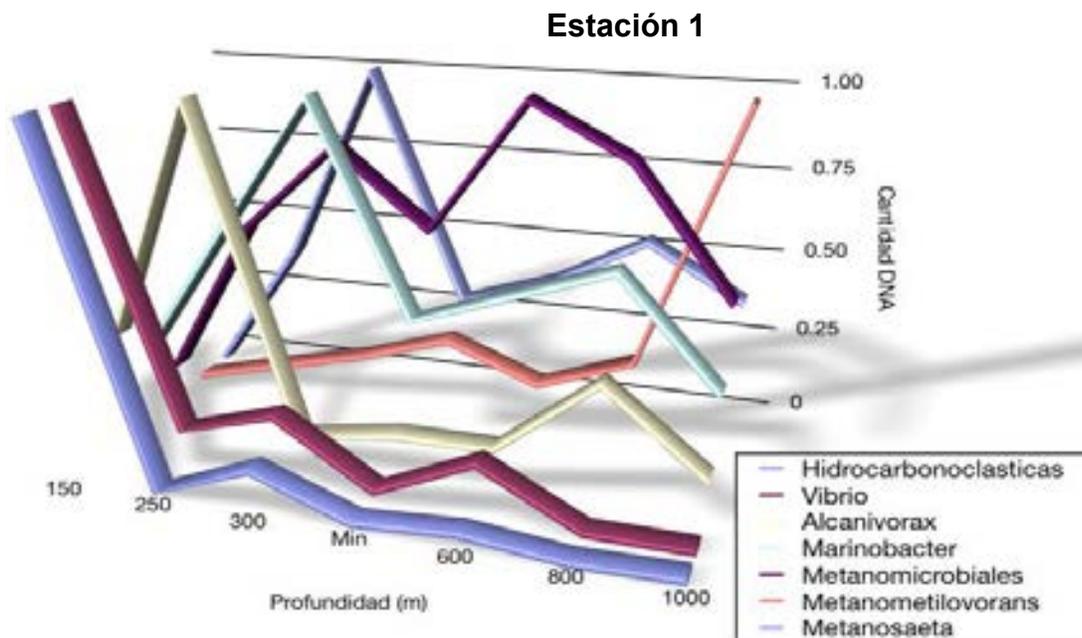


Figura 103. Abundancia relativa respecto a la cantidad máxima de DNA que un grupo presenta en la columna de agua, donde podemos apreciar la presencia de bacterias hidrocarbonoclasticas y metanomicrobiales de la estación E1, desde 150 hasta 1000mts, incluyendo la región de mínimo de oxígeno. En este punto, la diversidad máxima de estos grupos se encuentra entre 150 y 250 m.

Estación 2

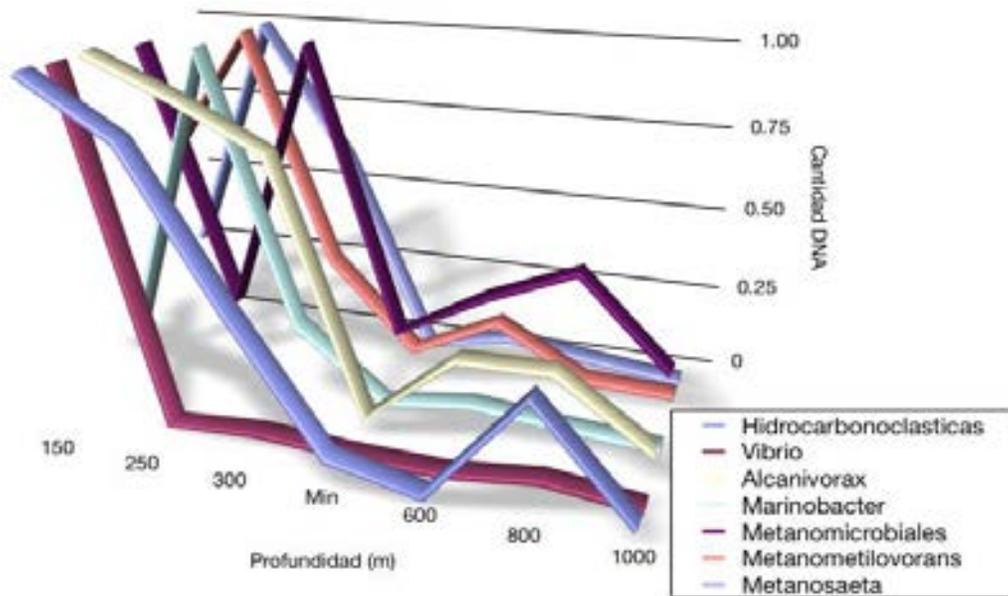


Figura 104. Abundancia relativa respecto a la cantidad máxima de DNA que un grupo presenta en la columna de agua, donde podemos apreciar la presencia de bacterias hidrocarbonoclasticas y metanomicrobiales de la estación E2, desde 150 hasta 1000 m, incluyendo la región de mínimo de oxígeno. En este punto, podemos encontrar el máximo de concentración bacteriana entre 150 y 300 m.

Estación 3

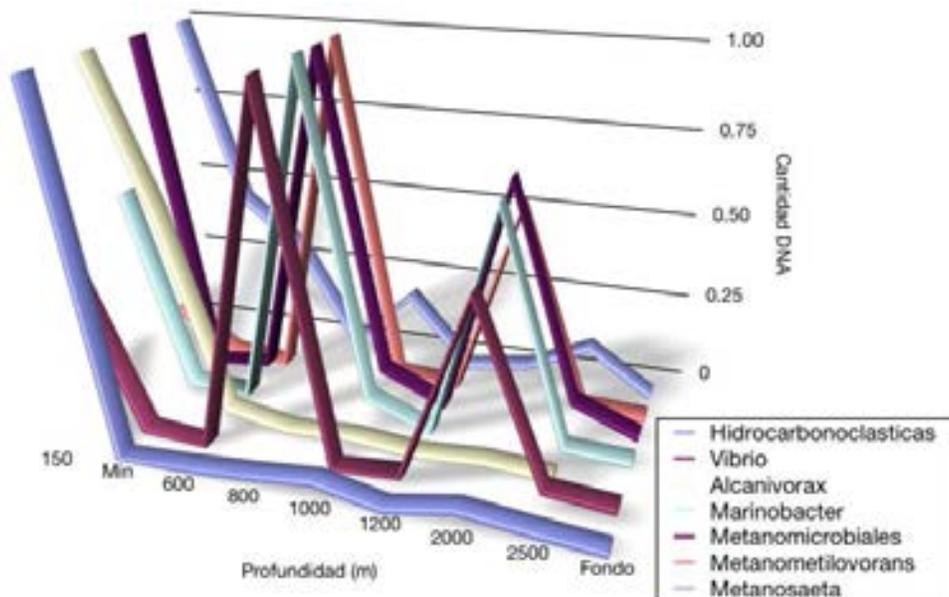


Figura 105. Abundancia relativa respecto a la cantidad máxima de DNA que un grupo presenta en la columna de agua, donde podemos apreciar la presencia de bacterias hidrocarbonoclasticas y metanomicrobiales de la estación E3, desde 150 m hasta 40 m antes del fondo. En esta estación, la diversidad máxima de estos grupos se encuentra en tres profundidades 150, 800 y 2000m.

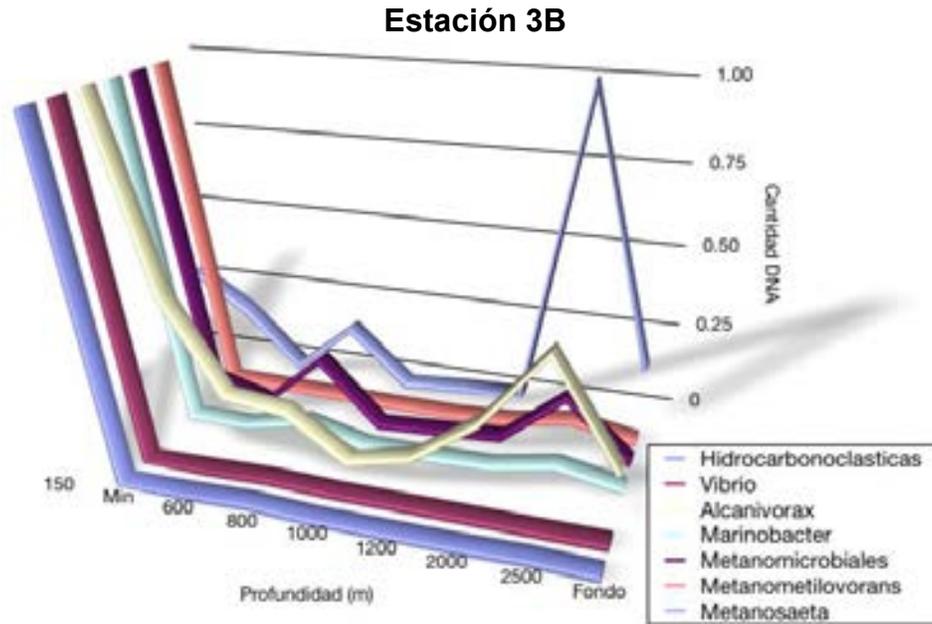


Figura 106. Abundancia relativa respecto a la cantidad máxima de DNA que un grupo presenta en la columna de agua, donde podemos apreciar la presencia de bacterias hidrocarbonoclasticas y metanomicrobiales de la estación E3B, desde 150 m hasta 40 m antes del fondo. En esta estación, la diversidad máxima de estos grupos se encuentra en 150m, en 2500 m podemos apreciar presencia de Alcanivorax, Metanomicrobiales y Metanosaeta.

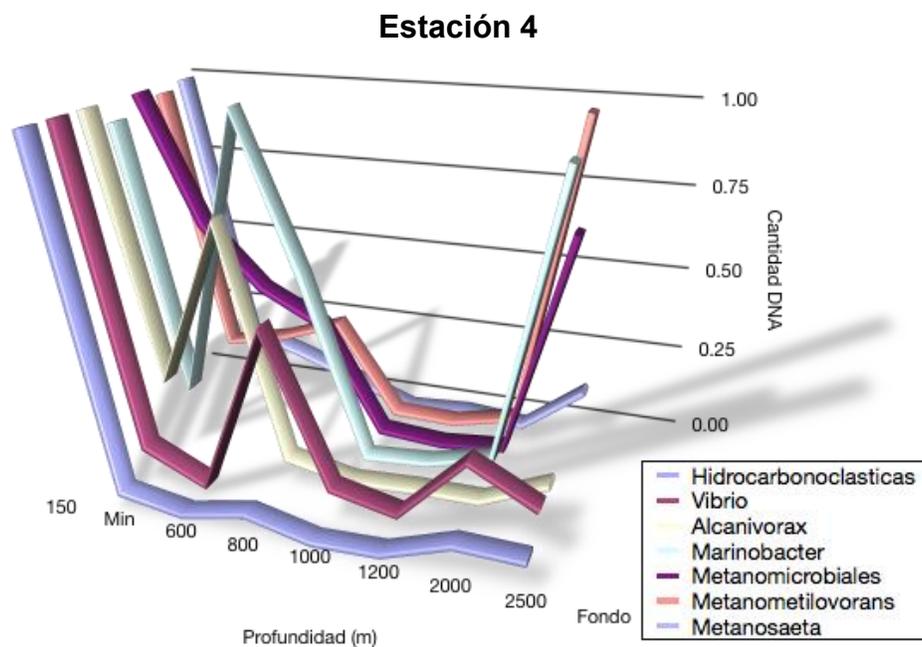


Figura 107. Abundancia relativa respecto a la cantidad máxima de DNA que un grupo presenta en la columna de agua, donde podemos apreciar la presencia de bacterias hidrocarbonoclasticas y metanomicrobiales de la estación E4, desde 150 m hasta 40 m antes del fondo. En esta estación, la diversidad máxima de estos grupos se encuentra en 150 m, presencia considerable de Alcanivorax y Marinobacter en el mínimo de oxígeno, y Marinobacter, Metanometilovorans y Metanomicrobiales en 2500 m.

En los ejemplos anteriores, puedes apreciarse que la distribución bacteriana de los grupos degradadores de hidrocarburos y de los que utilizan el metano como fuente de carbono, no mantienen un patrón constante de distribución a lo largo de la columna de agua, por lo que es imprescindible analizar toda la columna de agua para determinar en que profundidades se encuentran estos grupos bacterianos. Se realizó el análisis de todas las estaciones a las diferentes profundidades, los resultados se muestran en el anexo correspondiente.

Sedimentos

Una vez analizados los resultados de presencia de los diferentes grupos de bacterias marinas en sedimentos profundos, observamos que su presencia es baja en las diferentes estaciones, como por ejemplo las estaciones E2, E7, E22 y E44 (Figura 108 y Figura 109). Estas cuatro estaciones no se encuentran sobre zonas reportadas con emanación natural de hidrocarburos. Suponemos que la baja presencia de bacterias es debido a la escases de nutrientes que podríamos identificar en estas regiones. Esto no necesariamente debe de coincidir con la presencia de bacterias en la columna de agua de estas mismas estaciones, ya que en la columna de agua existen corrientes que pueden transportar nutrientes a grandes distancias, por lo que podríamos encontrar una gran cantidad de bacterias en zonas de la columna de agua, sin que este sea el caso para el sedimento de una misma estación.

Por otro lado, tenemos sedimentos con gran cantidad de bacterias, tanto en las subclases como en los géneros, esto se puede observar en las estaciones E38, E43 y E46 a lo largo del GM en las zonas cercanas a el talud continental, lo que podría favorecer que lleguen nutrientes de zonas más someras, y que por consiguiente, la diversidad bacteriana se incremente considerablemente en esta región (Figura 108 y Figura 109).

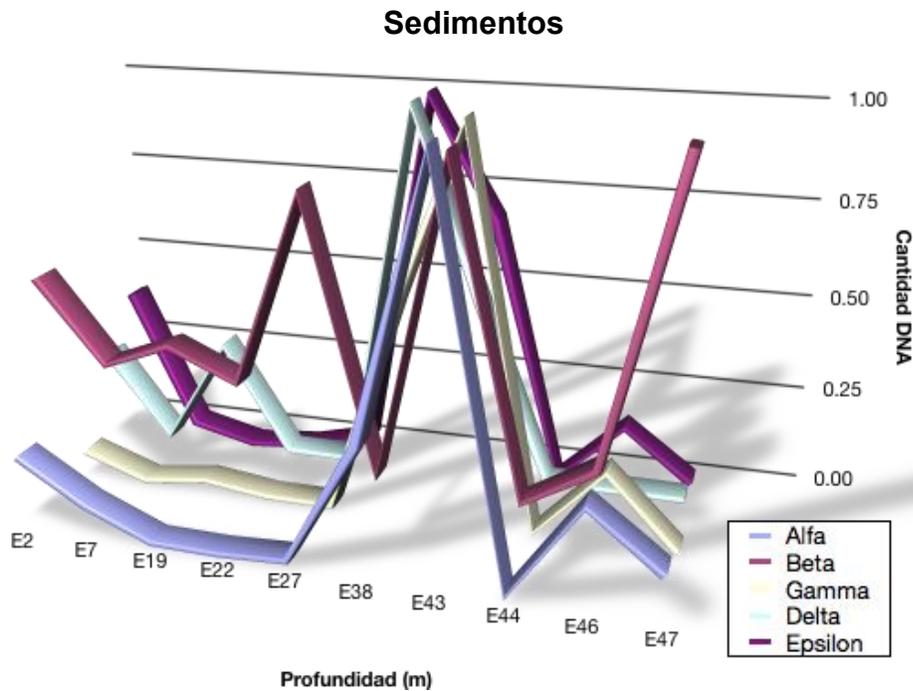


Figura 108. Abundancia relativa respecto a la cantidad de DNA de los diferentes grupos bacterianos en las estaciones donde se muestreó sedimentos marinos. Podemos observar que en la estación E38 predominan las proteobacterias Delta y Epsilon, mientras que en la estación E43, predominan las proteobacterias Alfa, Beta y Gama

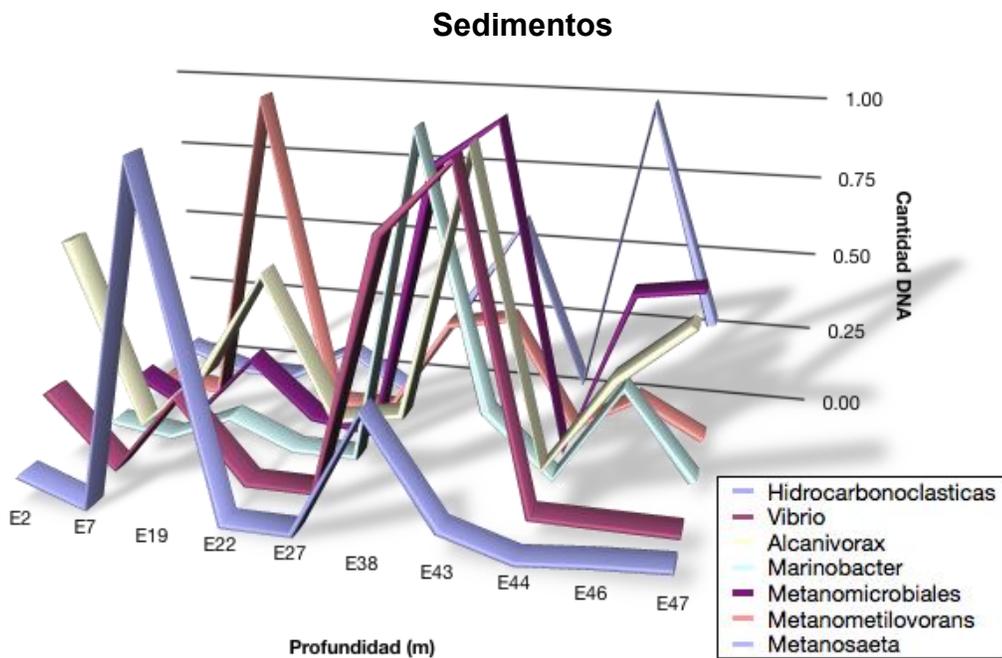


Figura 109. Abundancia relativa respecto a la cantidad de DNA de Géneros bacterianos degradadores de metano e hidrocarburos en sedimentos marinos. Al igual que la figura anterior, en las estaciones 38 y 43, se observa una mayor presencia de bacterias, en este caso degradadoras de metanol e hidrocarburos, todos los grupos analizados se encuentran en estas estaciones, lo que podría hacer pensar que cerca del punto de colecta existía una emanación natural de hidrocarburos.

Conclusiones

A manera de confirmación de la información generada en el cruceros anteriores (XIXIMI-1 y XIXIMI-2) los grupos predominantes de proteobacteria reportados en el crucero XIXIMI-3 también son las subclases alfa y las beta en la mayoría de las estaciones y para la mayoría de las profundidades analizadas. Sin embargo, se observó la presencia de los cinco grupos de proteobacterias a lo largo de la columna de agua.

En trabajos previos realizados en agua profunda del Atlántico norte, se han reportado la dominancia de las Alfa proteobacterias en profundidades que van de los 500 a los 4,100 m (Lauro y Bartlett 2008). Ellos mencionan que existen diversos factores fisicoquímicos que influyen sobre el crecimiento y en la supervivencia de los procariontes que habitan en las profundidades del mar. Esto mismo se ha podido inferir en los tres cruceros realizados en la zona de aguas profundas del GM, donde hasta el momento se ha visto una dominancia de las Alfa y Beta proteobacterias con pequeños parches en la distribución de las bacterias a lo largo y ancho del golfo, probablemente dependiendo de la masa de agua, de las corrientes, o posible presencia de chapopoterías que aporten carbono o nutrientes a la columna de agua.

Por otra parte, también se puede observar una tendencia al momento de dividir el GM en 3 sectores, notando una mayor predominancia en la importancia de alfa proteobacterias en la zona noreste del Golfo cerca al canal de Yucatán (sector 3), con la presencia de las 5 subclases en el sector 1 (suroeste) que está cercano a la zona de explotación petrolera actual y es una zona que se caracteriza por emanaciones naturales de hidrocarburos. Por otro lado se mostró una dominancia de beta proteobacterias en el sector 2 (noroeste).

Referencias

- Baguley J, Montagna P, Hyde L y Rowe G (2008) Metazoan meiofauna biomass, grazing, and weight-dependent respiration in the Northern Gulf of Mexico deep sea. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 55(24): 2607-2616.
- Beazley M, Martinez R, Rajan S, Powell J, Piceno Y, Tom L, *et al.* (2012). Microbial community analysis of a coastal salt marsh affected by the Deepwater Horizon oil spill. *PLoS one*, 7(7): e41305.
- Beolchini F, Rocchetti L, Regoli F y Dell'Anno A (2010) Bioremediation of marine sediments contaminated by hydrocarbons: experimental analysis and kinetic modeling. *Journal of hazardous materials*, 182(1): 403-407.
- Bruns A y Berthe-Corti L (1999) *Fundibacter jadensis* gen. nov., sp. nov., a new slightly halophilic bacterium, isolated from intertidal sediment. *International Journal of Systematic Bacteriology*. 49: 441-448.

- Das N y Chandran P (2010) Microbial degradation of petroleum hydrocarbon contaminants: an overview. *Biotechnology research international*, 2011: article ID 941810, doi: 10.4061/2011/941810.
- Hazen C, Dubinsky E, DeSantis T, Andersen G, Piceno Y, Singh N, *et al.* (2010) Deep-Sea Oil Plume Enriches Indigenous Oil-Degrading Bacteria. *Science* 330: 204-208.
- Kato S y Watanabe K (2009) Analysis of gene transcripts in a crude oil degrading marine microbial community. *Bioscience, Biotechnology and Biochemistry* 73:1665-1668.
- Kessler J, Valentine D, Redmond M, Du M, Chan E, Mendes S, *et al.* (2011). A persistent oxygen anomaly reveals the fate of spilled methane in the deep Gulf of Mexico. *Science*, 331(6015): 312-315.
- Kostka J, Prakash O, Overholt W, Green S, Freyer G, Canion A, Delgardio J, Norton N, Hazen T y Huettel M (2011) Hydrocarbon-Degrading Bacteria and the Bacterial Community Response in Gulf of Mexico Beach Sands Impacted by the Deepwater Horizon Oil Spill. *Appl. Environ. Microbiol.* 77(22):7962-7974.
- Kuhn E, Bellicanta G y Pellizari V (2009) New *alk* genes detected in Antarctic marine sediments. *Environmental Microbiology* 11(3): 669-673.
- Lauro F y Bartlett D (2008) Prokaryotic lifestyles in deep sea habitats. *Extremophiles*, 12(1): 15-25
- Lanoil B, Sassen R, La Duc M, Sweet S, y Nealson K (2001) *Bacteria And Archaea Physically Associated With Gulf Of Mexico Gas Hydrates Applied And Environmental Microbiology* 67(11): 5143-5153
- Liu Y, Yang G, Wang H, Chen J, Shi X, Zou G, Wei Q y Sun X (2006) Design of *Vibrio* 16S rRNA gene specific primers and their application in the analysis of seawater *Vibrio* community. *Journal of Ocean University of China, Oceanic and coastal sea research* 5(2): 157-164.
- Liu YJ, Chen YP, Jin PK y Wang XC (2009) Bacterial communities in a crude oil gathering and transferring system (China). *Anaerobe* 15:214-218.
- Lizárraga-Partida ML (1996) Microbiología del petróleo en el sur del Golfo de México. En: Botello AV, Rojas-Galaviz JL, Benítez JA y Zárata-Lomelí D (eds) Golfo de México, contaminación e impacto ambiental: diagnóstico y tendencias. Universidad Autónoma de Campeche, EPOMEX Serie Científica 5. 666 pp.
- Lu Z, Deng Y, Van Nostrand J, He Z, Voordeckers J, *et al.* (2012) Microbial gene

functions enriched in the Deepwater Horizon deep-sea oil plume. *ISME J* 6: 451–460.

Montagna P, Baguley J, Cooksey C, Hartwell I, Hyde L, Hyland J, *et al.* (2013). Deep-sea benthic footprint of the deepwater horizon blowout. *PloS one*, 8(8): e70540.

Pérez-de-Mora A, Schulz S y Schloter M (2010) MPN-and real-time-based PCR methods for the quantifications of alkane monooxygenase homologous genes (*alkB*) in environmental samples. *Bioremediation, Methods in molecular biology*. Ed. S. P. Cummings. Capítulo 4, 59-68 p.

Röling W, Milner M, Jones D, Fratepietro F, Swannell R, Daniel F y Head I (2004) Bacterial Community Dynamics and Hydrocarbon Degradation during a Field-Scale Evaluation of Bioremediation on a Mudflat Beach Contaminated with Buried Oil. *Appl. Environ. Microbiol.* 70(5): 2603-2613.

Rosano-Hernández MC, Fernández-Linares LC y Xoconostle-Cáceres B (2009) Bacterial diversity of marine seeps in the southeastern Gulf of Mexico. *Pakistan Journal of Biological Sciences* 12(9):683-689.

Rowe G, Wei C, Nunnally C, Haedrich R, Montagna P, Baguley J, *et al.* (2008) Comparative biomass structure and estimated carbon flow in food webs in the deep Gulf of Mexico. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 55(24): 2699-2711.

Valentine D, Mezić, I, Maćešić S, Črnjarić-Žic N, Ivić S, Hogan P, *et al.* (2012). Dynamic autoinoculation and the microbial ecology of a deep water hydrocarbon irruption. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(50): 20286-20291.

Vila J, Nieto JM, Mertens J, Springeal D y Grifoll M (2010) Microbial community structure of a heavy fuel oil-degrading marine consortium: linking microbial dynamics with polycyclic aromatic hydrocarbon utilization. *FEMS Microbiology Ecology* 73(2):349-362.

Wang L, Wang W, Lai Q y Shao Z (2010) Gene diversity of CYP153A and AlkB alkane hydroxylases in oil-degrading bacteria isolated from the Atlantic Ocean. *Environmental Microbiology* 12(5):1230-1242.

Yu Y, Kim J, y Hwang S (2005) Use of Real-Time PCR for Group-Specific Quantification of Aceticlastic Methanogens in Anaerobic Processes: Population Dynamics and Community Structures *Biotechnology And Bioengineering*, 93(3): 424-433.

Zettler E, Mincer T y Amaral-Zettler L (2013) Life in the “Plastisphere”: microbial communities on plastic marine debris. *Environmental science & technology*, 47(13): 7137-7146.

Zrafi-Nouira I, Guermazi S, Chouari R, Safi NMD, Pelletier E, Bakhrouf A, Saidane-Mosbahi D y Sghir A (2009) Molecular diversity analysis and bacterial population dynamics of an adapted seawater microbiota during the degradation of Tunisian zarzatine oil. *Biodegradation* 20:467-486.

TAXONOMÍA DEL MACROFITOPLANCTON

Responsable: Dr. Rubén Lara Lara, CICESE

Participantes: Carmen Bazán Guzmán, Guadalupe Cabrales Talavera, Citlalli Sánchez Robles, Edwin Morales Torres, CICESE

Antecedentes y justificación del trabajo

En el GM (GM) existen muy pocos trabajos sobre estudios taxonómicos del fitoplancton, debido a esto, en la actualidad no existe un catálogo de organismos de la comunidad, particularmente para las aguas oceánicas. En general, se han reportado más estudios en la zona costera sur del GM. Existen algunas bases de datos de los grupos de dinoflagelados y diatomeas reportadas por Moreno-Ruiz et al. (1993), Licea (1994, 2004, 2006), Moreno y Licea (1994) y Hernández-Becerril y Flores (1998). Existen otros estudios realizados por Hernández-Becerril et al. (2008) sobre la estructura del nanoplancton, el de Aldeco et al. (2009) sobre especies de dinoflagelados de la zona del Cañón de Campeche y el realizado por Muciño-Márquez et al. (2011) en la Laguna de Sontecomapan en Veracruz, sobre especies formadoras de florecimientos algales nocivos (FAN). Los estudios del programa XIXIMI son los primeros en aportar información sobre los géneros y especies de la parte oceánica del GM de una manera sistemática y con una cobertura muy amplia. Debido a la escasa información reportada en esta zona, es difícil realizar comparaciones con estudios previos, sobre todo para evaluar las posibles consecuencias (por ejemplo, cambios en las abundancias y riqueza de especies) provocadas por el derrame de petróleo que ocurrió en abril 2010.

México, al ser un país con un alto grado de desarrollo en la industria y explotación de sus recursos petroleros, es susceptible a eventos con baja probabilidad, pero de alto riesgo, como lo es un derrame de gran escala. Ha sido señalado que el impacto de los derrames en el mar es muy variable, y que la zona costera, por su gran productividad, es la más severamente dañada durante estos eventos.

Objetivos

Caracterizar la composición específica de los grupos fitoplanctónicos (diatomeas, dinoflagelados y silicoflagelados), así como de los grupos del microzooplancton tales como ciliados y tintinidos, y otros componentes como cianofitas, nanoflagelados y euglenoides, presentes en 33 estaciones de las aguas profundas del GM durante la campaña oceanográfica XIXIMI-3 efectuada del 19 de febrero al 11 de marzo del 2013, para complementar la base de datos que se ha construido a través de estos estudios, y así conocer los efectos que pudieran tener los posibles derrames de petróleo sobre la comunidad del fitoplancton.

Objetivos particulares

Describir la composición específica de grupos del fitoplancton (con excepción de los cocolitofóridos) en la zona de aguas profundas del GM,

Determinar la abundancia y distribución espacial de las poblaciones del fitoplancton y microzooplancton en el área de estudio del GM.

Elaborar una base de datos con los registros haciendo énfasis en los grupos de dinoflagelados y diatomeas.

Realizar mapas de distribución espacial de los grupos más abundantes dentro de la comunidad.

Metodología

Estrategias de muestreo

Se tomaron muestras en 33 estaciones a diferentes profundidades estándar con una roseta de botellas Niskin de 10 litros de capacidad. Se colectaron un total de 164 muestras a profundidades por arriba de los 150-200 metros y en el máximo de clorofila. Se tomaron alícuotas de 250 ml en botellas de plástico oscuras Nalgene hasta el hombro para permitir la homogeneización posterior de la muestra. Estas fueron fijadas con 1 ml de solución concentrada de Lugol-básico (norma CEN/ TC230/WG2/TG3) (Sournia, 1978) con un pH neutro para evitar daño en células frágiles (Thronsen, 1978). Todas las muestras fueron etiquetadas para identificarlas con un código de procedencia (localización), profundidad, fecha de recolección, fijador utilizado y persona o entidad a cargo de la recolección. El código de la muestra sirvió para elaboración de la base de datos. Es importante indicar el tipo de muestra y el método de recolección (por ejemplo: Discreta/Botella hidrográfica/10 m de profundidad). Las muestras se almacenaron a temperatura ambiente y en oscuridad hasta su análisis en el Laboratorio de Biogeoquímica del CICESE en Ensenada, B.C.

Debido a que los niveles de muestreo en cada estación son diferentes, en la Tabla 18 se especifican la relación de estaciones y profundidades a las cuales fueron tomadas.

Tabla 18. Relación de estaciones y profundidades muestreadas en el crucero XIXIMI-3 (19 de febrero al 11 de marzo del 2013) realizado en el GM.

PROFUNDIDAD (m)	ESTACIONES
0	1,2,3,3B,4,5, 7,12,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24, 27,30,32,35,36,37,38,39,40, 41,42,43,44, 46,47
10	1,3,3B,4,5,7,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,27,30,32,35,36,37,38 ,39, 40,41,42,43,44,46,47
20	1,5,7,30,32,35,36,37,39,41,42,46,47
50	1,2,3,3B,4,5,7,12,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,27,30,32,35,37, 38,39, 40,41,42,43,44,47
75	1,3,3B,4,5,6,7,12,15,16,17,18,19,20,21,22,24,27,30,32,35,36,37, 38,39, 40,41,42,44, 43,47
100	1,5,30,32,35,37,39,41,46,47
Nota: adicionalmente se tomaron muestras en la estación 7 a 50,75, 125, 175, 200 y 230 m de profundidad.	

Métodos de laboratorio

Homogeneización de la muestra

Por lo general, las muestras pueden permanecer almacenadas por días ó algunos meses después de haberse colectado. Debido a esto, las células tienden a asentarse en el fondo de las botellas formando agregados. Antes de preparar las muestras para el análisis, éstas deben pasar por un proceso de homogenización para permitir la resuspensión y separación de las partículas. Esto puede hacerse manualmente o preferiblemente con un dispositivo de mezcla. Para estandarizar en lo posible la homogenización manual se recomienda que la manipulación la realice una sola persona, combinando giros suaves horizontales y verticales de la botella durante 1 a 3 minutos.

Preparación de submuestras

Una vez terminada la homogenización de las muestras, se utilizaron cámaras de sedimentación tubulares (Utermohl) para el proceso de concentrado de células. El volumen de muestra a sedimentar depende de la densidad del fitoplancton presente. En este estudio, se utilizaron cámaras de sedimentación de 50 ml. Se llena cuidadosamente la cámara con la muestra hasta el tope del tubo y después se coloca una pieza cuadrada o circular de cristal, evitando la formación de burbujas de aire. Se recomienda mantener las cámaras de sedimentación durante 1-2 días en un lugar sin luz solar directa, a temperatura ambiente constante y evitar vibraciones. Durante este proceso la muestra debe situarse sobre una superficie (mesa) bien nivelada, de modo que la sedimentación

se produzca de forma homogénea sobre toda la placa. El tiempo de sedimentación recomendado es de 1-4 horas por centímetro de columna de sedimentación para las muestras fijadas con Lugol; este reactivo facilita la sedimentación de células.

La cámara de sedimentación se tiene que limpiar después de cada análisis. Es recomendable lavar con agua y detergente, o aclararse con etanol (90%), alcohol desnaturalizado comercial, isopropanol o acetona, y al final enjuagar con agua destilada.

Análisis cuantitativo del fitoplancton, método Utermöhl

El análisis cuantitativo de la comunidad fitoplanctónica se realizó siguiendo el método de Utermöhl (1958) usando un microscopio invertido Carl Zeiss modelo Invertoscope D equipado con objetivos de 16 y 40x. Se utilizaron cámaras de sedimentación de 50 ml y se consideró un tiempo de sedimentación de 3 horas por cada centímetro de altura de la cámara (Margalef, 1969), como se describe en la Tabla 19. Este análisis se debe iniciar con la cuantificación de las células en toda la cámara inferior usando un nivel de aumento bajo. Esto ayuda a dar una visión general de la densidad y distribución del fitoplancton. Si la distribución se considera irregular la muestra debe ser descartada. Durante esta exploración, también es conveniente hacer una lista preliminar de especies que puede ayudar a seleccionar la estrategia de cuantificación a implementar.

En este trabajo, se observó una baja densidad de fitoplancton y se decidió utilizar el método de recuento de todo el fondo de la cámara. En la rejilla de uno de los oculares hay una cuadrícula compuesta por dos líneas paralelas horizontales que forman un transecto (también es recomendado disponer de otra línea vertical en el centro). El método consiste en ir moviendo la cámara de arriba-abajo e izquierda-derecha, y viceversa, a la vez que se cuentan los individuos que queden entre las dos líneas de la rejilla del ocular. Para obtener un resultado estadísticamente robusto del análisis cuantitativo, es necesario contar con un número determinado de células, por lo que en este caso se contó toda la cámara.

Se inició con el conteo de células en el objetivo más bajo, seguido por el análisis de un objetivo con mayor aumento. Para lograr una comparación adecuada entre muestras, fue importante hacer los conteos de cada especie en particular siempre bajo el mismo aumento. En nuestro caso el conteo se inició con el objetivo 16x.

Es importante mencionar que algunas especies son fáciles de identificar, como el dinoflagelado *Ceratium furca*. Sin embargo, las especies más pequeñas se deben de cuantificar con objetivos de mayor magnificación como se señala en la Tabla 20 (1000x).

Tabla 19. Recomendaciones para el tiempo de sedimentación para las muestras preservadas con lugol (Edler 1979).

Volumen de la cámara (ml)	Altura de la cámara (cm)	Tiempo de sedimentación (h)
2	1	3
10	2	8
25	5	16
50	10	24

Tabla 20. Recomendaciones del objetivo para cuantificar la clase de fitoplancton de diferente tamaño (Edler 1979).

Clases de tamaño	Magnificación
0.2 – 2.0 µm (picoplancton)	1000 x
2.0 – 20.0 µm (nanoplancton)	100 – 400 x
>20.0 µm (microplancton)	100 x

Debido a las limitaciones del método (Utermöhl) y a los objetivos del microscopio utilizados en este trabajo, no es posible cuantificar e identificar las células pequeñas que corresponden a la fracción del picoplancton (0.2 - 2 µm), en la que se incluyen células procariontes y eucariontes, así como fotosintéticas y heterótrofas. Para esto, las muestras se enviarán al SOEST Flow Cytometry Facility en la Universidad de Hawaii (<http://www.soest.hawaii.edu/sfcf/>) y se analizarán con la técnica de citometría de flujo de acuerdo al método desarrollado por Monger y Landry (1993) para la cuantificación de las principales poblaciones de *Prochlorococcus*, spp., *Synechococcus*, spp., piceoeucariontes y bacterias heterotróficas. Es importante considerar el estudio de células de la talla del picoplancton, debido a su gran importancia ecológica y al papel que juegan en la transferencia de carbono en los ecosistemas acuáticos, particularmente en sistemas oligotróficos.

Cálculo de la densidad del fitoplancton contado por campos

El número de células contadas es transformado en abundancia celular por unidad de volumen de muestra de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$N = X * [(A * d) / (a * v)]$$

Dónde:

N= número de células en la muestra (células/ml)

X= número total de células por campo (o número total de células de la cámara)

A= área de la cámara

v= volumen de la muestra sedimentada en la cámara

a= área del campo óptico

d= factor de dilución o de concentración (en caso de que se halla diluido o concentrado según la densidad de algas)

En este estudio se realizó el conteo de todo el fondo de la cámara, por lo que solo fue necesario dividir el número de células cuantificadas en cada muestra entre el volumen sedimentado (50ml) y multiplicarlas por 1000 para expresar la abundancia en células L⁻¹.

Materiales de referencia para la identificación de grupos de fitoplancton

Dentro de la literatura general y mundial que se cuenta, están las guías taxonómicas para la identificación de diatomeas, dinoflagelados, cianobacterias, clorofíceas, etc. Como se describió anteriormente, no se contó un microscopio con suficiente magnificación para identificar especies de fitoplancton pequeñas, por lo que solo se reporta la presencia del grupo de diatomeas y dinoflagelados, así como algunos grupos de plancton de gran tamaño presentes en la comunidad. La identificación de células se hizo hasta nivel de género y en algunos casos hasta especie cuando estas fueron muy características. Se utilizaron las guías taxonómicas de Cupp (1938), Yamaji (1980), Tomas (1997), y las guías de identificación de diatomeas y dinoflagelados para la región sur del GM de Licea (1995), Moreno (1996) y el artículo de Gómez *et al.*, (2008). Es importante comprobar las descripciones de las especies en la literatura (no sólo comparar con dibujos o fotos) y tener en cuenta la información ecológica (distribución, hábitat, requerimientos); esta información se revisó con el apoyo de la guía taxonómica de Tomas (1997).

Resultados

En el presente trabajo se reportan los resultados de abundancia de géneros y especies de las diatomeas y dinoflagelados, así como la abundancia de los grupos de nanoflagelados y ciliados presentes en la comunidad recolectados en una red de estaciones de muestreo que cubrió gran parte de la zona de las aguas profundas del GM. La tabla de géneros y especies se presenta como anexo a este informe (**Anexo 1**). En cada estación se cuenta además con la información de las variables hidrográficas de temperatura, salinidad, y profundidad mediante un perfilador CTD (conductivity, temperature, depth por sus siglas en inglés). Esta información se presentará en el informe final.

Se presentan mapas de distribución para los grupos más abundantes como son el fitoplancton (diatomeas y dinoflagelados), nanoflagelados y ciliados. No se presentan mapas de distribución de los grupos de cianofitas, euglenoides, copépodos, silicoflagelados, tintinidos y radiolarios debido a su baja abundancia.

Diversidad de taxones

La comunidad del fitoplancton se encontró compuesta principalmente por individuos de tallas menores a 20 μm , y estuvo conformada por 32 géneros de dinoflagelados que incluyen 80 taxones principalmente de dinoflagelados desnudos, así como por 43 géneros de diatomeas con 61 taxones. Entre los principales géneros de dinoflagelados destacaron *Oxytoxum* con 15 especies, *Gymnodinium* con 10 especies, *Ceratium* con 15 especies y *Gyrodinium* con 7 especies. De estos géneros, los que contribuyeron con las mayores abundancias fueron las especies de los géneros de *Gymnodinium* y *Gyrodinium*. Algunas especies encontradas en este estudio se consideran formadoras de florecimientos algales, tales como *Akasiwo sanguineum*, especies del género de *Gonyaulax*, *Prorocentrum gracile*, y especies que son consideradas productoras de toxinas como *Ceratium furca*, *C. fusus*, *P. micans*, *Karenia brevis* y *Gymnodinium catenatum*; estas dos últimas son consideradas como especies con alto potencial tóxico (Band-Schmidt, et al, 2011). Asimismo, algunas de estas especies son consideradas mixotróficas, como *Gyrodinium spirale* y especies del género *Gymnodinium* (Anexo 4).

Por otro lado, la abundancia del grupo de las diatomeas estuvo dominada principalmente por diatomeas penales, entre las que destaca el género *Nitzschia* con 7 especies y *Navicula* con 5 especies. Sin embargo, las diatomeas centrales tuvieron mayor diversidad, incluyendo los géneros *Chaetoceros* con 11 especies y *Rhizosolenia* con 13 especies. Algunas especies de diatomeas registradas en este estudio se consideran formadoras de florecimientos algales, como: especies del género *Chaetoceros*, *Cylindrotheca closterium*, *Nitzschia logissima* y *Probocia alata* (Anexo 4). La mayor diversidad de especies de todos los grupos se encontró entre 10 y 50 metros de profundidad, principalmente en las estaciones del paralelo 25N.

La comunidad de microzooplancton estuvo conformada principalmente por los grupos de ciliados, seguidos por los copépodos, tintinidos, euglenas, radiolarios y otros componentes del zooplancton (Anexo 5). Se registró además la presencia de la cianobacteria *Trichodesmium* en forma de filamentos libres ó como agregados ("tuft") en pocas estaciones (Anexo 5).

Distribución espacial de los grupos fitoplanctónicos y otros componentes

La abundancia total del fitoplancton presentó una marcada variación espacial (Figura 110), dividiéndose en dos grandes regiones: región noreste asociada a las estaciones del paralelo 25 °N y la región del suroeste entre Veracruz y Campeche.

Asimismo, las mayores abundancias se encontraron a 50 m de profundidad y las menores en superficie.

En este estudio, se encontró que el máximo valor de abundancia fue el grupo de las diatomeas. Sin embargo, al comparar la media de las abundancias totales entre este grupo y el de los dinoflagelados, fue mayor la de los dinoflagelados. Las mayores abundancias del grupo de dinoflagelados fueron registradas por especies menores a 20 μm del género *Gymnodinium*. La estación en donde se registraron las abundancias más altas fue la E23 (6420 células L^{-1} a 10m) (Figura 110 a y b), asociadas al grupo de diatomeas, principalmente de los géneros de diatomeas pennales mayores a 20 μm como *Thalassionema*, *Navicula* y *Nitzschia*. Por otro lado, en la estación E40 a 50m el grupo de los dinoflagelados presentó una abundancia máxima de 3780 células L^{-1} siendo los géneros menores a 20 μm (*Gymnodinium* y *Gyrodinium* (i.e., *Gyrodinium spirale*)) los más representativos.

En cuanto a la distribución espacial del fitoplancton total, las mayores abundancias se presentaron a los 50 metros de profundidad, sin embargo, a los 10 m de profundidad se registró el máximo valor de abundancia en la estación E23 (7560 células L^{-1}), y las menores en las estaciones ubicadas en el noreste y sureste del GM, donde el valor mínimo fue de 100 células L^{-1} (Figura 110 a).

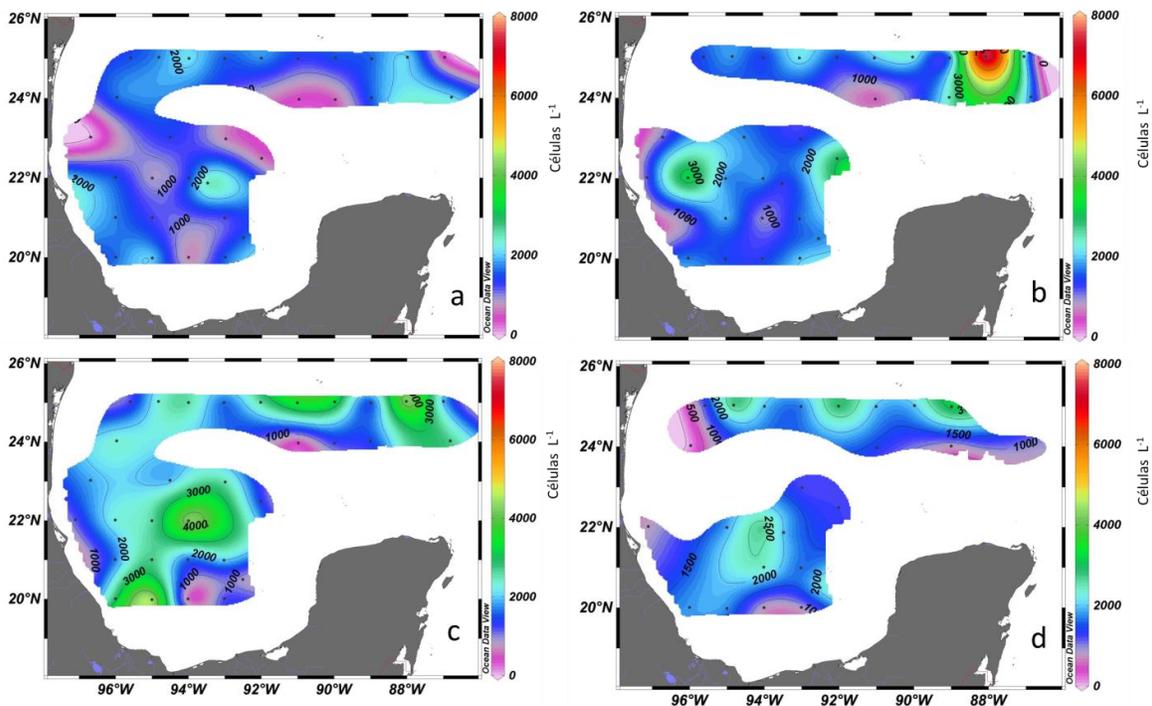


Figura 110. Distribución espacial de la abundancia total del fitoplancton en células L^{-1} : a) superficie, b) 10 m, c) 50 m y d) 75 m en el GM durante el crucero XIXIMI-3 realizado en febrero–marzo 2013.

Distribución espacial de dinoflagelados

La distribución espacial de dinoflagelados presentó las mayores abundancias a los 50m de profundidad en la región suroeste del GM y las menores en la zona noroeste, localizada en la región frente a Tamaulipas (Figura 111 a y c).

La distribución espacial de la abundancia a 50 metros presentó un rango de abundancia entre los 20- 3780 células L^{-1} , y las mayores abundancias fueron en las estaciones E7 (22 °N y 94°O) y E40 (20 °N y entre 94-96 °O), estas abundancias estuvieron principalmente asociadas a los dinoflagelados desnudos (2200 células L^{-1}) en la estación E7 y dinoflagelados desnudos $< 20\mu m$ (1100 células L^{-1}) en la estación E40. Se mostró un decremento en la región del paralelo 25N, registrándose las más bajas abundancias a 0 y 75 m de profundidad con excepción de las estaciones E1 y E27, las cuales presentaron un valor máximo de 1760 células L^{-1} asociada a dinoflagelados desnudos.

En la mayoría de las estaciones se registraron las abundancias más altas a 50m de profundidad y estuvo asociado principalmente a los dinoflagelados desnudos menores a 20 μm , principalmente a especies de los géneros *Gyrodinium* y *Gymnodinium*. Este mismo patrón se observó a la profundidad de 10 metros (Figura 111 b) y la mayor abundancia estuvo representada por los mismos géneros (2300 células L^{-1}).

En cuanto a su distribución vertical, los dinoflagelados presentaron sus abundancias máximas entre las profundidades de 10 y 50 m (Figura 111 b y c) y los menores valores a 75m de profundidad (Figura 111 d).

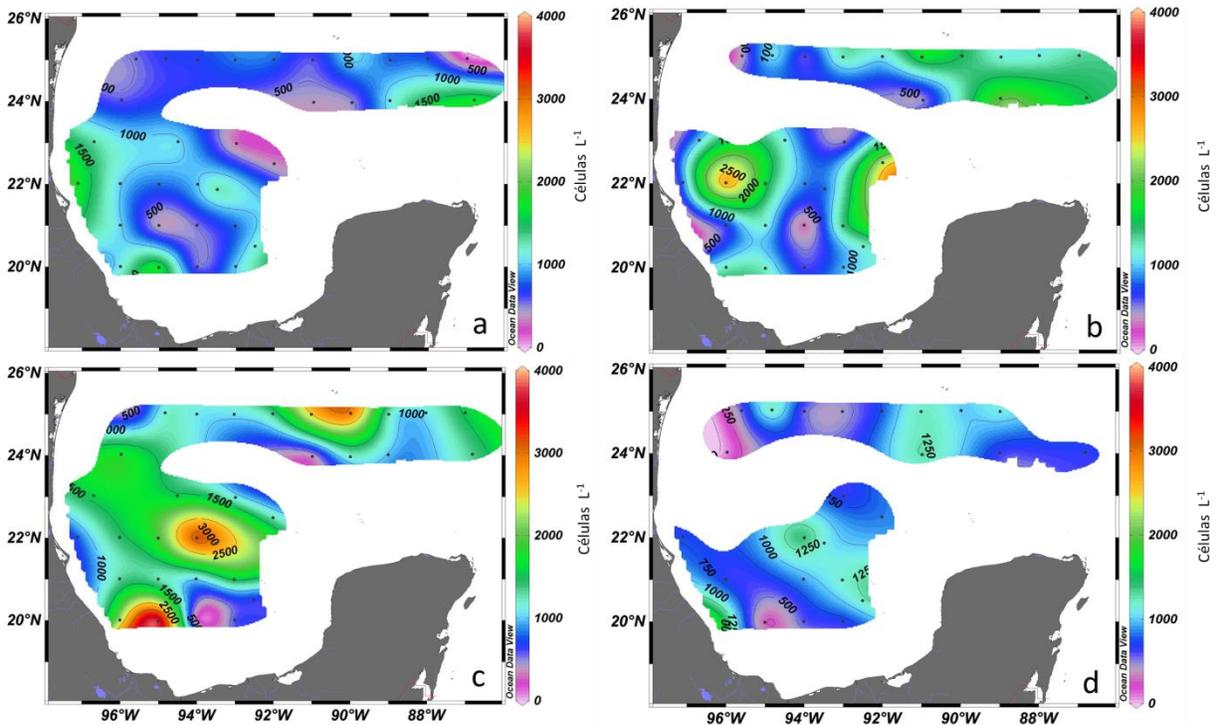


Figura 111. Distribución espacial de la abundancia de dinoflagelados (células L⁻¹): a) en superficie, b) a 10m, c) a 50m y d) 75m, en el GM durante el crucero XIXIMI-3 realizado en febrero-marzo 2013.

Diatomeas

El rango de abundancia de las diatomeas varió entre las 20 y 6420 células L⁻¹. Sus mayores abundancias fueron encontradas en las estaciones del paralelo 25N de la región del GM, donde los máximos se registraron en las estaciones E22 y E23, ubicadas en la región noreste en aguas oceánicas frente a la península de Yucatán, (entre las coordenadas 88-90°O y 24-25°N). Sus menores abundancias se registraron en la región noroeste, extendiéndose hasta la región sur del GM (entre las coordenadas 20-24°N y 90 y 96°O) que abarcan las aguas oceánicas frente a Veracruz y Campeche. En cuanto a su distribución vertical, presentaron sus máximas abundancias entre las profundidades de 10 y 50 m (Figura 112 b y c) y mínimas en la superficie, al igual que los otros grupos estudiados (Figura 112 a).

La abundancia de diatomeas se encontró principalmente compuesta por géneros y/o especies del grupo de diatomeas pennales, como *Navicula spp.*, *Nitzschia* y *Thalassionema*, y en menor abundancia los géneros de diatomeas centrales.

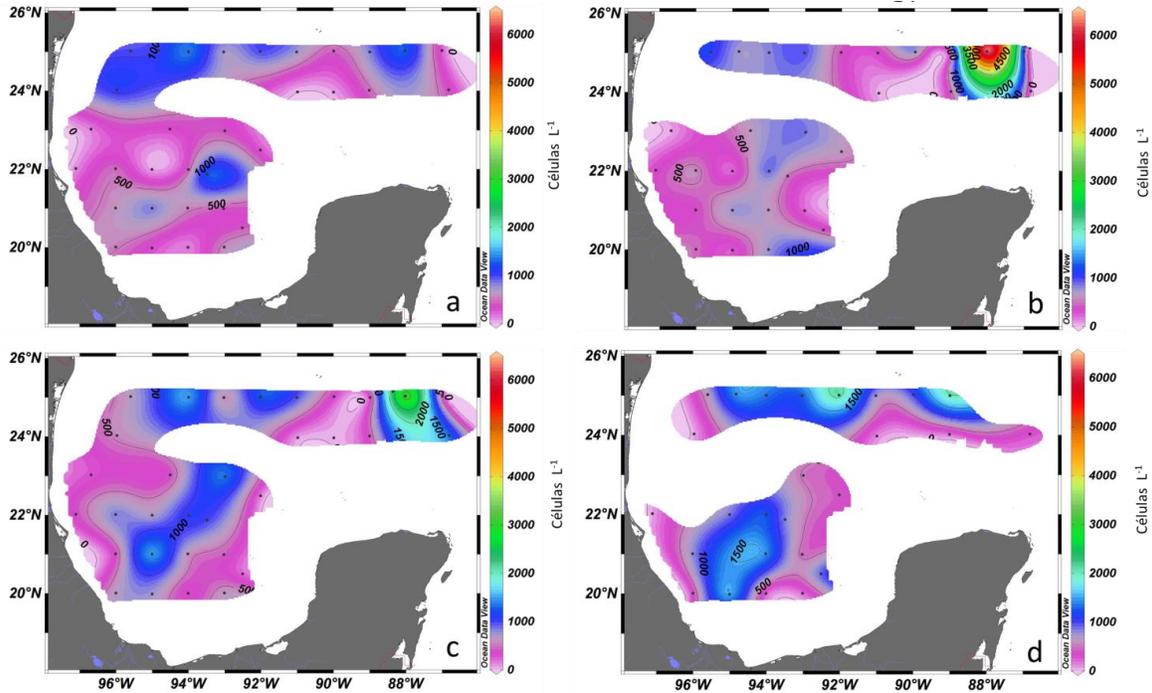


Figura 112. Distribución espacial de la abundancia de diatomeas (células L^{-1}): a) en superficie, b) a 10 m, c) a 50 m y a d) 75 m en el GM durante el crucero XIXIMI-3 realizado en febrero-marzo del 2013.

Nanoflagelados

Las abundancias de los nanoflagelados presentaron un rango de entre 20 y 9840 células L^{-1} . Su distribución fue diferente al de los otros grupos planctónicos analizados, ya que presentaron núcleos aislados de altas abundancias en las regiones del noreste (23-25°N y 86-88°O) en aguas oceánicas frente a la península de Yucatán (26-24°N y 88-90°O) y en la región sureste dentro de la sonda de Campeche. En cuanto a su distribución vertical, se observaron sus máximas abundancias en superficie y a 10 metros de profundidad (Figura 113 a y b).

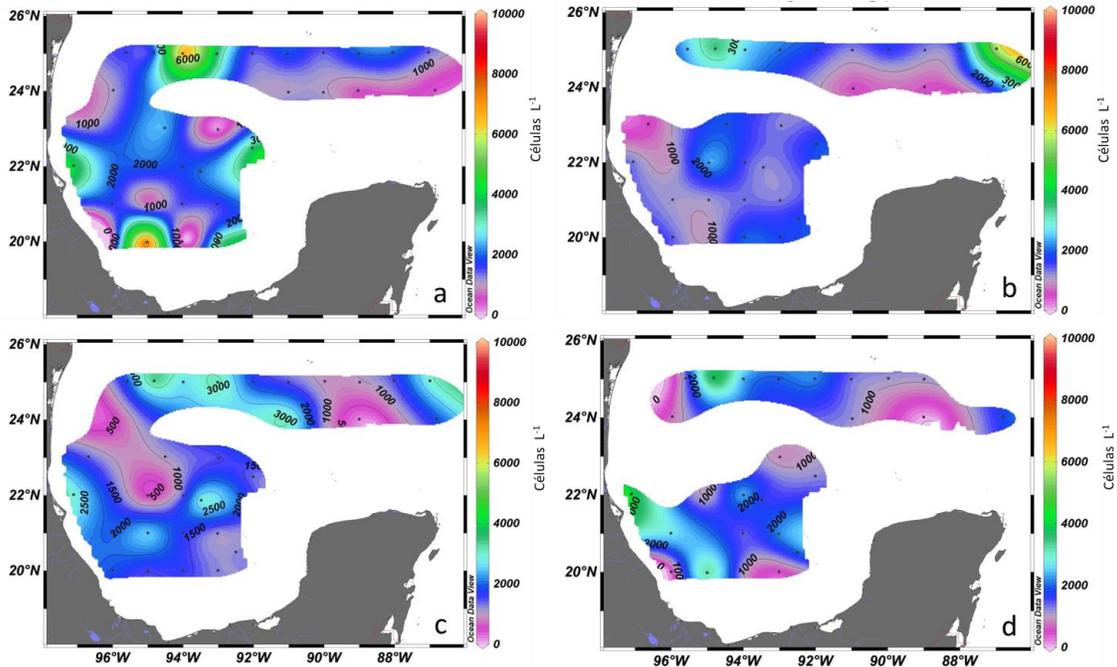


Figura 113. Distribución espacial de la abundancia de nanoflagelados (células L⁻¹): a) en superficie, b) a 10 m, c) a 50 m y a d) 75 m en el GM durante el crucero XIXIMI-3 realizado en febrero-marzo 2013

Ciliados

Los ciliados presentaron un rango de abundancia de entre los 20 y 500 organismos L⁻¹. En cuanto al patrón de distribución, se registraron los valores más altos en la región noreste y sureste del GM a los 50 m de profundidad. La abundancia más alta fue en la estación E20 (500 organismos L⁻¹) entre las coordenadas 19 y 22°N, y 92 y 94°O. Asimismo, presentaron menor abundancia en la región sur, notándose las menores abundancias en superficie y a 75 m de profundidad, como se observa en la Figura 114. Esta distribución es diferente a la que se observó para los nanoflagelados. En cuanto a su distribución vertical, las máximas abundancias fueron encontradas entre los 10 y 50 metros de profundidad (Figura 114 b y c), y las menores abundancias en superficie (Figura 114 d).

La comunidad de ciliados estuvo conformada principalmente por individuos de las tallas mayores a 20 μm ; estos estuvieron presentes en la mayoría de las muestras analizadas.

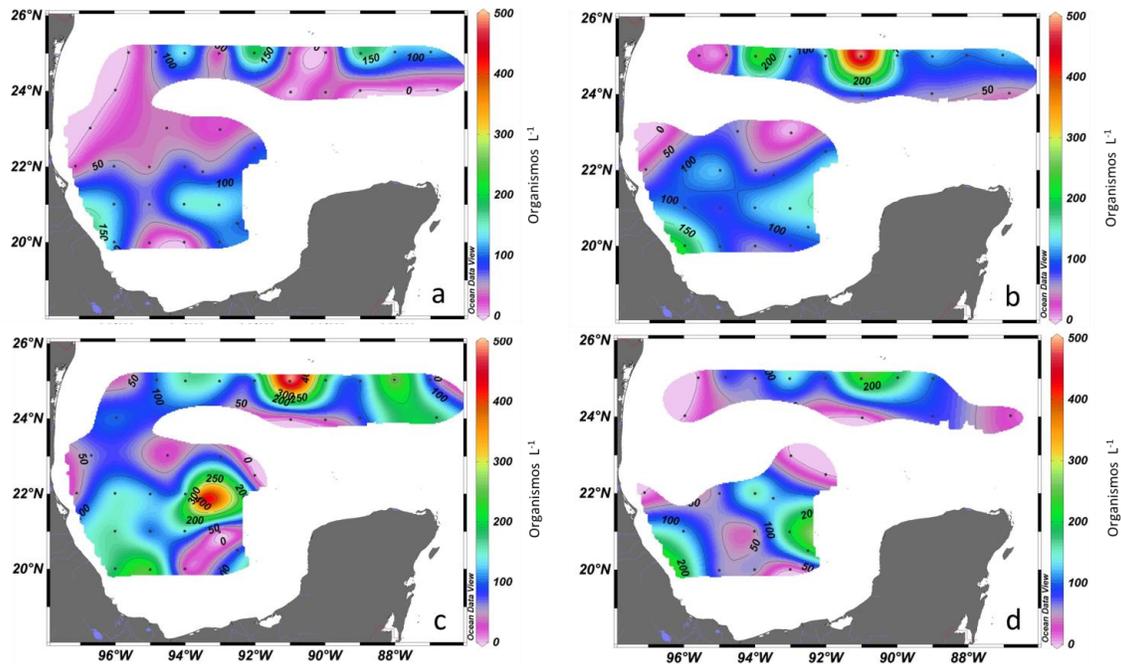


Figura 114. . Distribución espacial de la abundancia de ciliados (Organismos L⁻¹): a) superficie, b) a 10 m, c) a 50 m y d) 75m en el GM durante el crucero XIXIMI-3 realizado en febrero-marzo del 2013.

Discusión

La distribución espacial del fitoplancton se dividió en dos regiones importantes: la región que enmarca el paralelo 25N frente a las aguas oceánicas de la península de Yucatán y la región sur (19-24°N y 96 y 91°O) en la sonda de Campeche. En la zona noreste y sur se presentaron las mayores abundancias de los grupos fitoplanctónicos, así como los grupos del microzooplancton, cuyas abundancias fueron mayores entre 10 y 50 metros de profundidad. Las mayores abundancias registradas tanto de los grupos fitoplanctónicos como de microzooplancton fueron a los 50m de profundidad. Posiblemente esto se debió a la presencia de los giros superficiales y frentes que se forman en la región del cañón de Campeche y el cañón de Soto (Escobar-Briones *et al.*, 2008), los cuales son procesos hidrodinámicos que pueden concentrar el plancton mediante los efectos físicos de acumulación, retención y dispersión en la región (Franks, 1992).

Por otro lado, la comunidad estuvo conformada por un mayor número de especies del grupo de los dinoflagelados, lo que ha sido reportado como característico de aguas oceánicas tropicales (Steidinger y Tangen 1997), ya que este grupo presenta características fisiológicas que le permiten su desarrollo en aguas oligotróficas ya que tienen bajos requerimientos de nutrientes y sus óptimos de temperatura e iluminación son altos. Las aguas oceánicas del GM han sido consideradas como oligotróficas por diversos autores (Licea y Santoyo, 1991; Biggs, 1992; Melo *et al.*, 2000) debido a sus bajos valores de concentración de clorofila, por lo que es una región favorable para el

desarrollo de estas especies que pueden adoptar diferentes formas de nutrición (autótrofa, heterótrofa y mixotrófica) dependiendo de las características que se presenten en el medio (Gamboa-Márquez *et al.*, 1994).

El número de especies encontradas en este trabajo puede ser considerado bajo. Solo se registraron 80 especies en comparación a las 252 especies de dinoflagelados planctónicos reportados por Licea *et al.*, (2004) en varios cruceros en el sur del GM. Esta diferencia puede deberse a que el trabajo realizado por Licea *et al.*, 2004 se concentró en la zona costera y nuestro trabajo fue realizado principalmente en estaciones localizadas en la zona oceánica.

El análisis de la comunidad del fitoplancton correspondiente al crucero XIXIMI-3 (Febrero-Marzo 2013), mostró una alta diversidad de los géneros de *Oxytoxum* y *Ceratium* con 15 especies cada uno. Sin embargo, la mayor abundancia se debió a los organismos de talla menor a 20 μm , principalmente del grupo de los dinoflagelados como *Gymnodinium* sp. y *Gyrodinium* sp., al igual que en el crucero realizado en julio del 2011 y en noviembre del 2010. En cuanto al grupo de diatomeas, tanto en noviembre del 2010, julio del 2011 y febrero-marzo 2013, se presentó una alta abundancia de diatomeas pennales, principalmente de los géneros *Navicula* sp., *Nitzschia* sp. y *Thalassionema* sp.

En cuanto a la comunidad del fitoplancton, se registraron especies consideradas comunes para la región sur del GM por Licea *et al.*, 2004 como: *Ceratium macroceros*, *C. tripos*, *C. contortum*, *C. pentagonum*, *C. furca*, *C. horridum*, *Podolampas bipes*, *P. palmipes*, *Lingulodinium polyedrum*, *Prorocentrum gracile* y *P. micans*, entre otras. La especie mixotrófica *Gyrodinium spirale* fue la más abundante en el crucero de febrero-marzo 2013 al igual que en el crucero realizado en julio del 2011.

Asimismo, en este estudio se registró la presencia de 13 especies consideradas formadoras de florecimientos algales nocivos, entre las cuales algunas se clasifican como muy tóxicas en el GM: *Cylindrotheca closterium* (Ramírez-Camarena *et al.* 2006; Terán-Suárez *et al.* 2006) y *Scrippsiella trochoidea* en la región de Yucatán (Herrera-Silveira y Morales-Ojeda 2009), especies de los géneros de *Ceratium* y *Dinophysis* registradas para la región sur del golfo (Herrera-Silveira *et al.*, 2010), así como especies del género *Prorocentrum*, las cuales se presentaron en bajas abundancias.

Cabe señalar que en el crucero realizado en noviembre del 2010, el grupo que contribuyó más a la abundancia total del fitoplancton fue el de las diatomeas (hasta 3240 células L^{-1}). Sin embargo, su abundancia fue menor a la registrada en el crucero realizado en julio del 2011 (hasta 4640 células L^{-1}), cuando el grupo más abundante fue el de los dinoflagelados. Sin embargo, ambos grupos mostraron una distribución espacial y vertical similar. Esto concuerda con lo reportado por Licea y Luna (1999), que encontraron los valores mayores de abundancia de dinoflagelados durante la época de lluvias (julio agosto), y los valores más bajos en invierno (noviembre a diciembre), al igual que lo registrado por Hernández-Becerril (2008).

A diferencia del estudio realizado en julio del 2011, cuando el grupo de los dinoflagelados fue el dominante, en el crucero realizado en febrero y marzo del 2013, el grupo de las diatomeas presento la máxima abundancia. Sin embargo, la media de la abundancia de los dinoflagelados fue mayor en este estudio, contrario a lo encontrado en el estudio realizado en noviembre del 2010, cuando las mayores abundancias fueron las diatomeas con casi de 3000 cel L-1 más en abundancia que los dinoflagelados, siendo la máxima abundancia de este grupo en los 3 estudios realizados hasta el momento.

En cuanto a la distribución de la abundancia de dinoflagelados y diatomeas, esta fue similar para los tres cruceros realizados. Los mayores valores se concentraron en dos regiones principalmente: en la sonda de Campeche para los dinoflagelados y hacia la región de la península de Yucatán para las diatomeas, siendo más notorio durante el crucero realizado en julio del 2011.

La diferencia en la abundancia máxima entre el grupo de diatomeas y dinoflagelados fue menor en este estudio (febrero-marzo 2013), respecto al crucero realizado en julio del 2011, donde fue del 70% (Tabla 21), ya que la época de lluvias (julio y agosto), parece favorecer el incremento de las abundancias del fitoplancton, en especial de los dinoflagelados, lo que ha sido reportado en diferentes estudios (Licea y Luna 1999).

Tabla 21. Comparativa de los rangos de abundancia de fitoplancton (células L⁻¹) reportados para los cruceros de XIXIMI-1 (noviembre del 2010), de XIXIMI-2 (julio del 2011) y de XIXIMI-3 (febrero y marzo del 2013) realizados en el GM.

	CRUCERO XIXIMI-1		CRUCERO XIXIMI-2		CRUCERO XIXIMI-3	
	GRUPOS		GRUPOS		GRUPOS	
	DINOFLAGELADOS	DIATOMEAS	DINOFLAGELADOS	DIATOMEAS	DINOFLAGELADOS	DIATOMEAS
RANGO	40-2080	40-3240	40-9780	0-4640	0-3780	0-6420
NUMERO DE GÉNEROS	23	18	50	46	32	43
GÉNERO DOMINANTE	<i>Gymnodinium</i>	<i>Navícula</i>	<i>Gyrodinium</i>	<i>Navícula</i>	<i>Gymnodinium</i>	<i>Navícula</i>
NUMERO DE MUESTRAS	112		186		161	

Se presentaron los menores valores de abundancia, tanto para dinoflagelados como para diatomeas, durante el crucero realizado en noviembre del 2010, lo que coincide con lo encontrado por Hernández-Becerril et al., (2008) para la época de invierno (noviembre a diciembre), donde la mayor abundancia la presentaron las diatomeas.

En este estudio, el valor máximo de abundancia lo tuvieron las diatomeas, sin embargo la media de la abundancia de los dinoflagelados fue mayor . .

En el crucero realizado entre febrero y marzo del 2013 se registró la presencia de tricomas de cianobacterias del genero *Trichodesmium*, las cuales son fijadoras de nitrógeno atmosférico a gran escala (Westberry y Siegel, 2006). Se registraron bajas abundancias, siendo su máximo de 500 tricomas L⁻¹ en comparación con el valor registrado en julio del 2011 que fue de 1040 tricomas L⁻¹. En noviembre 2010 se registró la presencia de esta cianobacteria solo en dos estaciones con abundancias maximas de 20 tricomas L⁻¹. Esta especie habita principalmente en aguas superficiales de mares tropicales y pobres en nutrientes, y en esos ambientes se han reportado altas abundancias (Carpenter, 1983). En este estudio, el máximo valor de abundancia se presentó en superficie, a diferencia del crucero realizado en julio del 2011 cuando se registró a 10 y 50 metros de profundidad. Esto quizás fue debido a que en el crucero realizado en julio del 2011, existió un mayor aporte de masas de agua de origen Caribeño, y como ha sido señalado por Walsh et al., (2006), el género es común en aguas del Caribe, lo que puede ser una posible explicación de estas diferencias. Sin embargo, en este estudio se registró el valor máximo en la región sur frente a Campeche, lo que puede ser explicado debido en esta zona hay frentes y giros que pueden promover la agregación de tricomas (Aldeco et al., 2009).

En el crucero de noviembre del 2010 solo se identificó al fitoplancton en algunas ocasiones hasta especie, los otros componentes del plancton se categorizaron en un solo grupo, por lo que solo se comparan rangos de abundancias que se registraron en todos los cruceros (Tabla 22).

Tabla 22. Rangos y abundancias totales de los organismos del plancton cuantificados de los cruceros de 2010, 2011 y 2013, realizados en el GM.

	CRUCERO XIXIMI-1	CRUCERO XIXIMI-2	CRUCERO XIXIMI-3	CRUCERO XIXIMI-1	CRUCERO XIXIMI-2	CRUCERO XIXIMI-3
GRUPOS	RANGO	RANGO	RANGO	MEDIA	MEDIA	MEDIA
DINOFLAGELADOS (células L ⁻¹)	40-2080	40-9780	20-3780	498	1692	1022
DIATOMEAS (células L ⁻¹)	40-3240	0-4640	20-6420	609	584	661
CILIADOS (Org. L ⁻¹)	40-120	20-1260	0-500		181	89
TINTINIDOS (Org. L ⁻¹)	40-80	20-100	0-40		12	4
NANOFLAGELADOS (células L ⁻¹)	-	20-5300	0-9840		663	1760
CIANOFITA (<i>Trichodesmium</i>) (Tricomas L ⁻¹)	0-40	20-1040	0-500		26	15
SILICOFLAGELADOS (células L ⁻¹)	40-160	0-100	0-160		5	13
EUGLENOIDES (Org. L ⁻¹)	40-160	0-160	0-60		36	3

Conclusiones

En general, la mayor abundancia del fitoplancton se presentó a los 10 y 50 m de profundidad en la región frente a la Sonda de Campeche (96 y 91°O y 19-24°N) y en aguas oceánicas frente a la península de Yucatán (90-99°O y 23-25°N) alrededor del paralelo 25N. El valor máximo se registró a 10 m en la estación E23.

En el crucero realizado en febrero-marzo del 2013, la estructura de la comunidad del fitoplancton en las aguas oceánicas del GM se caracterizó por la dominancia de especies del grupo de dinoflagelados de tallas menores a 20 µm.

Las diatomeas fueron el grupo más abundante el máximo valor de abundancia lo presento el grupo de las diatomeas. Sin embargo, la media de la abundancia de los dinoflagelados fue mayor. Las mayores abundancias se registraron a 10 y a 50 m de profundidad, y la abundancia del grupo de las diatomeas fue representada por los géneros de diatomeas pennales como *Navicula* sp., *Nitzschia* sp. y *Thalassionema* sp., y la de los dinoflagelados por especies del genero *Gymnodinium* sp., como en julio del 2011,

Se encontró una mayor diversidad de géneros en el crucero realizado en julio del 2011 (50 géneros de dinoflagelados, 46 géneros de diatomeas). La menor cantidad de géneros fue registrada en el crucero realizado en noviembre 2010 (23 géneros de dinoflagelados y 18 géneros de diatomeas) y en este estudio se registraron 32 géneros de dinoflagelados y 43 de diatomeas, siendo entonces el crucero de julio del 2011 el más diverso en cuanto al número de géneros.

En este estudio, los géneros *Oxytoxum* y *Ceratium* fueron los que presentaron la mayor cantidad de especies (15 especies identificadas). Sin embargo, se encontraron en bajas abundancias. Los más abundantes, aunque con menor número de especies, fueron los géneros *Gymnodinium* y *Gyrodinium*, donde la especie más abundante de estos géneros fue *Gyrodinium spirale* en las tres campañas realizadas hasta el momento.

En el crucero realizado en julio del 2011 se registraron especies productoras de florecimientos algales nocivos y especies reportadas como potencialmente tóxicas como lo son *Ostreopsis* sp., *Amphidinium* sp., *Gymnodinium catenatum* y *Pseudo-nitzschia* sp. Sin embargo, se presentaron en muy bajas abundancias, ya que sus máximos fueron de 180 cel L⁻¹, por lo que no suponen un riesgo.

Se contó con la presencia de ciliados de tallas mayores a 20 µm en la mayoría de las estaciones, aunque no se logró identificar una especie en particular que estuviera asociada con éstas abundancias.

Se cuantificaron células de nanoflagelados. No obstante, pudo haber existido una subestimación de estos componentes del fitoplancton debido a su tamaño relativamente

pequeño (2 a 20 μm). Las células más pequeñas necesitan de un aumento mayor de 40 a 100x para ser identificadas. No obstante en el crucero 2013 fue donde se registró la mayor abundancia de estas células en comparación con los cruceros realizados en el 2010 y 2011.

La presencia de la cianobacteria *Trichodesmium* fue baja en todos los cruceros. Sin embargo en el crucero de julio 2011 y febrero-marzo 2013 se encontraron máximos de 1040 tricomas L^{-1} en el 2011 y 500 tricomas L^{-1} en el 2013, en noviembre 2010 solo se registró en 2 estaciones con abundancias de 20 tricomas L^{-1} .

Recomendaciones

Debido a la baja abundancia de fitoplancton registrado en las muestras del crucero XIXIMI-3, se recomienda sedimentar un mayor volumen de muestra (100 ml en vez de 50 ml) para tener una mayor abundancia de organismos en el fondo de la cámara y mayor precisión en las estimaciones.

Continuar preservando las muestras con lugol-básico para evitar la desintegración de células frágiles, así como realizar el análisis de las muestras en menos de un año, para que las células en observación no presenten degradación y se puedan identificar con mayor claridad.

Realizar cruceros en las estaciones de primavera y otoño, debido a la falta de información sobre de la estructura de la comunidad del fitoplancton y microzooplancton durante esas épocas del año en la zona oceánica del GM. Para fines comparativos con otras campañas, se recomienda además continuar muestreando en las mismas profundidades ó cercanas a 0, 10, 50 y 75 metros, así como en la profundidad del máximo de clorofila.

Referencias

- Aldeco, M.A, Monreal-Gómez, M. Signoret, D.A. Salas-de León y D.U. Hernández-Becerril. 2009. Occurrence of a subsurface anticyclonic eddy fronts and *Trichodesmium* spp. *Ciencias Marinas*. 35(4): 333–344.
- Biggs, D.C, 1992. Nutrients, plankton and productivity in a warm core ring in the Western Gulf of Mexico. *Journal of Geophysical Research*. 97(C2): 2143-2154.
- Carpenter, E. J. 1983. Nitrogen fixation by marine *Oscillatoria* (*Trichodesmium*) in the world's ocean. In: Carpenter EJ, Capone DG (eds.), *Nitrogen in the Marine Environment*. Academic Press, New York. pp. 65–103.

- Cupp, E. E. y W. E. Allen. 1938. Plankton diatoms of the Gulf of California obtained by the G.Allan Hancock Pacific expedition of 1937. University of Southern California Publications. 3(5): 61-100.
- Band-Schmidt C, J.,1 J. J. Bustillos-Guzmán, D. J. López-Cortés, E. Núñez-Vázquez y F. E. Hernández-Sandoval. 2011. El estado actual del estudio de florecimientos algales nocivos en México. *Hidrobiológica* 2011, 21 (3): 381-413.
- Edler, L .1979. Recommendations on methods for marine biological studies in the Baltic Sea. *Phytoplankton and Chlorophyll*. Baltic Marine Biologists Publication No. 5. 38p.
- Escobar-Briones, E., E.L. Estrada-Santillán y P. Legendre. 2008. Macrofaunal density and biomass in the Campeche Canyon, southwestern Gulf of Mexico. *Tropical Studies in Oceanography*. *Tropical Studies in Oceanography*. Ciencias Marinas. The Deep Gulf of Mexico Benthos Program. *Deep-Sea Res. II*. 55(24–26): 2679–2685.
- Franks, P.J.S., 1992. Sink or swim: Accumulation of biomass at fronts. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 82: 1–12.
- Gamboa – Márquez, J.F., I.G. Sánchez–Suárez y A. La Barbera–Sánchez. 1994. Dinoflagelados (Pyrrophyta) del Archipiélago Los Roques (Venezuela): Familias Prorocentraceae y Ostreopsidaceae. *Acta Cient. Venezolana. Biol. Mar.* 45: 140 – 152.
- Gómez, F., H. Claustre, y S. Souissi. 2008. Rarely reported dinoflagellates of the genera *Ceratium*, *Gloeodinium*, *Histioneis*, *Oxytoxum* and *Prorocentrum* (Dinophyceae) from the open southeast Pacific Ocean. *Revista de Biología Marina y Oceanografía* 43(1): 25-40.
- Hernández-Becerril, D.U., J.A. García-Reséndiz, D.A. Salas-de León, M.A. Monreal-Gómez, M. Signoret-Poillon y J. Aldeco-Ramírez. 2008. Nanoplankton fraction in the phytoplankton structure in the southern Gulf of Mexico (April 2000). *Ciencias Marinas*. 34(1): 77–90.
- Hernández-Becerril, D.U y C. Flores. 1998. Species of the diatom genus *Chaetoceros* (Bacillariophyceae) in the plankton from the southern Gulf of Mexico. *Bot. Mar.* 41: 505–519.

- Herrera-Silveira, J. A. y S. M. Morales-Ojeda. 2009. Evaluation of the health status of coastal ecosystem in southeast Mexico: Assessment of water quality, phytoplankton and submerged aquatic vegetation. *Marine Pollution Bulletin*. 59: 72-86.
- Herrera-Silveira, J., C. Álvarez-Góngora, F. Virgilio-Marino y A. Aguilar-Trujillo. 2010. Mareas rojas en las costas de Yucatán. Biodiversidad y desarrollo humano en Yucatán, amenazas a la biodiversidad. México. Nota científica.
- Licea, S. 1994. *Thalassiosira* species from the southern Gulf of Mexico. *Proc. 11th Int. Diatom Symp. Mem. California Acad. Sci.* 17: 311–335.
- Licea, S. y H. Santoyo. 1991. Algunas características ecológicas del fitoplancton de la región central de la Bahía de Campeche. *Anales del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México*. 18 (2): 157-167.
- Licea, S., M. E Zamudio, R. Luna, y J. Soto. 2004. Free-living dinoflagellates in the southern Gulf of Mexico: Report of data (1979–2002). *Phycol. Res.* 52: 419–428.
- Licea, S. y Luna R. 1999. Spatio-temporal variations of phytoplankton on the continental margin in the SW Gulf of Mexico. *Rev. Soc. Mex. Hist. Nat.* 49: 83–99.
- Licea, S. 2006. Diatomeas (Bacillariophyceae) y Dinoflageladas (Dinophyceae) planctónicas más frecuentes en la región sur del GM. Universidad Nacional Autónoma de México. Informe final SNIB-CONABIO proyecto AA012. México.
- Margalef, R. 1969. Counting. En: R.A. Vollenweider, J.F. Talling y D.F. Westlake (Eds.). *A manual on methods for measuring primary production in aquatic environments including a chapter on bacteria*. London International Biological Programme. (IBP Handbk 12), Blackwell Scient. Publ., Oxford. 7-14 pp.
- Melo, N., F. Müller-Karger, S. Cerdeira, R. Pérez, I. Victoria, P. Cárdenas y I. Mitrani. 2000. Near-surface phytoplankton distribution in the western Intra-Americas Sea: The Influence of El Niño and weather events. *Journal of Geophysical Research*. 105 (6): 14029-14043.
- Moreno-Ruiz J.L., J.P. Soto, M.E. Zamudio, D.U. Hernández-Becerril y S. Licea. 1993. Morphology and taxonomy of *Chaetoceros diversus* Cleve (Bacillariophyceae), with reference to material from the Southern Gulf of Mexico. *Diat. Res.* 8: 419–428.

- Moreno J.L., y S. Licea . 1994. Morphology of three related *Coscinodiscus* Ehrenberg taxa from the southern Gulf of Mexico and coastal North Pacific of Mexico. Proc. 11th Int. Diatom Symp. Mem. California Acad. Sci. 17: 113–127.
- Moreno J.L, Licea S. y H. Santoyo . 1996. Diatomeas del Golfo de California. Universidad autónoma de Baja California Sur. Sep-fomes.
- Muciño-Márquez, R. E., M. G. Figueroa-Torres y I. Gárate-Lizárraga. 2011. Especies fitoplanctónicas formadoras de proliferaciones algales nocivas en la boca de la laguna costera de Sontecomapan, Veracruz, México. Cuadernos de Investigación UNED. 3(2): 151-160.
- Ramírez-Camarena, C., D. U. Hernández-Becerril, S. Barón-Campis y N. O. Juárez-Ruíz. 2006. Mareas rojas de *Karenia brevis* en costas mexicanas del GM: Revisión de 1996 a 2005. XII Congreso Nacional de Ciencia y Tecnología del Mar.
- Sournia, A. (ed.) (1978) Phytoplankton Manual. Monographs on Oceanographic Methodology 6. UNESCO, Paris. 337 pp.
- Steidinger, K.A. y K. Tangen. 1997. Dinoflagellates. In: Tomas CR (ed.), Identifying Marine Phytoplankton. Academic Press. pp. 387–584.
- Terán-Suárez, J. M., G. V. Castro, H. F. Mayor-Nucamendi y J. A. Brito- López. 2006. Florecimientos Algales en Tabasco. Salud en Tabasco. 12 (1): 414-422.
- Thronsdon, J. 1978. Phytoplakton preservation and storage. En: A., Sournia. (Ed.). Phytoplankton Manual. UNESCO, Paris. 69-74 pp.
- Tomas, C.R. 1997. Identifying Marine Phytoplankton. Florida Department of Enviromental Protection Florida Marine Research Institute. 857 pp.
- Utermöhl, H. 1958. Zur Vervollkmmoung der quantitiven phytoplankton-methodik. Mitt.Internat. Verein. Limnol. 9: 1-38.
- Westberry T.K. y D.A Siegel. 2006. Spatial and temporal distribution of *Trichodesmium* blooms in the world's oceans. Global Biogeochem. Cycles 20, GB4016. Doi: 10.1029/2005GB002673.
- Walsh J.J., Jolliff J.K., Darrow B.P., Lenos J.M., Milroy S.P., Remsen A., Dieterle D.A., Carder K.L., Chen F.R., Vargo G.A., Weisberg R.H., Fanning K.A., Müller-Karger F.E., Shinn E, Steidinger K.A., Heil C.A., Tomas C.R., Prospero J.S., Lee T.N., Kirkpatrick G.J., Whitledge T.E., Stockwell D.A., Villareal T.A., Jochens A.E.,

Bontempi P.S. 2006. Red tides in the Gulf of Mexico: Where, when, and why? J. Geophys. Res. 111,

Wood, E.J.F. 1971. Phytoplankton distribution in the Caribbean Region. In: UNESCO (ed.), Coloquio sobre Investigaciones y Recursos del Mar Caribe y Regiones Adyacentes. CICAR. pp. 399–410.

Yamaji, I. 1980. Illustrations of the marine plankton of Japan. Hoikusha publishing. 288 pp.

DISTRIBUCIÓN Y ABUNDANCIA DE PICOPLANCTON Y BACTERIAS HETEROTRÓFICAS

Responsable: Dr. Rubén Lara Lara, CICESE

Participantes: Carmen Bazán Guzmán, Guadalupe Cabrales Talavera, Citlalli Sánchez Robles, Edwin Morales Torres, CICESE

Antecedentes y justificación del trabajo

El picoplancton es un importante componente de la comunidad microbiana del plancton en el océano. Su estudio se ha incrementado recientemente debido a que juega un papel importante en la transferencia de carbono en zonas costeras y de surgencia. En aguas oceánicas tropicales y subtropicales contribuyen aproximadamente el 80 % del total de la clorofila a y un 70% de la producción primaria (Li y Harrison 2001). Por otra parte, las bacterias heterótrofas contribuyen un importante aporte a la biomasa total del plancton y en ocasiones su biomasa es mayor que la de los productores primarios, y juegan además un papel importante en los procesos heterotróficos pelágicos (Cho y Azam 1990).

En el Zona Económica Exclusiva mexicana del GM hay escasos estudios sobre de las diferentes poblaciones que forman parte del picofitoplancton (*Prochlorococcus*, *Synechococcus* y piceucariontes) y de las bacterias heterotróficas, aunque hay información para la región americana (Jochem, 2001). La mayoría de los estudios que se han llevado a cabo en la región mexicana están basados en la utilización de técnicas como la microscopía electrónica ó en técnicas de tinción por microscopia de epifluorescencia. Sin embargo, estas técnicas no son lo suficientemente sensibles para distinguir entre *Prochlorococcus* y bacterias heterotróficas, a menos que se utilice un equipo sofisticado de video digital (Marie et al. 1997). El empleo de técnicas más sensibles y automatizadas como la citometría de flujo nos permite obtener con mayor exactitud información sobre los grupos del picoplancton y de bacterias heterótrofas.

El presente estudio constituye un avance en la generación de información de las diferentes poblaciones del picofitoplancton y bacterias heterótrofas en la zona de aguas profundas del GM. La continuidad de estos estudios nos permitirán a futuro tener mejor y mayor información para establecer la importancia que tienen estas poblaciones en el ciclo de carbono del GM.

Objetivo general

Estimar la abundancia, y distribución horizontal y vertical de las poblaciones autotróficas (*Prochlorococcus*, *Synechococcus* y piceucariontes) y heterotróficas (bacterias) del picoplancton del GM durante febrero y marzo del 2013.

Metodología

Estrategia de muestreo

Durante la campaña oceanográfica XIXIMI-3 se recolectaron muestras en 33 estaciones localizadas en aguas profundas (isobatas mayores 1000 m de profundidad) a diferentes niveles de profundidad para el análisis de poblaciones autotróficas de picoplancton y bacterias heterotróficas (Anexo 2).

Se reportan las abundancias de las poblaciones autotróficas de picoplancton tales como *Prochlorococcus*, spp., *Synechococcus*, spp. y Picoeucariontes, además de bacterias heterotróficas en las estaciones ubicadas entre los paralelos 25N y 20N (Figura 1). Las muestras fueron colectadas en las siguientes profundidades: 0, 10, 20, 50, 75, 100 metros, (Anexo 2).

Se realizaron lances hidrográficos de roseta acoplados con CTD y sensores de fluorescencia y oxígeno. La mayor parte de las muestras se colectaron con botellas Niskin de 10 litros de capacidad, mientras que la muestra cercana a la superficie fue colectada de manera manual con una botella Van Dorn de 5 litros de capacidad. Las muestras se colectaron con criotubos de 2 ml y se fijaron con 100 μ l de paraformaldehído al 10% (0.5 concentración final). Se dejaron reposar por 15 a 30 minutos en la oscuridad para que el reactivo penetrara al interior de las células. Finalmente, se conservaron en nitrógeno líquido (congelación rápido) hasta el análisis en laboratorio por citometría de flujo.

Métodos de laboratorio

Las muestras fueron enviadas al Laboratorio de Citometría de Flujo SOEST de la Universidad de Hawaii (<http://www.soest.hawaii.edu/sfcf/>) y analizadas de acuerdo a la técnica desarrollada por Monger y Landry (1993) con un citómetro Altra (Beckman-Coulter). A continuación se describe la metodología para el análisis en laboratorio.

El análisis cuantitativo

Antes de realizar el análisis, las muestras fueron preparadas para el análisis simultáneo de las poblaciones de picoplancton autótrofo y las bacterias heterotróficas de acuerdo a la técnica desarrollada por Monger y Landry (1993), que consiste en teñir el ADN de las bacterias heterótroficas para facilitar la separación de las señales de fluorescencia celular del ruido de fondo (background). Las muestras se descongelaron rápidamente por inmersión en un recipiente con agua a temperatura ambiente y fueron cubiertas con papel aluminio para evitar la penetración de luz. Posteriormente fueron teñidas con Hoechst 34442 (1 μ g/ml; concentración final) por 1 hora a temperatura ambiente y fueron analizadas con un citómetro de flujo modelo Beckman Coulter en el Laboratorio de Citometría de Flujo SOEST de la Universidad de Hawaii

(<http://www.soest.hawaii.edu/sfcf/>). Este equipo cuenta con 2 láseres de excitación de iones (Argón): UV (200 mW) y Azul (488 nm) (1 W) y está configurado con un dispositivo para muestreo de volumen cuantitativo de muestra (Harvard Apparatus Syringe pump). El instrumento está configurado para obtener las siguientes señales de refracción y fluorescencia: FSC (fotodiodo), SSC (90°LS, 488 ± 20 nm BP), ADN Hoechst-bound (450 ± 40 nm), ficoeritrina (575 ± 20 nm) y clorofila (680 ± 20 nm). Previo al análisis, las señales de fluorescencia y refracción del instrumento fueron normalizadas con perlas de poliestireno amarillo-verde (A-V) de 0.5 y 1.0 mm de diámetro (Polysciences Inc., Warrington, PA, USA).

Materiales de referencia para la identificación de poblaciones

Las señales de los parámetros obtenidos durante el análisis fueron procesados con el programa Flow Jo (Treestar, Inc., www.flowjo.com). Es un programa avanzado para análisis de datos que permite procesar la información obtenida de los diferentes parámetros de dispersión y fluorescencia para caracterizar la abundancia de las poblaciones de *Prochlorococcus* spp. (PRO), *Synechococcus* spp. (SYN), Picoeucariontes (PICOEU) y bacterias heterotróficas (BH).

Abundancia (células x ml⁻¹) de las diferentes poblaciones analizadas.

$\text{Células x ml}^{-1} = \# \text{ de conteos} / P/F / V_a / C$
--

P= Volúmen de paraformaldehído agregado (0.95 ml)

F= Volúmen final de fluorocromo agregado (0.98 ml)

Va = Volúmen de análisis (0.1 ml)

C= Corrección por calibración, solución esferas fluorescentes (0.82 ml)

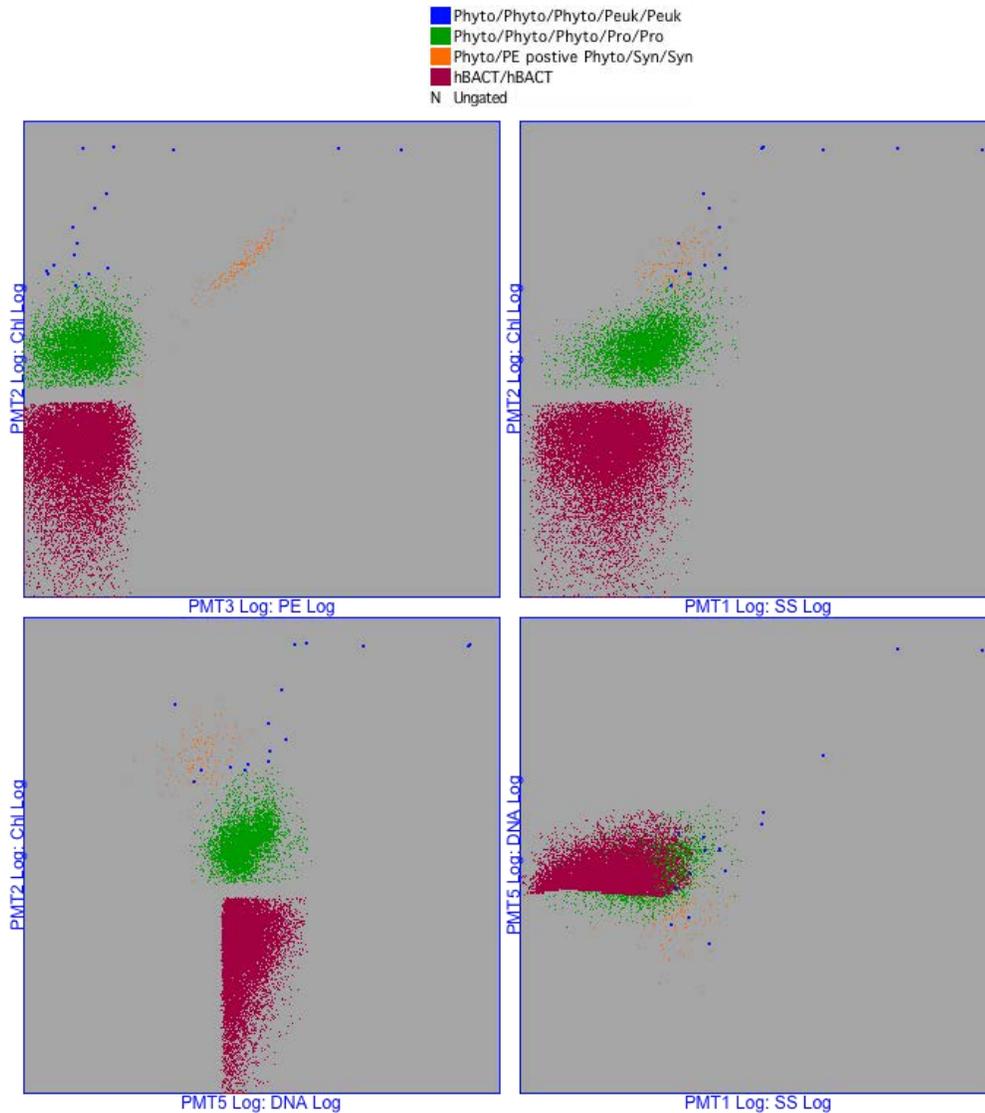


Figura 115. Ejemplo de una gráfica de la distribución de las diferentes poblaciones de picofitoplancton y bacterias heterotróficas analizadas por citometría de flujo (SOEST Flow Cytometry Facility, Manoa, Hawaii). (Campaña oceanográfica XIXIMI-2).

Resultados

De acuerdo al método utilizado, se reportan las abundancias en células $\times \text{ml}^{-1}$ de las poblaciones de *Prochlorococcus* spp. (PRO), *Synechococcus* spp. (SYN), Picoeucariontes (PICOEU) y bacterias heterotróficas (BH) provenientes de 33 estaciones del GM que se localizan en aguas profundas (isobatas mayores 1000 m de profundidad). Se reportan además las abundancias expresadas en células $\times \text{L}^{-1} \times 10^6$. Este tipo de análisis rutinario está centrado en la detección y separación de diferentes grupos con fluorescencia natural ó utilizando marcadores moleculares; sin embargo, no distingue las

diferentes especies. Para la detección de células o bacterias con bajo o alto contenido de ADN, se deben emplear técnicas de citometría de flujo más específicas.

Se presenta una tabla con valores de abundancia promedios, mínimos y máximos para cada población (Anexo 2). En algunas estaciones solo fue posible analizar muestras en 2 o 3 niveles de profundidad, principalmente a 0, 10 ó 50 metros (E12, E15, E27, E36, E38). Se incluyen figuras de la distribución horizontal a 3 niveles de profundidad (10, 50 y 75 metros) para cada una de las poblaciones. Sin embargo, para fines comparativos con los grupos fitoplanctónicos reportados en la zona durante el mismo periodo (ver sección Fitoplancton), los valores de abundancia fueron expresados como células $\times L^{-1} \times 10^6$ en las figuras que se presentan.

Distribución horizontal y vertical

Prochlorococcus spp.

En la Figura 116 se observa la distribución de *Prochlorococcus* spp. a 3 niveles de profundidad: 10, 50 y 75 metros. El patrón general muestra la formación de núcleos de mayor abundancia en distintas partes del GM según el nivel de profundidad (Figura 116a, b y c). Las mayores abundancias a 10 y 50 metros de profundidad ($250 \text{ células} \times L^{-1} \times 10^6$) se presentaron en las estaciones localizadas al sur del Golfo, en los paralelos 21 y 20N, cercanas a las plataformas de las costas de Tamaulipas, Veracruz y Campeche, mientras que en las estaciones localizadas más al norte ($> 22N$), los valores variaron entre 150 y 200 células $\times L^{-1} \times 10^6$ (Lara Anexo 1).

La abundancia a 75 metros de profundidad fue más baja en relación a 10 y 50 metros, principalmente hacia las estaciones cercanas a la plataforma de las costas de Tamaulipas y Tabasco. Sin embargo, se registró un núcleo de mayor concentración celular ($450 \text{ células} \times L^{-1} \times 10^6$) en la estación E17 localizada en el paralelo 25N (Lara Anexo 1).

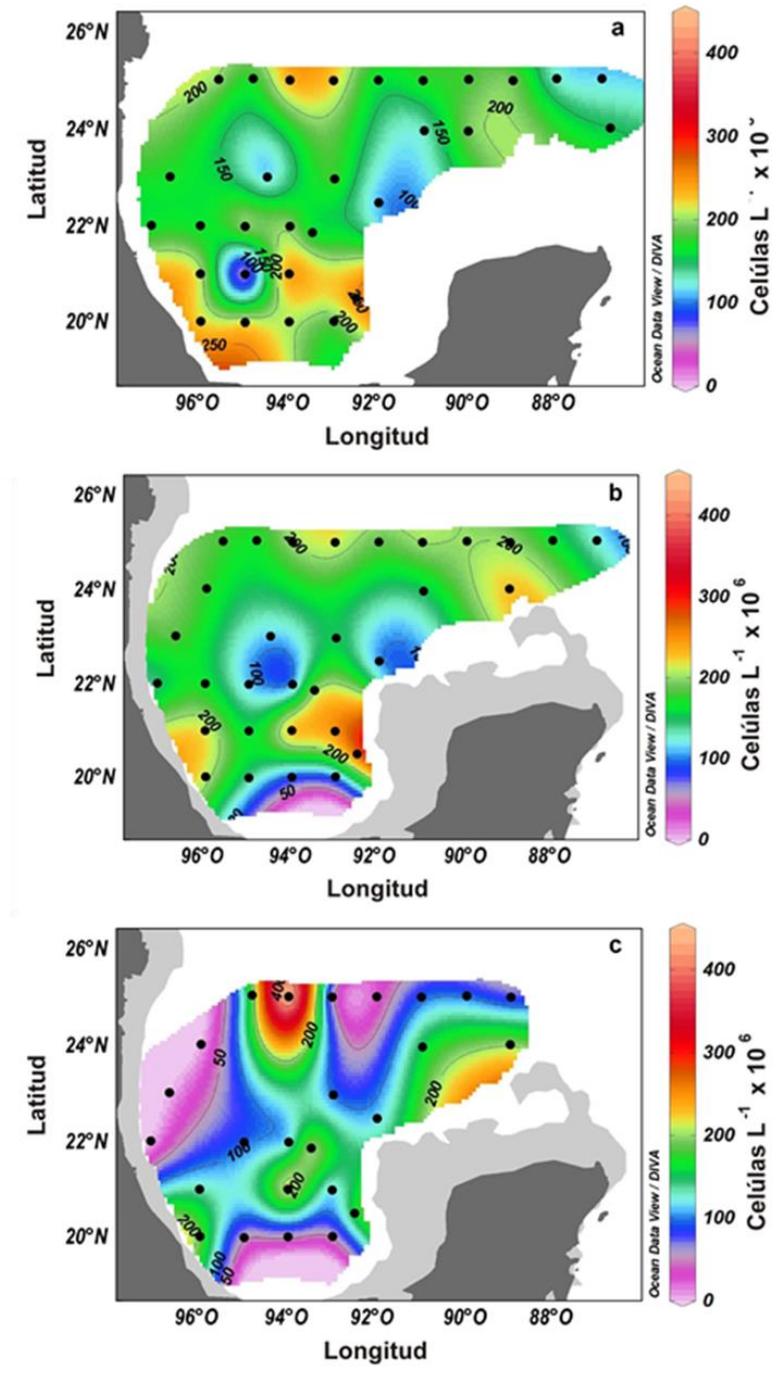


Figura 116. Distribución horizontal de la abundancia (células x L⁻¹ x 10⁶) de *Prochlorococcus* spp., a 10 (a), 50 (b) y 75 (c) metros de profundidad en el GM durante el crucero XIXIMI-3 realizado en febrero-marzo del 2013.

Synechococcus spp.

La abundancia de *Synechococcus* spp. fue un orden de magnitud más baja que la reportada para *Prochlorococcus*; sin embargo, su patrón de distribución en el GM fue similar (Lara Figura 117a, b, c). Las mayores abundancias de esta población se registraron en los niveles de 10 y 50 m de profundidad ($>40 \text{ células} \times \text{L}^{-1} \times 10^6$) particularmente hacia la región cercana a la plataforma de la costa de Tamaulipas en el paralelo 25N (Figura 117a y b). En esta misma latitud, se observó un segundo pulso de alta abundancia en 10 y 50 metros de profundidad en la estación E18 (Lara Anexo 1). En general, los valores de abundancia disminuyeron hacia 75 m de profundidad, registrándose la formación de un núcleo aislado de mayor abundancia de células en las estaciones E32 y E47 localizadas en la región este del golfo con valores de 21 y 25 células $\times \text{L}^{-1} \times 10^6$, respectivamente (Figura 117).

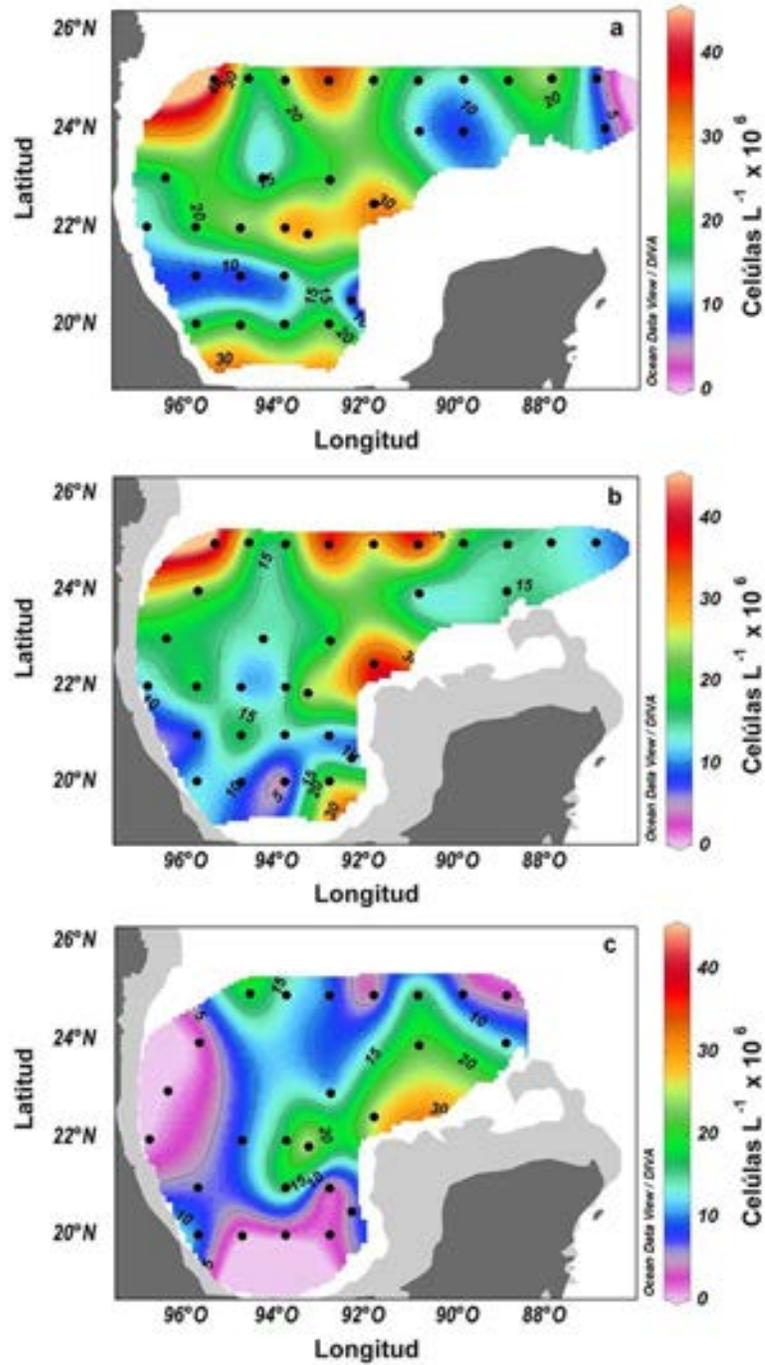


Figura 117. Distribución horizontal de la abundancia (células $\times \text{L}^{-1} \times 10^6$) de *Synechococcus* spp., a 10 (a), 50 (b) y 75 (c) metros de profundidad en el GM durante el crucero XIXIMI-3 realizado en febrero-marzo del 2013.

Picoeucariontes

A diferencia de las poblaciones antes mencionadas, la abundancia de los picoeucariontes aumentó con la profundidad siguiendo aproximadamente el patrón que presenta la fluorescencia medida *in situ* en esta región durante el crucero XIXIMI-3. Los valores más altos de abundancia se observan a 50 y 75 metros en núcleos localizados en las estaciones al sur (paralelo 20N) y al norte (paralelo 25N) del GM, mientras que los valores más bajos se registran a 10 m de profundidad en la mayor parte de las estaciones. Particularmente, los valores máximos se registraron en la E40 con 17 células $\times L^{-1} \times 10^6$ a 50 metros de profundidad. Hacia el norte, las mayores concentraciones de células (>10 células $\times L^{-1} \times 10^6$) fueron observadas a 50 y 75 m de profundidad en las estaciones E23 y E16, respectivamente. Aunque el patrón de distribución a 75 metros de profundidad fue muy similar al registrado a 50 metros, se destaca la disminución de las abundancias de células hacia las estaciones cercanas a la plataforma al oeste y sur del golfo con valores < 2.5 células $\times L^{-1} \times 10^6$).

Cerca de la superficie se registraron abundancias bajas de picoeucariontes, con valores menores a 5 células $\times L^{-1} \times 10^6$ en la mayoría de las estaciones del centro del golfo, excepto por la estación E15 que se encuentra localizada cerca de la plataforma de Tamaulipas donde se registró un máximo de 10 células $\times L^{-1} \times 10^6$.

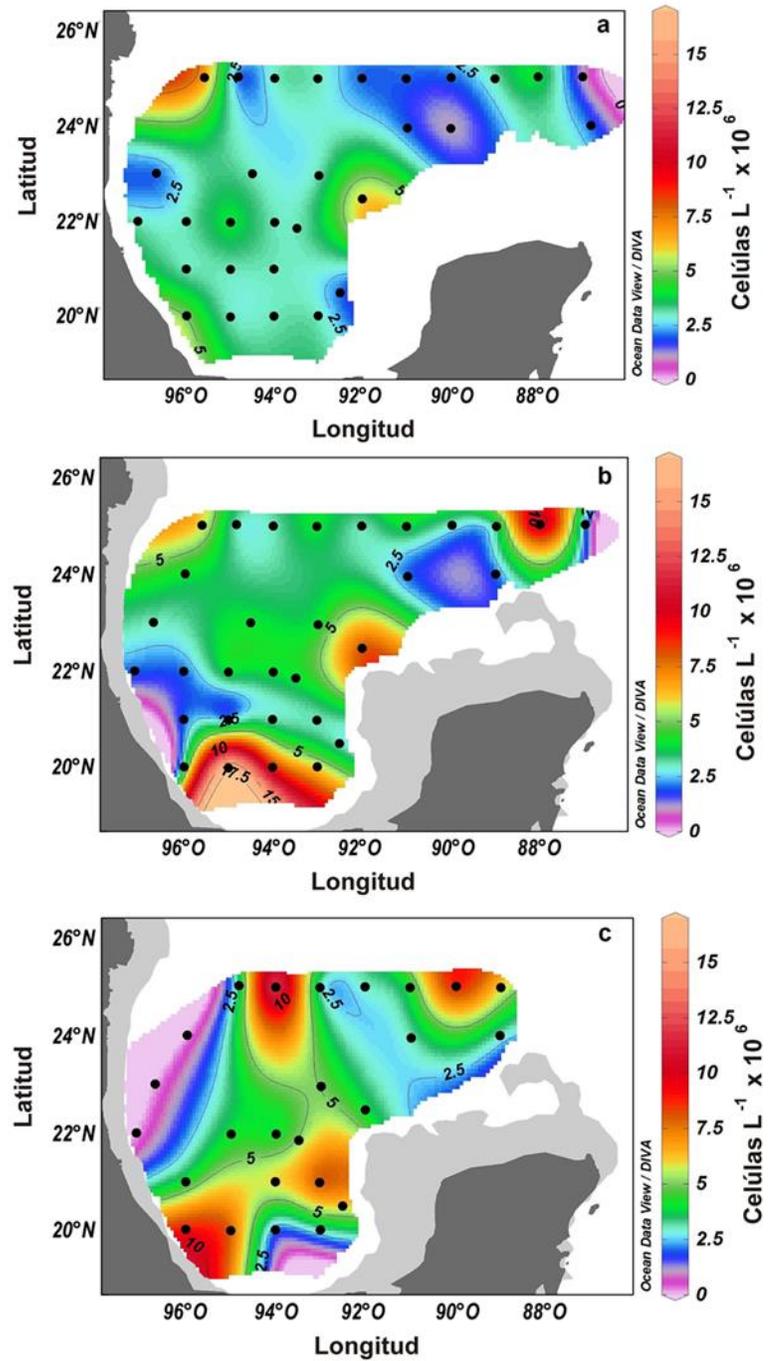


Figura 118. Distribución horizontal de la abundancia (células $\times \text{L}^{-1} \times 10^6$) de los Picoeucariontes a 10 (a), 50 (b) y 75 (c) metros de profundidad en el GM durante el crucero XIXIMI-3 realizado en febrero-marzo del 2013.

Bacterias heterotróficas

En general se observó que la abundancia de las bacterias heterotróficas fue mucho mayor que la de los otros grupos analizados por citometría de flujo; su abundancia fue uno y dos órdenes de magnitud más alta que la de los picoeucariontes y cianobacterias. Su distribución, al igual que en el caso de los picoeucariontes y cianobacterias, muestra un patrón heterogéneo con núcleos de alta abundancia celular localizados en diferentes zonas del GM. Las máximas abundancias ($>750 \text{ células} \times \text{L}^{-1} \times 10^6$), se encontraron en las estaciones cercanas a la plataforma de Campeche en los 3 niveles de profundidad, aunque a 75 m este núcleo se incrementó a $\sim 1500 \text{ células} \times \text{L}^{-1} \times 10^6$. Se registraron otros dos núcleos de alta abundancia a 10 y 50 metros de profundidad en la E15 y E23 del paralelo 25N con concentraciones $>500 \text{ células} \times \text{L}^{-1} \times 10^6$. Los menores valores de bacterias heterotróficas ($<250 \text{ células} \times \text{L}^{-1} \times 10^6$) fueron localizados a 10 m y mayormente a 75 m de profundidad hacia las estaciones cercanas a la plataforma de Tamaulipas y Tabasco.

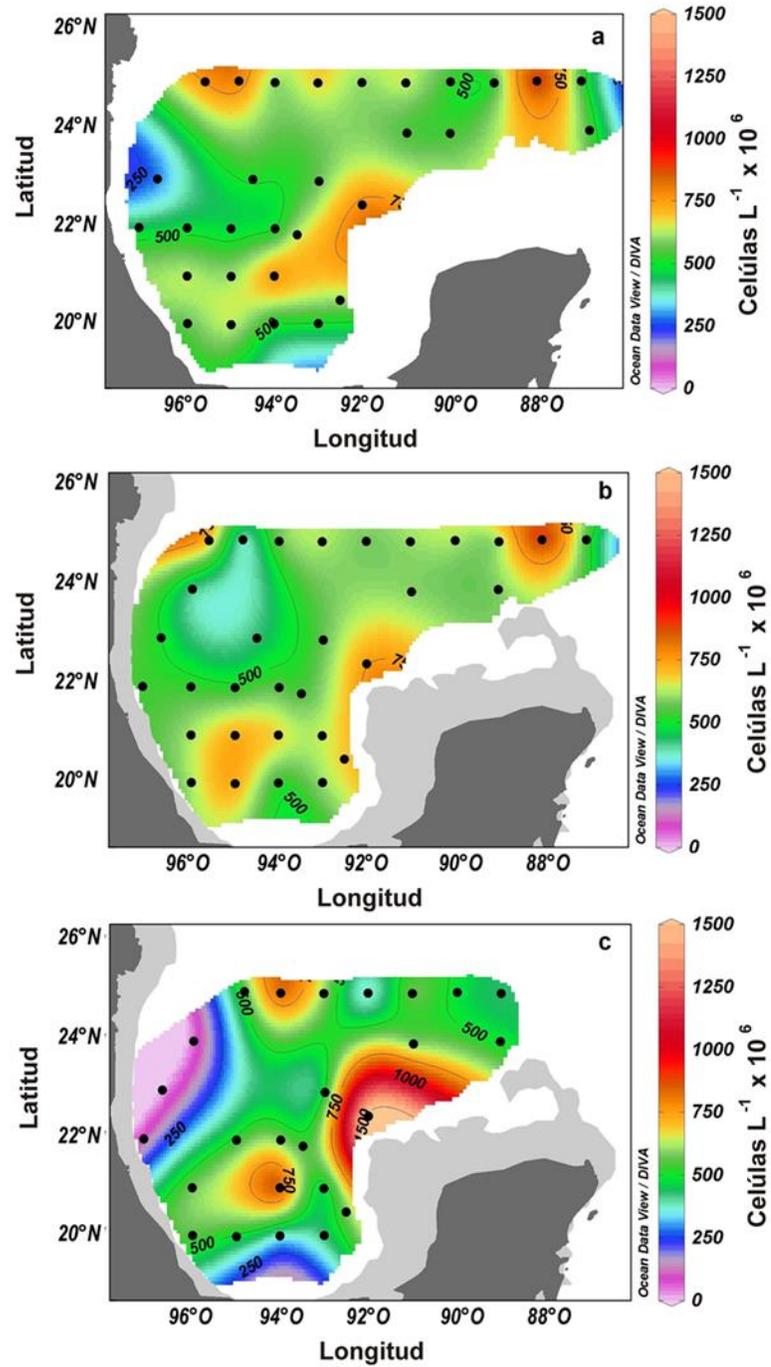


Figura 119. Distribución horizontal de la abundancia de bacterias heterotróficas (células $\times L^{-1} \times 10^6$) a 10 (a), 50 (b) y 75 (c) metros de profundidad en el GM durante el crucero XIXIMI-3 realizado en febrero-marzo del 2013.

Discusión y Conclusión

El presente estudio fue realizado bajo condiciones de fuertes vientos conocidos como “nortes”, que son conducentes a la mezcla vertical y que podrían afectar la distribución de organismos planctónicos.

El género de cianobacteria *Prochlorococcus* se caracteriza por su amplia distribución en áreas oligotróficas y tropicales y en zonas en donde las concentraciones de nutrientes son bajas ya que sus requerimientos nutricionales son muy bajos (Partensky, et al 1999b). Por otra parte, *Synechococcus* es una cianobacteria que se encuentra en ambientes ricos en nutrientes como zonas costeras, y en áreas de baja salinidad y temperatura. En zonas oligotróficas, su abundancia es relativamente baja, especialmente en zonas en donde existe agotamiento de nutrientes como en los giros centrales de los océanos (Partensky, et al 1999a).

Durante este estudio, la distribución del picoplanton, mayormente comprendida por *Prochlorococcus*, en general presentó un patrón en forma de núcleos localizados en diferentes zonas del GM. Las mayores abundancias para *Prochlorococcus* y *Synechococcus* se registraron a 10 y 50 metros de profundidad, en comparación a los picoeucariontes que registraron sus abundancias más altas a 75 metros de profundidad, que corresponde a las profundidades a las cuales estuvieron asociados a los mayores valores de fluorescencia *in situ* que se registraron en la zona durante el crucero XIXIMI-3, posiblemente debido a la presencia de diatomeas, dinoflagelados u otros grupos de tamaño picoplanctónico.

En un estudio realizado por Martínez-López y Parés-Sierra (1998) se documentó una circulación anticiclónica en la región occidental del GM, circulación que ha sido asociada con el viento y los giros anticiclónicos provenientes de la corriente del Lazo.. Los resultados de este trabajo sugieren la presencia de remolinos en la región, los cuales probablemente sean en parte responsables del patrón de distribución horizontal y vertical de las poblaciones picoplanctónicas.

El patrón de distribución de picoeucariontes y bacterias heterotróficas estuvo relacionado en ciertas partes del golfo, sugiriendo que parte de la materia orgánica que sustentan las poblaciones bacterianas provienen de exudados generados posiblemente por diatomeas pequeñas que son rápidamente aprovechados por las bacterias como fuente de material orgánico disuelto debido a la exudación por el fitoplancton (Schmaljohann ,1984).

Recomendaciones

Se recomienda coleccionar muestras en las profundidades que corresponden al máximo de clorofila. Estas pueden ser detectadas por el sensor de fluorescencia durante los lances de CTD.

Se recomienda conservar las mismas profundidades de muestreo en las estaciones denominadas como someras y profundas, lo anterior para fines comparativos con otras campañas oceanográficas y estandarizar las profundidades de colecta de muestras para poder generar los perfiles sin perder resolución.

Referencias

- Azam, F., T. Fenchel, J.G. Field, J.S. Gray, L.A. Meyer-Reil, y F. Thingstad. 1983. The ecological role of water-column microbes in the sea. *Marine Ecology Progress Series* 10, 257-263.
- Boyd, P., Newton, P. 1995. Evidence of the potential influence of planktonic community structure on the interannual variability of particulate carbon flux. *Deep-Sea Research I*, 42, 619-639.
- Bricaud, A., H. Claustre, J. Ras y K. Oubelkheir. 2004. Natural variability of phytoplanktonic absorption in oceanic waters: Influence of the size structure of algal populations. *Journal of Geophysical Research* 109, doi: 10.1029/2004JC002419.
- Chang, F.H., J. Zeldi, M. Gal, y J. Hall. 2003. Seasonal and spatial variation of phytoplankton assemblages, biomass and cell size from spring to summer across the northeastern New Zealand continental shelf. *Journal of Plankton Research* 25, 737-758.
- Cho B.C. y F. Azam. 1990. Biogeochemical significance of bacterial biomass in the ocean's euphotic zone. *Mar. Ecol Prog. Ser* 63:253–259.
- Coats, D.A., 1992. The Loop Current. En *The Physical oceanography of the U.S. Atlantic and Eastern Gulf of Mexico*. J.D. Milliman y E. Imamura (eds.), U.S. Dept of the Interior, Mineral Management Service, Atlantic OCS Region, Herndon, Va., Chapter 6.
- Jochem F. J. 2001. Morphology and DNA content of bacterioplankton in the northern Gulf of Mexico: analysis by epifluorescence microscopy and flow cytometry *AQUATIC MICROBIAL ECOLOGY*. Vol. 25: 179–194,
- Johnson, Z., P Howd, 2000. Marine photosynthetic performance forcing and periodicity for the Bermuda Atlantic Time Series, 1989-1995. *Deep-Sea Research I* 47, 1485-1512.
- Kostka, J. E. O. Prakash, W. A. Overholt, S. J. Green, G. Freyer, A. Canion, J. Delgardio, N. Norton, T. C. Hazen y M. Huettel. 2011. Hydrocarbon-Degrading Bacteria and the Bacterial Community Response in Gulf of Mexico Beach Sands Impacted by the Deepwater Horizon Oil Spill. *APPLIED AND ENVIRONMENTAL MICROBIOLOGY*. Vol. 77, No. 22 p: 7962–7974.

- Li, W.K.W., y W.G. Harrison. 2001. Chlorophyll, bacteria and picophytoplankton in ecological provinces of the North Atlantic. *Deep-Sea Research Part II* 48, 2271-2293.
- Lara Lara, J. R. G. Cabrales y C. Sánchez. 2012. Estructura y abundancia del fitoplancton y microzooplancton. Informe subproyecto, Campaña Oceanográfica XIXIMI-II (Julio del 2011). 33p.
- Longhurst A.R. 1995. Seasonal cycles of pelagic production and consumption. *Prog. Oceanogr.* 36, 77-167.
- Lochte, K., H.W. Ducklow, M.J.R. Fasham, y C. Stienens. 1993. Plankton succession and carbon cycling at 47°N 20°W during the JGOFS North Atlantic Bloom Experiment. *Deep-Sea Research II* 40, 91-114.
- Marie D, F. Partensky, S, Jacquet y D. Vaultot. 1997. Enumeration and cell cycle analysis of natural populations of marine picoplankton by flow cytometry using the nucleic acid stain SYBR Green I. *Appl Environ Microbiol* 63: 186–193.
- Martínez-López B. y A. Pares-Sierra (1998). Circulation in the gulf of Mexico induced by tides, wind and the Yucatan current. *Ciencias Marinas*, Vol 24, No 1.
- Molinari, R.L. 1980. Current variability and its relation to sea-surface topography in the Caribbean Sea and the Gulf of Mexico, *Marine Geodesy*, 3, 409-436.
- Moon-van der Stay, S.-Y. G. W. M. Van der Stay, L. Guillou, D. Vaultot, H. Claustre y L. K. Medlin. 2000. Abundance and diversity of prymnesiophytes in the picoplankton community from the equatorial Pacific Ocean inferred from 18S rDNA sequences. *Limnology and Oceanography* 45, 98-109.
- Müller-Karger, F.E., J.J. Walsh, R.H. Evans y M. B. Meyers, 1991. On the seasonal phytoplankton concentration and sea surface temperature cycles of the Gulf of Mexico as determined by satellites. *Journal of Geophysical Research* 96, 12645-12665.
- Partensky, F., J. Blanchot, y D. Vaultot. 1999a. Differential distribution and ecology of *Prochlorococcus* and *Synechococcus* in oceanic waters: a review. En L. Charpy y A. W. D. Larkum (eds.). *Marine cyanobacteria. Bulletin de L'Institut Océanographique, Monaco. n° special 19: 457-475.*
- Partensky, F., W. R. Hess y D. Vaultot. 1999b. *Prochlorococcus*, a marine photosynthetic Prokaryote of global significance. *Microbiology and Molecular Biology Reviews* 63, 106-127.

Schmaljohann R. 1984. Morphological investigations on bacterioplankton of the Baltic Sea, Kattegat and Skagerrak. *Bot. Mar.*, 27: 425–436.

Sheinbaum, J., J. Candela, A. Badan y J. Ochoa. 2002. Flow structure and transport in the Yucatan Channel. *Geophysical Research Letters*, 29(3), 10.1-10.4, 1040.

VARIABILIDAD BIO-ÓPTICA DEL FITOPLANCTON

Responsable: Dr. Eduardo Millán, CICESE
Participante: Mariana Macías Carballo, CICESE

Antecedentes

La absorción de luz por fitoplancton, así como el material particulado no pigmentado (detritus) son los que más intervienen ó afectan el color del océano, debido a que el material en suspensión forma parte de las propiedades ópticas inherentes de la columna de agua que intervienen en la absorción y esparcimiento de luz. El entender la óptica hidrológica de partículas marinas en suspensión nos lleva a mejorar el conocimiento acerca del coeficiente de atenuación de la luz, la fisiología del fitoplancton y su productividad primaria. El coeficiente de absorción de luz en el océano ya ha sido previamente descrita por autores como Morel y Bricaud (1981), Yentsch y Phinney (1989), Cleveland (1995), Millán Núñez et al. (2004), y Millán Núñez y Millán Núñez (2010), coincidiendo en su mayoría la existencia de una relación no lineal entre el coeficiente de absorción de luz por fitoplancton y la concentración de clorofila; en éste comportamiento se incluye el efecto de paquete, así como las propiedades bio-ópticas del fitoplancton como tamaño y forma de las partículas. En la década de los 1980's se desarrollaron modelos mecánicos satelitales para ayudar a predecir la producción primaria en función de la capacidad de absorción en vivo de las células (Kiefer y Mitchell, 1983; Platt y Sathyendranath, 1988) (ecuación 1).

$$P(z) = \Phi(z) a^*_{ph(z)} B(z) E_{0(z)} \quad (1)$$

Donde $P(z)$ es producción primaria a la profundidad z ($\text{mg C m}^{-3} \text{ h}^{-1}$), $\Phi(z)$ es la eficiencia cuántica fotosintética del fitoplancton ($\text{mol C } \mu\text{E m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), $a^*_{ph(z)}$ es el coeficiente específico de absorción de luz por fitoplancton ($\text{m}^2 (\text{mg Clor-a})^{-1}$), $B(z)$ es la biomasa del fitoplancton expresado en clorofila (Clor-a), y $E_{0(z)}$ es la irradiancia escalar ($\mu\text{E m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). En los algoritmos satelitales enfocados a la producción primaria se han utilizado valores in situ de radiancia y concentración de clorofila captados por el Coastal Zone Color Scanner (CZCS). Sin embargo, en estos algoritmos el parámetro $a^*_{ph440 \text{ nm}}$ se ha utilizado como un valor constante promedio a nivel mundial. Por lo tanto, esperamos que los resultados de $a^*_{ph440 \text{ nm}}$ obtenidos en este estudio se podrán utilizar en un futuro cercano como un valor promedio regional en la aplicación de nuevos algoritmos para el GM. La región suroeste del GM se caracteriza por ser un área influenciada por el incremento de nutrientes provenientes de ríos y estuarios (Lohrenz et al. 1990). Por lo que consideramos que estos procesos terrígenos tienen una gran influencia en la distribución y abundancia del fitoplancton en el GM. Actualmente, el conocimiento acerca de la variabilidad bio-óptica del fitoplancton en aguas mexicanas es escaso, por lo que consideramos que estos datos serán de gran importancia en su utilización por oceanógrafos.

Objetivos

En este estudio se utilizaron muestras de agua recolectadas en 34 estaciones a dos niveles de profundidad, uno cercano a la superficie y el otro a 50 m en la región del GM para evaluar: (1) la variabilidad espacial del $a_{ph440}^*(\lambda)$, (2) la relación entre el $a_{ph440}^*(\lambda)$ y la influencia de ríos (salinidad, nutrientes, pigmentos), (3) estimar el porcentaje de contribución del fitoplancton $a_{ph440}(\lambda)$ y el detritus $a_d350(\lambda)$ en relación al coeficiente de absorción por material particulado en suspensión ($a_p(\lambda)$), y (4) establecer provincias biogeográficas del fitoplancton en la región GM utilizando la forma espectral normalizada del fitoplancton ($a_{ph\ n/440}$).

Metodologías

Área de estudio

El GM se define en este estudio como la región entre los 19° y 25° N. Lat. y 86° y 97° W. Long. entre los estados de Tamaulipas y Yucatán, excepto la plataforma y talud continental donde no se programaron estaciones para la toma de muestras (Figura 1) El GM es un área que presenta una gran variabilidad de procesos lacustres y oceanográficos que actúan sobre la plataforma continental y aguas costeras. Particularmente las surgencias, meandros y giros de agua fría y caliente, así como descargas de ríos, vientos y huracanes que fuerzan la variabilidad de los procesos biogeoquímicos del GM. Algunos estudios se han enfocado sobre los efectos de los flujos de ríos sobre la zona costera y oceánica del GM (McPherson et al. 1990). Sin embargo, se desconocen los patrones sinópticos de variabilidad espacio-temporal de clorofila-*a* y material particulado en suspensión y de los factores físicos-químicos que influyen sobre la variabilidad ecológica del fitoplancton.

En general, el GM es considerado como un sistema oligotrófico (Ortner et al. 1984; Biggs, 1992). Sin embargo, datos de satélite y observaciones in situ (Gilbert et al. 1996; Muller-Karger 2000; Morey et al. 2003; Qian et al. 2003) han mostrado que algunas regiones del GM experimentan valores intermedios y de alta concentración de fitoplancton, tanto en la zona costera como en regiones más alejadas, enfatizando su variabilidad de distribución en patrones con forma de plumas por los efectos de transporte y por procesos de mezcla que varían en función de las estacionalidades del año. Autores como Muller-Karger et al. (1991) utilizaron imágenes de color de la zona costera por satélite (CZCS, por sus siglas en inglés), y observaron una gran variabilidad en la clorofila-*a* en la región de la plataforma continental, con una mayor concentración entre diciembre y febrero, y los más bajos valores entre mayo y julio.

Datos de campo y análisis de muestras

Se tomaron muestras de agua de mar en 34 estaciones en la región GM a dos niveles de profundidad (cercano a la superficie y 50 m) durante el crucero XIXIMI-3 a bordo del B/O Justo Sierra. Las muestras de superficie se recolectaron a aproximadamente 5 m de profundidad con una botella Van Dorn de 5 L, mientras que las de 50 m se tomaron con una botella Niskin de 10 L. En la E7 se tomaron muestras a ocho niveles de profundidad (0, 50, 60, 75, 125, 175, 200, y 230 m). También se hicieron lecturas de disco de Secchi para estimar el coeficiente de atenuación de luz (k) y de esta manera calcular la profundidad de la zona eufótica (E_z) (1% de la penetración de luz superficial) (ecuación 2 y 3).

$$K_z = 1.7/\text{disco de Secchi (m)} \quad (2)$$

$$E_z = E_0 e^{-kz} \quad (3)$$

Coefficiente de absorción de luz por fitoplancton

Las muestras de agua de mar destinadas para el análisis del coeficiente de absorción se colectaron con filtros Whatman GF/F y se almacenaron en nitrógeno líquido. Los filtros con material particulado, así como los blancos ó de referencia (sin muestras), fueron saturados con agua de mar filtrada y posteriormente se obtuvieron curvas espectrales en un espectrofotómetro Shimadzu UV-2401 PC siguiendo la guía de laboratorio descrita por Cleveland y Weideman (1993). El espectro de absorción se midió entre los 400 a 750 nm a 2 nm de resolución y una velocidad intermedia de 300 nm min⁻¹. Posteriormente, los filtros se enjuagaron con metanol siguiendo la técnica descrita por Kishino et al. (1985). El coeficiente de absorción por fitoplancton se determinó por diferencias como el material particulado menos el material no pigmentado (detritus; ecuación 4).

$$a_p(\lambda) = a_{ph}(\lambda) + a_d(\lambda) \quad (4)$$

dónde $a_p(\lambda)$ es la absorción de luz por material particulado a cierta longitud de onda (m⁻¹), $a_{ph}(\lambda)$ es el coeficiente de absorción de luz por fitoplancton (m⁻¹), y $a_d(\lambda)$ es la absorción de luz por detritus (m⁻¹). El coeficiente específico de absorción de luz por fitoplancton (a^*_{ph}) (m² (mg Clor-a)⁻¹), se obtuvo normalizando el coeficiente de absorción de luz por fitoplancton (m⁻¹) por la concentración de clorofila-a (mg m⁻³) que se obtuvo a través de un fluorímetro. Los coeficientes de absorción se corrigieron por un factor (β) que ajusta la densidad óptica de las muestra en filtros ($OD_f(\lambda)$) y lo relaciona con la densidad óptica en muestras en suspensión ($OD_s(\lambda)$) (ecuación 5).

$$OD_s = 0.3269 OD_f + 0.4773 (OD_f)^2 \quad (5)$$

Forma espectral de absorción de luz por fitoplancton

Para determinar la forma espectral del coeficiente de absorción, primeramente se estimó la variable $a_{ph}(\lambda)$ (m^{-1}). Posteriormente, se obtuvo el área bajo la curva espectral del a_{ph} entre los 400 y 750 nm para cada estación de muestreo (ecuación 6), y por último el a_{ph} se normalizó por el área bajo la curva, obteniendo de esta manera la curva espectral normalizada (a_{phn}) para cada estación).

$$a_{phn} = \frac{a_{ph}(\lambda)(m^{-1})}{\int_{400}^{750} a_{ph}(\lambda)(m^{-1})d\lambda(nm)} \quad (6)$$

Análisis de clorofila-a

La clorofila-a (Clor-a) se determinó utilizando el protocolo estándar del Joint Global Flux Study (JGOFS). Este método consistió en la filtración de entre 2-3 litros de agua de mar que se filtró a una presión constante con filtros de fibra de vidrio (GF/F) de 25 mm, los cuales se almacenaron inmediatamente en nitrógeno líquido para su posterior análisis. Una vez en el laboratorio se empleó el método de fluorimetría (Holm-Hansen et al., 1965), el cual consiste en extraer los pigmentos fotosintéticos en 10 ml de acetona al 90% durante 24 hrs a 4°C y en oscuridad completa. Posteriormente se tomó una alícuota de la solución y se obtuvieron las lecturas en un fluorímetro Turner Design modelo Trilogy.

Resultados y discusión

Coeficientes para muestras cercanas a la superficie

Curvas espectrales del coeficiente de absorción por material particulado en suspensión ($a_p(\lambda)$).

En general, las curvas espectrales del $a_p(\lambda)$ en la región del GM en muestras de aguas recolectadas a un nivel cercano a la superficie, mostraron un intervalo de valores de 0.01-0.116 m^{-1} (Figura 120). Los valores más altos (entre 0.08-0.11 m^{-1}) se observaron en las estaciones E1 y E15 en la latitud 22° y 25° N, respectivamente (Figura 120 a y Figura 120d). Por otro lado, los valores más bajos se detectaron principalmente en las estaciones E23, E24, E30, E32, E37, E38, y E46. Estas estaciones se localizaron principalmente frente a Veracruz y al norte de la península de Yucatán (Figura 120b, Figura 120e, Figura 120f).

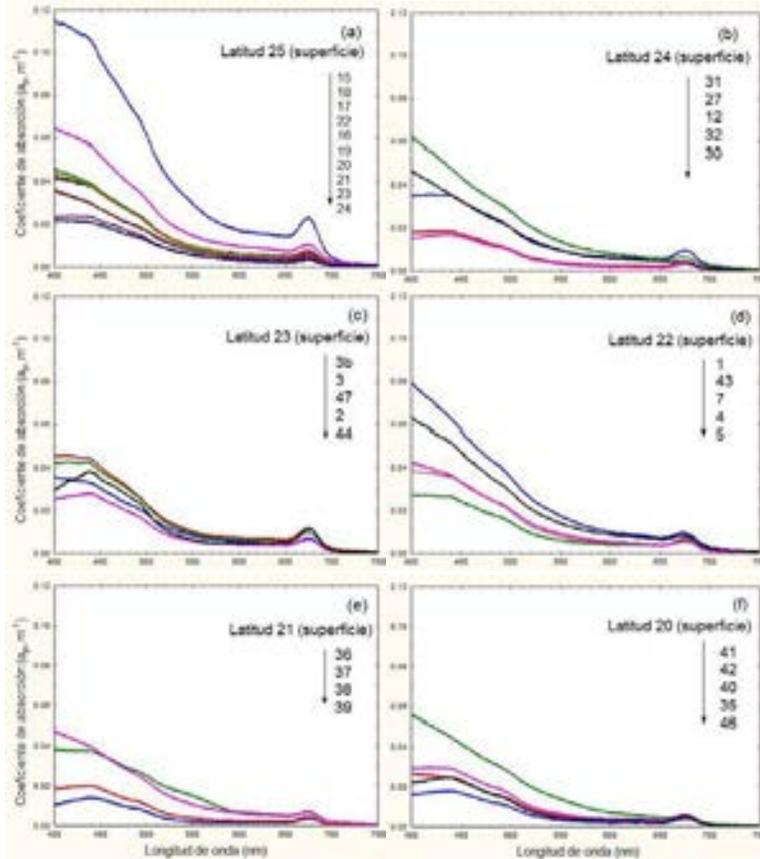


Figura 120. Curvas espectrales del coeficiente de absorción de luz por material particulado en muestras recolectadas cercanas a la superficie durante el crucero oceanográfico XIXIMI-3 (19 de febrero al 10 de marzo del 2013). La flecha marca la posición de las estaciones en relación a las curvas.

Curvas espectrales del material detritus ($ad(\lambda)$)

Las curvas espectrales del coeficiente de absorción de luz por detritus ó material no pigmentado cercano a la superficie en el GM mostraron un intervalo de valores de entre 0.006-0.114 m^{-1} a una longitud de onda de 350 nm (Figura 121). Los valores más altos del coeficiente $ad(\lambda)$ mostraron un promedio de 0.10 m^{-1} , y se detectaron principalmente en las estaciones E1, E15, E18, E27, E31, E41 (Figura 121a, b, d, f). En este estudio, podríamos considerar que uno de los factores que influyen sobre la presencia de valores altos del coeficiente $ad(\lambda)$ son los relacionados con los afluentes de los principales ríos caudalosos que fluyen hacia la zona costera de la región suroeste del GM, tales como los situados en la región norte: Río Bravo, San Fernando y Soto La Marina que desembocan en la latitud 24° y 25° N, los de la zona intermedia como los ríos Pánuco, Moctezuma, y Tuxpan que desembocan alrededor de la latitud 22° N, y los situados en la región sur como el Río Papaloapan y Usumacinta que se localizan en la latitud 20° N y 21° N.

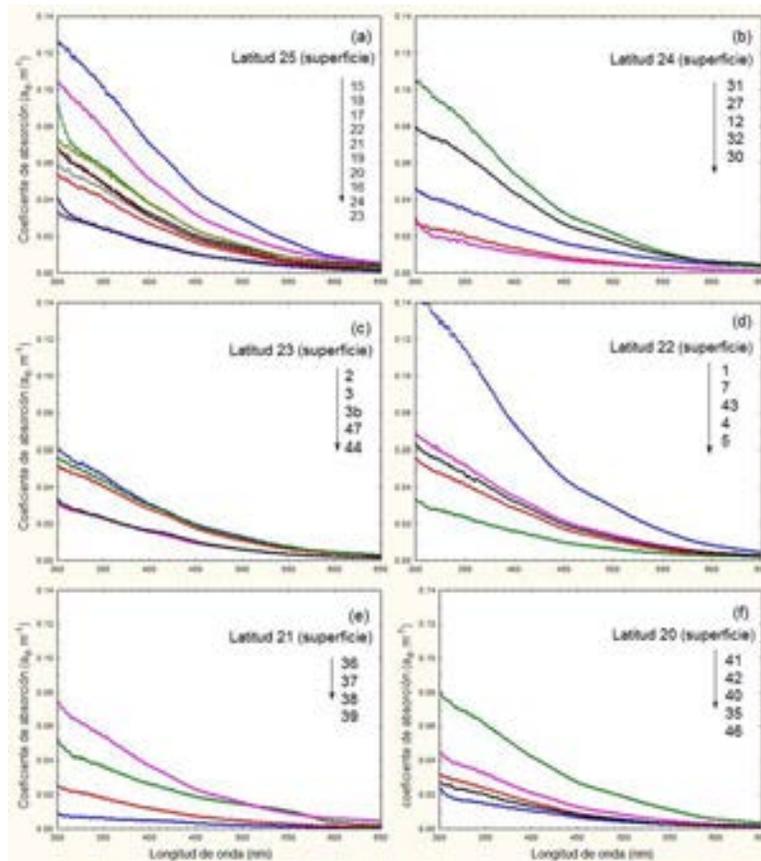


Figura 121. Curvas espectrales del coeficiente de absorción de luz por detritus ó material no pigmentado en muestras recolectadas cercanas a la superficie durante el crucero oceanográfico XIXIMI-3 (19 de febrero al 10 de marzo del 2013). La flecha marca la posición de las estaciones en relación a las curvas.

Curvas espectrales de absorción de luz por fitoplancton ($aph(\lambda)$)

Las curvas espectrales del $aph(\lambda)$ cercano a la superficie mostraron un comportamiento muy similar en magnitud al coeficiente de absorción particulado (ap , m^{-1}) para la región del GM (Figura 122). Se observó en la estación E15 (25° N. Lat.) el valor máximo de $0.055 m^{-1}$ correspondiente a la región azul ($440 nm$) de la curva espectral, y un segundo máximo de magnitud espectral de $0.019 m^{-1}$ en la región roja ($674 nm$) de la curva espectral (Figura 122a); el valor de $aph(\lambda)$ en la longitud de onda de $674 nm$ se relaciona directamente con la concentración de la clorofila-a. Por otro lado, la magnitud de la región roja de las curvas espectrales mostraron un desvanecimiento de los valores alrededor del $0.005 m^{-1}$ para la gran mayoría de las estaciones, excepto para algunas estaciones que se localizaron a la latitud 23° N (Figura 122c).

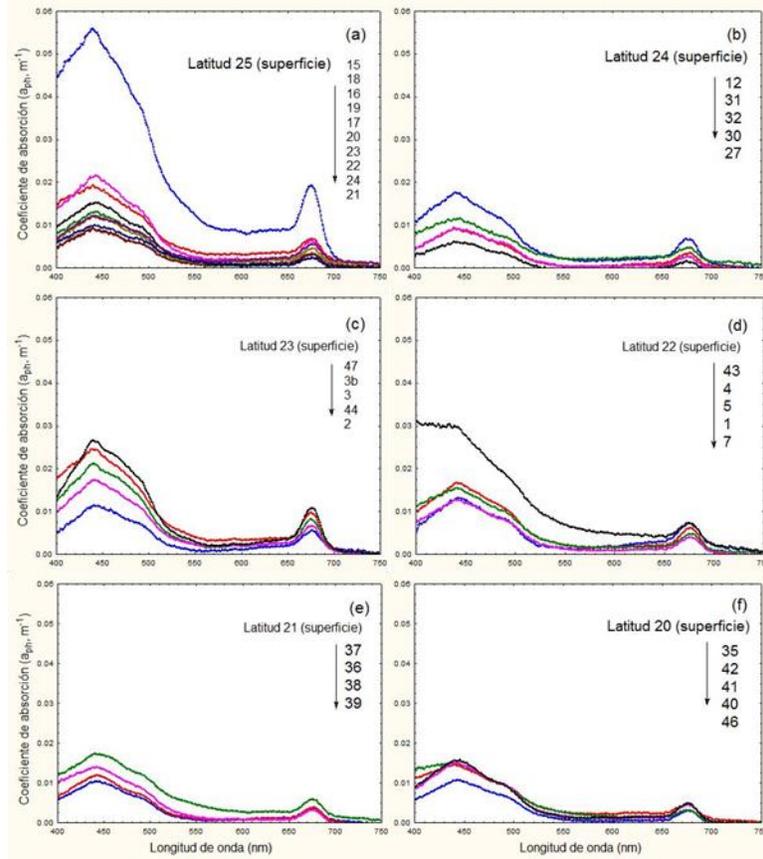


Figura 122. Curvas espectrales del coeficiente de absorción de luz por fitoplancton en muestras recolectadas cercanas a la superficie durante el crucero oceanográfico XIXIMI-3 (19 de febrero al 10 de marzo del 2013). La flecha marca la posición de las estaciones en relación a las curvas.

*Coeficiente específico de absorción de luz por fitoplancton ($a^*_{ph}(\lambda)$)*

El coeficiente específico de absorción por fitoplancton $a^*_{ph}(\lambda)$ se estimó a partir de normalizar el coeficiente de absorción por fitoplancton (a_{ph} , (λ), m^{-1}) por unidad de clorofila-a ($mg\ m^{-3}$). De esta manera, los valores de absorción por estación en el GM podrán ser comparables entre sí. En este estudio, las curvas espectrales de $a^*_{ph}(\lambda)$ correspondientes al agua cercana a la superficie mostraron algunos valores altos de aproximadamente $0.15\ m^2\ (mg\ Clor-a)^{-1}$ (Figura 123a, d, e, f), a diferencia de las curvas espectrales de magnitud menores a $0.04\ m^2\ (mg\ Clor-a)^{-1}$ localizadas en las estaciones E17, E18, E32, E1 Figura 123a, b, d).

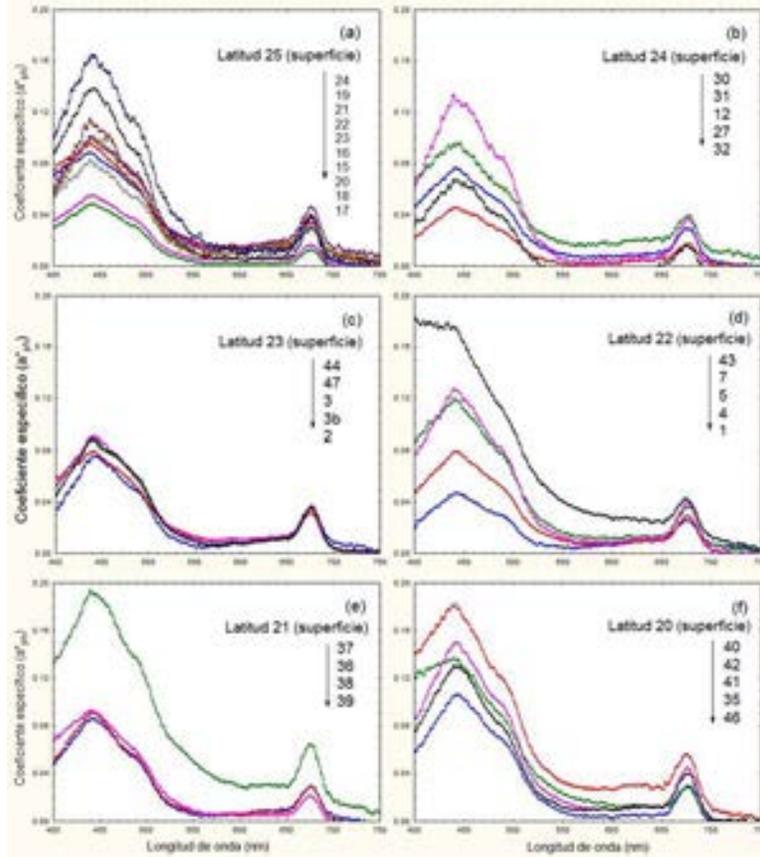


Figura 123. Curvas espectrales del coeficiente específico (normalizado por la concentración de clorofila) de absorción de luz por fitoplancton en muestras recolectadas cercanas a la superficie durante el crucero oceanográfico XIXIMI-3 (19 de febrero al 10 de marzo del 2013). La flecha marca la posición de las estaciones en relación a las curvas.

Coeficientes de muestras de 50 m de profundidad

Curvas espectrales del coeficiente de absorción por material particulado en suspensión ($a_p(\lambda)$)

En general, las curvas espectrales del $a_p(\lambda)$ en la región del GM recolectadas a 50 m de profundidad mostraron un intervalo de valores de 0.002-0.039 m^{-1} (Figura 124). Los valores más altos a este nivel de profundidad variaron entre 0.030-0.039 m^{-1} y se localizaron en las latitudes 25°, 23°, y 20° N, en las estaciones E23, E47, E3, E3b, y E40 respectivamente (Figura 124a, c, f). El resto de estaciones mostraron valores menores a 0.02 m^{-1} .

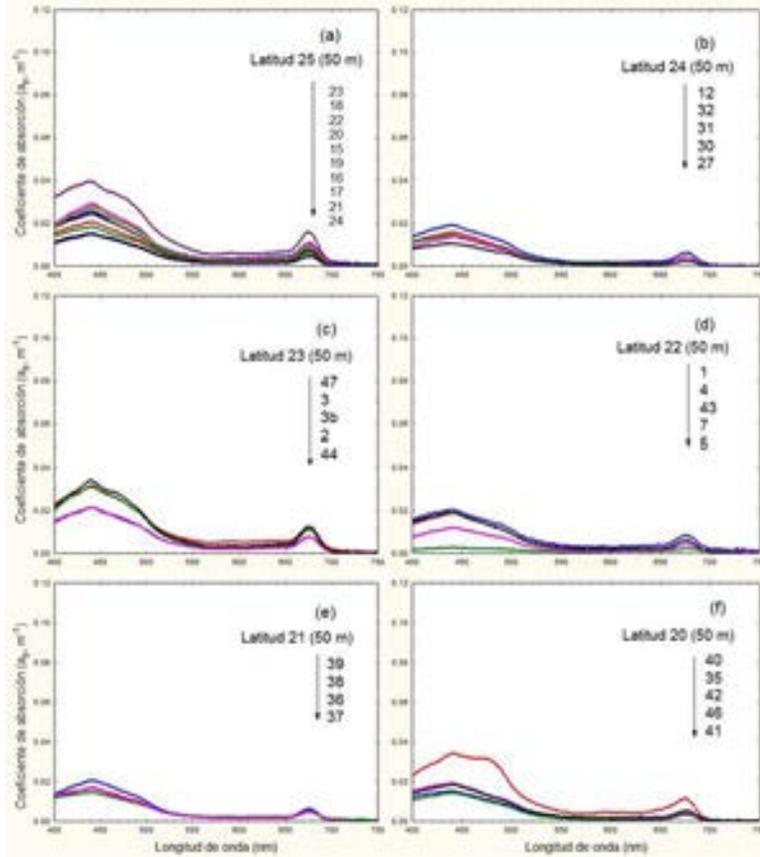


Figura 124. Curvas espectrales del coeficiente de absorción de luz por material particulado en muestras recolectadas a 50 m durante el crucero oceanográfico XIXIMI-3 (19 de febrero al 10 de marzo del 2013). La flecha marca la posición de las estaciones en relación a las curvas.

Curvas espectrales del material detritus ($a_d(\lambda)$)

Las curvas espectrales del coeficiente de absorción de luz por detritus ó material no pigmentado a la profundidad de 50 m mostraron un intervalo de valores de entre 0.002-0.016 m^{-1} a una longitud de onda de 350 nm (Figura 125). En general, se puede observar que el coeficiente $a_d(\lambda)$ mostró valores bajos comparados con las estaciones de superficie.

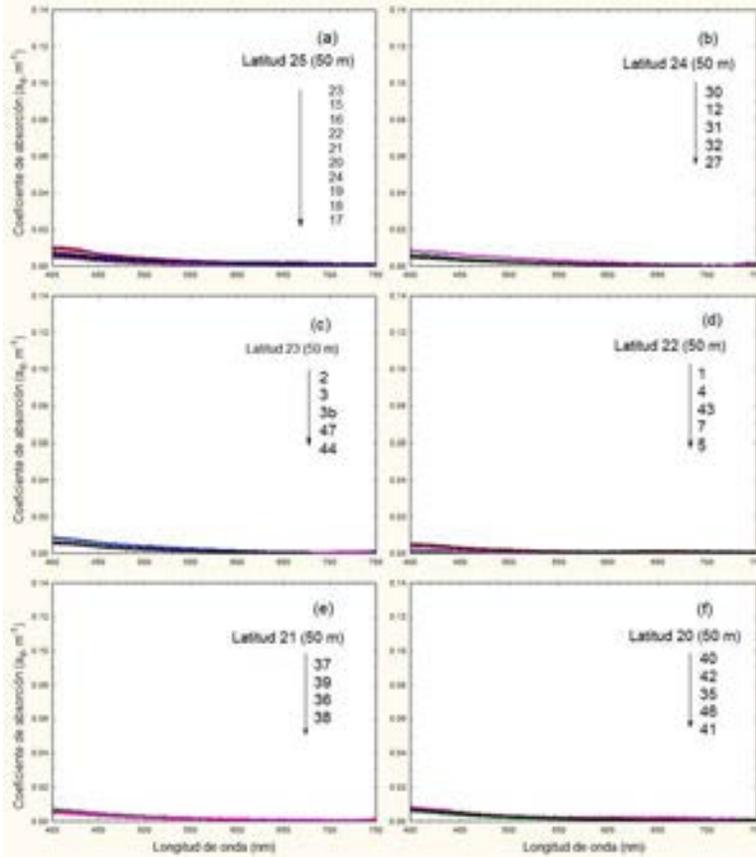


Figura 125. Curvas espectrales del coeficiente de absorción de luz por detritus ó material no pigmentado en muestras recolectadas a 50 m durante el crucero oceanográfico XIXIMI-3 (19 de febrero al 10 de marzo del 2013). La flecha marca la posición de las estaciones en relación a las curvas.

Curvas espectrales de absorción de luz por fitoplancton ($a_{ph}(\lambda)$)

Las curvas espectrales del $a_{ph}(\lambda)$ de muestras recolectadas a una profundidad de 50 m mostraron un intervalo de valores de magnitud de $0.002-0.031 \text{ m}^{-1}$ (Figura 126). A este nivel de profundidad los valores más altos se observaron en las estaciones E23, E18, E47, y E40 (Figura 126 a, c, f). El resto de las estaciones tuvieron menores de 0.015 m^{-1} .

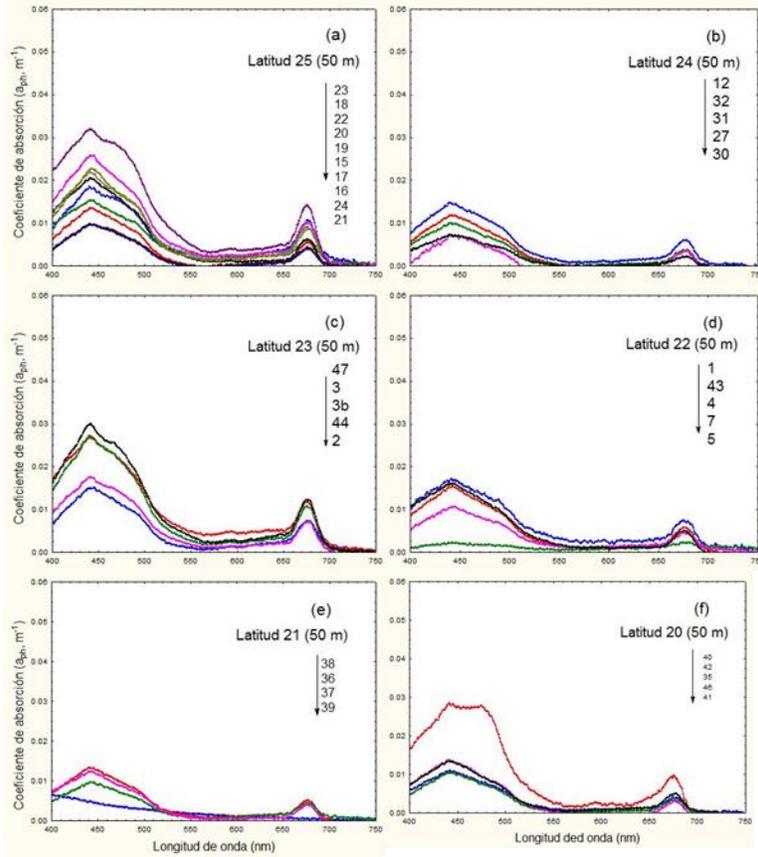


Figura 126. Curvas espectrales del coeficiente específico de absorción de luz por fitoplancton en muestras recolectadas a 50 m durante el crucero oceanográfico XIXIMI-3 (19 de febrero al 10 de marzo del 2013). La flecha marca la posición de las estaciones en relación a las curvas.

*Coeficiente específico de absorción de luz por fitoplancton ($a^*_{ph}(\lambda)$)*

El coeficiente específico de absorción de luz por fitoplancton $a^*_{ph}(\lambda)$ a la profundidad de 50 m mostró valores con un intervalo de magnitud de $0.034\text{-}0.221 \text{ m}^2 (\text{mg Clor-}a)^{-1}$ (Figura 127). A este nivel de profundidad las estaciones E3, E3b, E12, y E21 mostraron valores más bajos del coeficiente específico (Figura 127 a, b, c) localizándose en las estaciones entre latitudes de 23° , 24° , y 25° N .

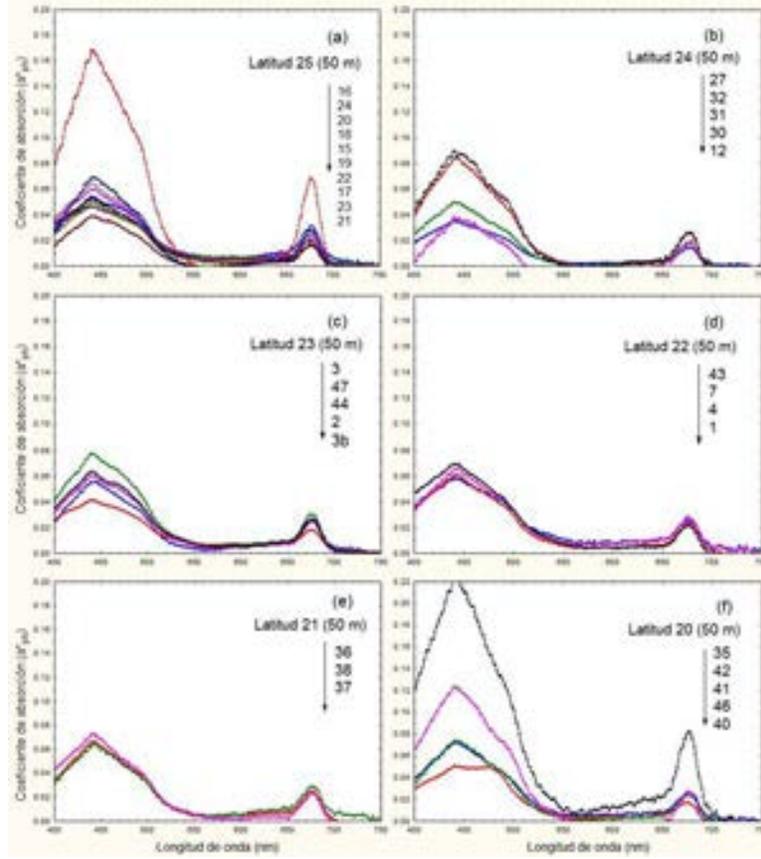


Figura 127. Curvas espectrales del coeficiente específico de absorción de luz por fitoplancton en muestras recolectadas a 50 m durante el crucero oceanográfico XIXIMI-3 (19 de febrero al 10 de marzo del 2013). La flecha marca la posición de las estaciones en relación a las curvas.

*Distribución espacial del coeficiente de absorción de luz por fitoplancton (a_{ph440} nm) y (a^*_{ph440} nm) en superficie y 50 m*

La distribución espacial del a_{ph440} nm mostró un intervalo de valores entre 0.006 a 0.055 m^{-1} (Figura 128). Los valores mínimos registrados en aguas de superficie se detectaron principalmente en la región cercana a la plataforma frente a Veracruz y en la zona oceánica al norte de Yucatán (Figura 128a), y hubo un valor alto frente a Tamaulipas en la región de la desembocadura del río Soto la Marina. A la profundidad de 50 m los valores más altos se localizaron en la región central del área de estudio y norte de Yucatán, observándose los valores bajos cerca a la corriente de Yucatán y al norte de la plataforma de Yucatán (Figura 128b). El coeficiente específico de absorción de luz por fitoplancton en la columna de agua (a^*_{ph440} nm) mostró valores con un intervalo entre 0.034 a 0.220 m^2 (mg Clor- a) $^{-1}$ (Figura 129). En general, los valores bajos del a^*_{ph440} nm cercanos a la superficie se observaron en dos regiones principalmente: uno en la región norte de Veracruz frente a la desembocadura del río Tuxpan y la otra región al norte del área de estudio frente a Tamaulipas en la región de la desembocadura

del río Soto la Marina (Figura 129b). Con la razón espectral entre las dos longitudes de onda $a_{ph440} \text{ nm}/a_{ph674} \text{ nm}$ (Blue/Red) obtendremos una distribución espacial de la estructura de tamaño de las células del fitoplancton en el GM, esto al relacionar los valores altos de la razón B/R con células de tamaño pequeño (picofitoplancton), y valores bajos con células denominadas microfitoplancton; observándose en este estudio un intervalo de valores entre 1.0 a 10.6 (Figura 130). Los valores más altos de esta razón (>10 unidades) se detectaron a la profundidad de 50 m en la región suroeste frente a la costa de Veracruz (Figura 130b), sin embargo, los valores bajos entre 2 y 3 unidades se detectaron mayormente en la región central del área de estudio al nivel de 50 m de profundidad. Por otro lado, cercano a la superficie observamos que los valores entre 4 y 5 unidades de B/R dominaron la región central y sur del área de estudio. Por lo que podemos deducir, que a partir de la Figura 130 se detectó una mayor abundancia de los organismos del grupo picoplancton (<2 μm) en superficie para la región central y sur del GM, incluyendo la región de la plataforma frente a Veracruz al nivel de 50 m de profundidad.

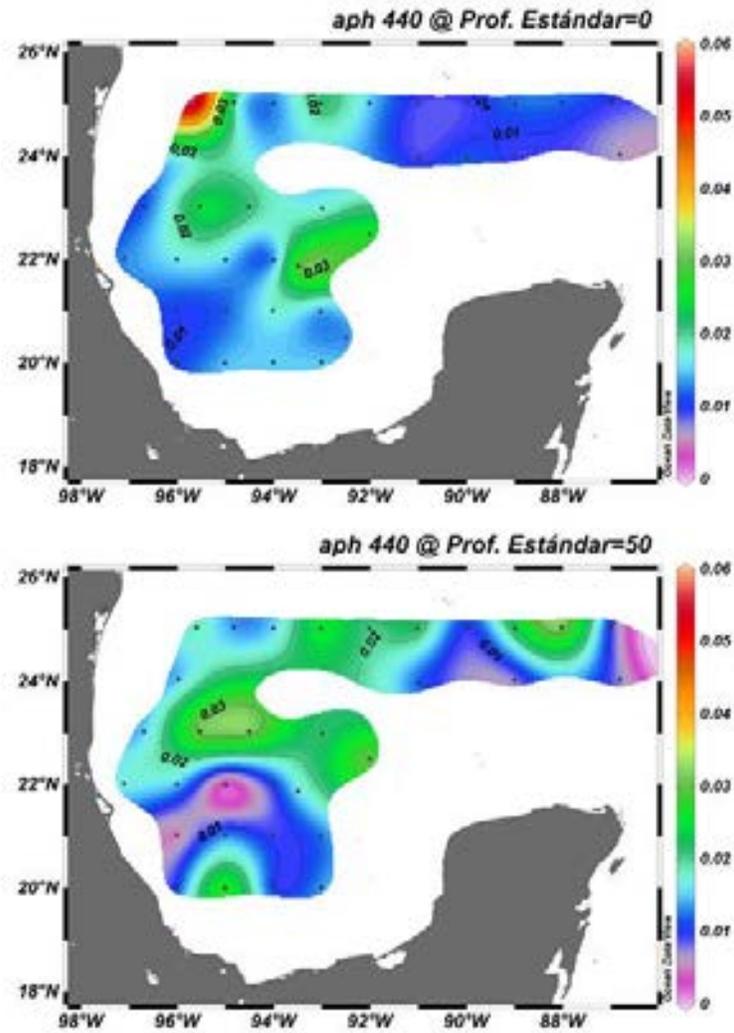


Figura 128. Distribución espacial del coeficiente de absorción de luz por fitoplancton (aph440 nm) en muestras recolectadas durante el crucero oceanográfico XIXIMI-3 (19 de febrero al 10 de marzo del 2013): a) superficie y b) 50 m de profundidad.

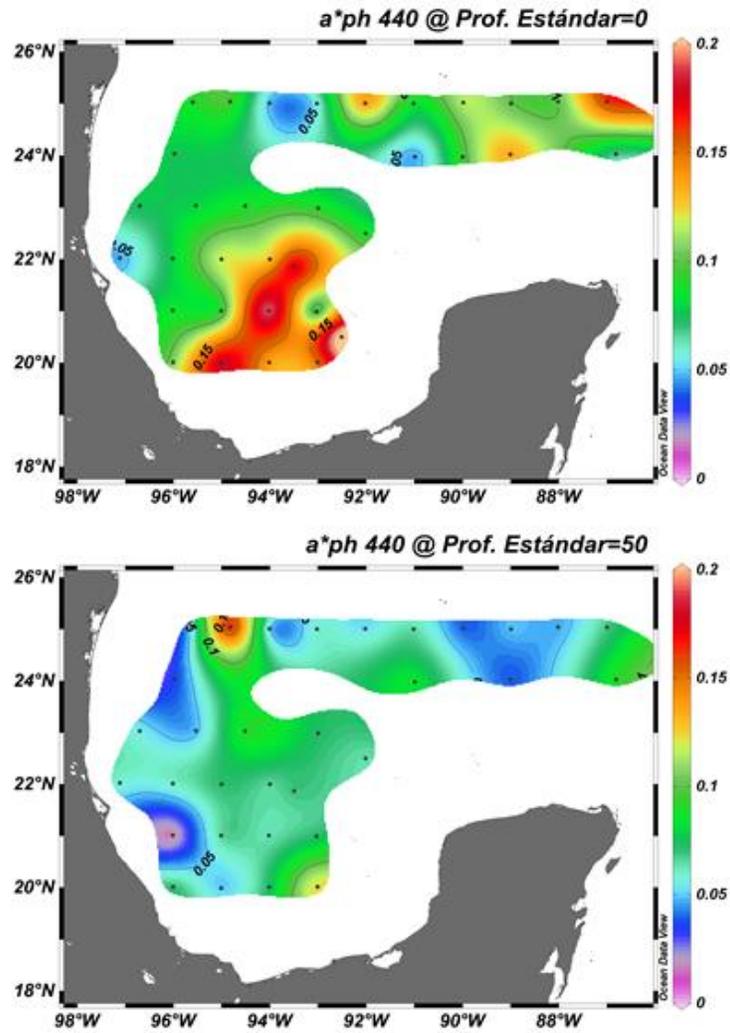


Figura 129. Distribución espacial del coeficiente específico de absorción de luz por fitoplancton a^*_{ph440} en muestras recolectadas durante el crucero oceanográfico XIXIMI-3 (19 de febrero al 10 de marzo del 2013): a) superficie y b) 50 m de profundidad.

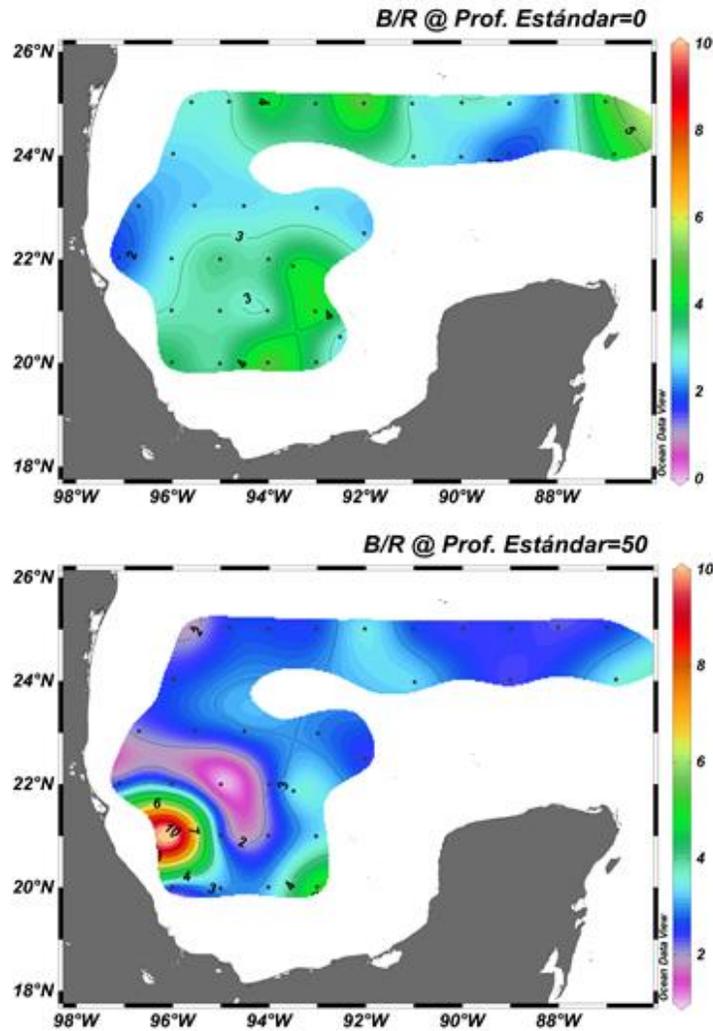


Figura 130. Distribución espacial de la razón de magnitud entre dos longitudes de onda a_{ph440}/a_{ph674} en muestras recolectadas durante el crucero oceanográfico XIXIMI-3 (19 de febrero al 10 de marzo del 2013): a) superficie y b) 50 m de profundidad.

Distribución espacial de clorofila-a

Durante el período de muestreo la Clor-a mostró un intervalo de valores en la columna de agua entre $0.03-0.69 \text{ mg m}^{-3}$ (Figura 131), observándose las mayores concentraciones del pigmento a 50 m de profundidad en las estaciones E3b, E23, y E40. Asimismo, en superficie en la estación E15 se detectó un valor alto de clorofila en la región de la plataforma frente a Tamaulipas.

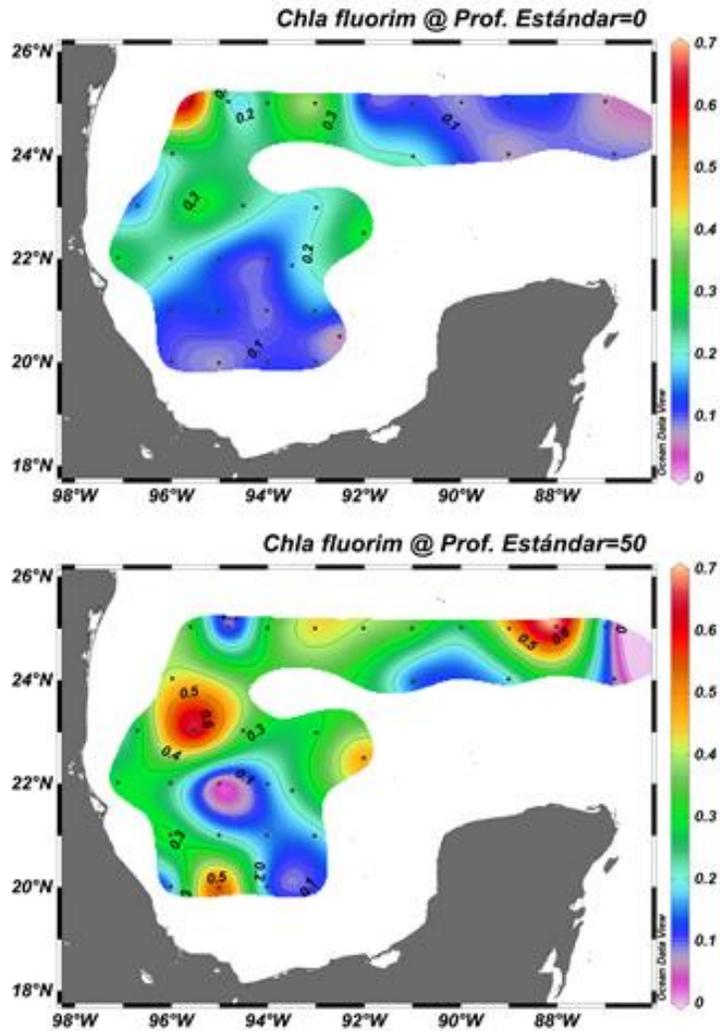


Figura 131. Distribución espacial de clorofila-a en muestras recolectadas durante el crucero oceanográfico XIXIMI-3 (19 de febrero al 10 de marzo del 2013): a) superficie y b) 50 m de profundidad.

Composición de la estructura taxonómica del fitoplancton asociada a la forma espectral ($a_{phn/440}$) en superficie y 50 m

Cada forma espectral de absorción de luz por fitoplancton refleja la composición de pigmentos fotosintéticos contenidos en las células del fitoplancton para cada estación de muestreo. Al analizar los espectros de absorción y comparar su variabilidad en la forma $a_{phn/440}$ entre estaciones del GM, se puede deducir la estructura principal de la composición taxonómica del fitoplancton. En este estudio, al nivel cercano a la superficie se generaron 33 curvas espectrales normalizadas (Figura 132a). Se procedió a analizar sus diferencias entre las curvas espectrales de absorción considerando entre los 440 a 550 nm (Figura 132 b), ya que en este intervalo de longitud de onda azul-verde se encuentra la mayoría de las clorofilas y carotenoides fotosintéticos; posteriormente se

utilizó un análisis estadístico para conjuntar y diferenciar las curvas entre sí (Macías-Carballo 2011). Los resultados indicaron que cercano a la superficie se detectaron dos formas espectrales ó curvas patrones, lo que significa que en la zona de estudio principalmente dominaron dos comunidades diferentes del fitoplancton (Figura 133 a y b). Al nivel de 50 m de profundidad se detectaron 32 curvas espectrales normalizadas (Figura 134a), los resultados indicaron que hubo cuatro formas espectrales ó curvas patrones, lo que significa que en la parte suroeste del GM dominaron principalmente cuatro comunidades del fitoplancton (Figura 133 c, d, e, f).

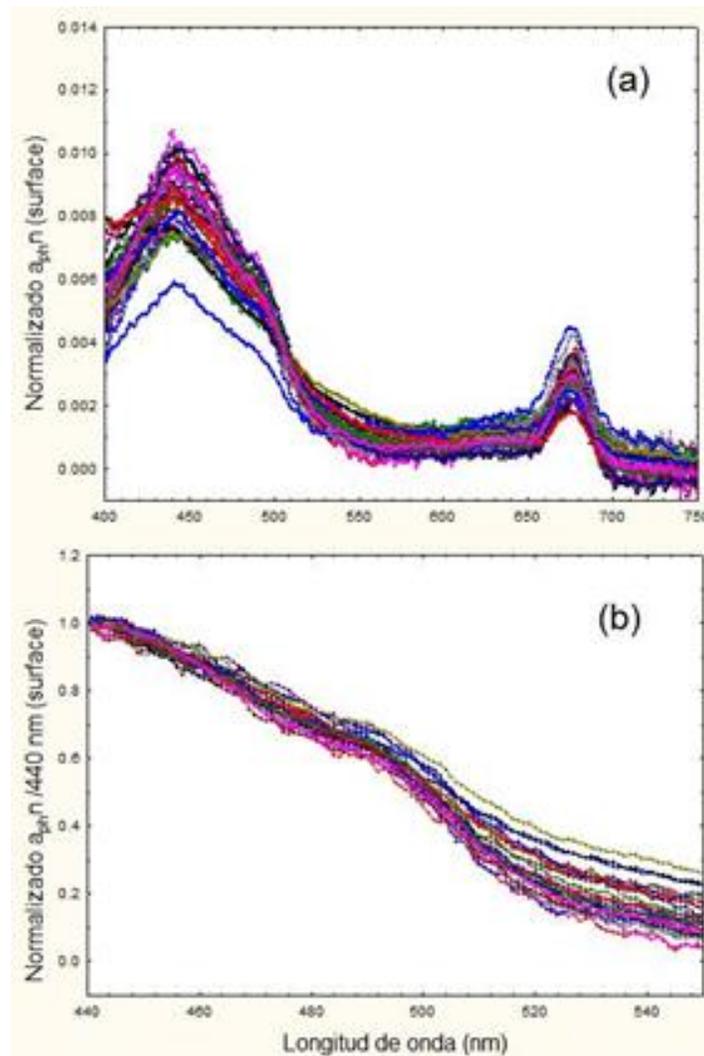


Figura 132. Conjunto de curvas espectrales normalizadas en muestras recolectadas en superficie durante el crucero oceanográfico XIXIMI-3 (19 de febrero al 10 de marzo del 2013): a) a_{phn} y b) $a_{phn}/440 \text{ nm}$.

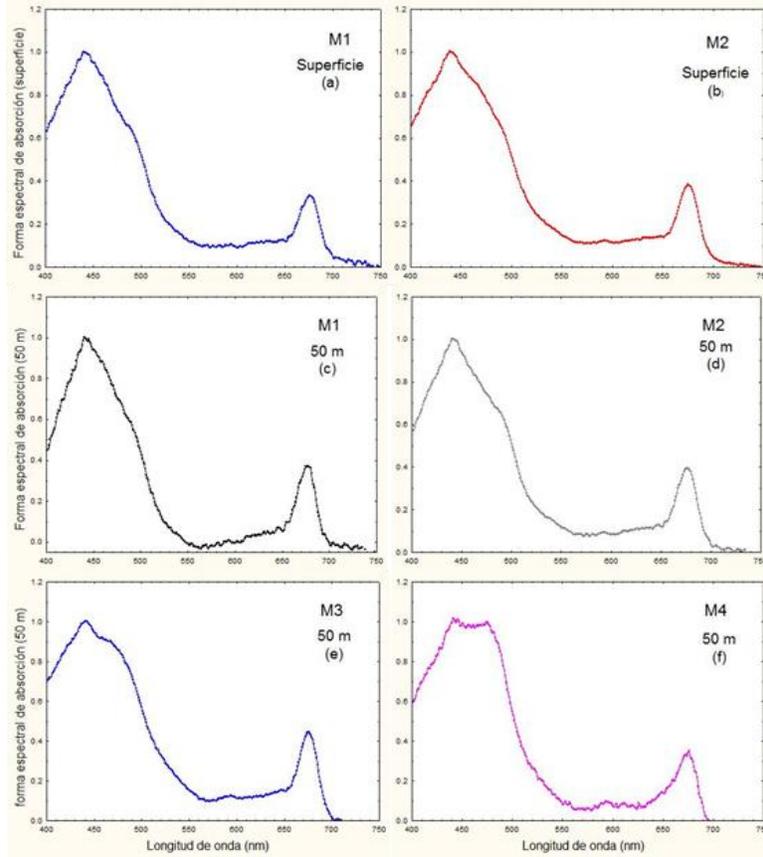


Figura 133. Curvas patrón ó forma espectral normalizada $a_{phn/440}$ en muestras recolectadas durante el crucero oceanográfico XIXIMI-3 (19 de febrero al 10 de marzo del 2013): a y b) superficie y c, d, e, f) a 50 m.

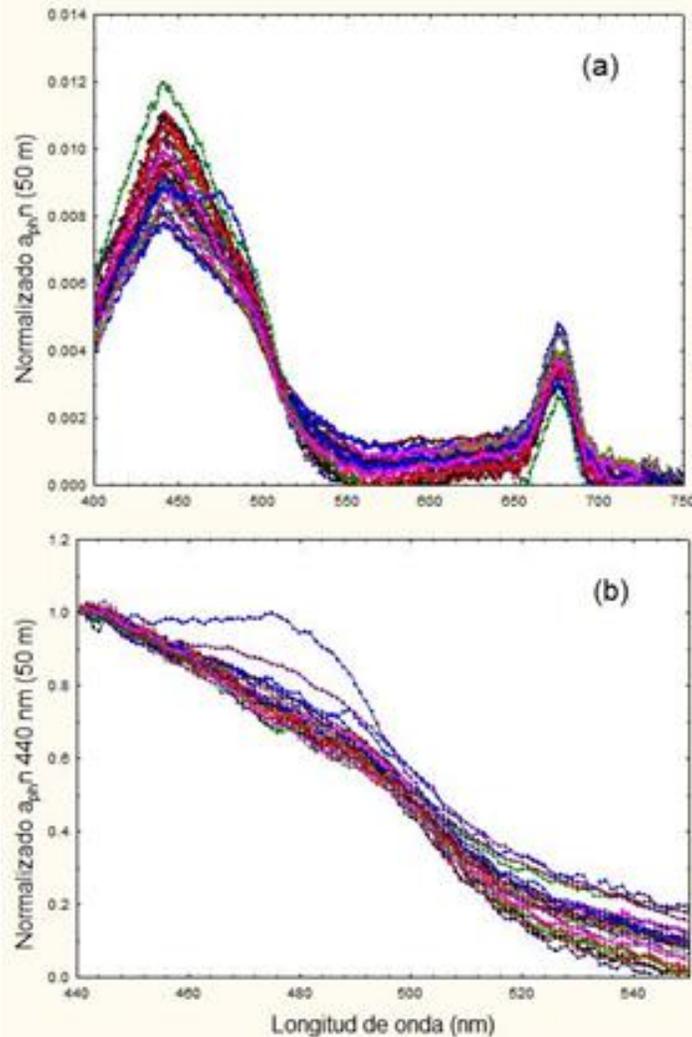


Figura 134. Conjunto de curvas espectrales normalizadas en muestras recolectadas a 50 m durante el crucero oceanográfico XIXIMI-3 (19 de febrero al 10 de marzo del 2013): a) a_{phn} y b) $a_{phn}/440$ nm.

Distribución espacial de la biogeografía del fitoplancton asociada a la forma espectral ($a_{phn}/440$) en superficie y 50 m

Se observó en este estudio, que la distribución espacial biogeográfica del fitoplancton a un nivel cercano a la superficie estuvo principalmente dominado por dos comunidades (Figura 135a): la primera comunidad (M1) dominó casi en su totalidad hacia la parte norte del área de estudio, así como en la región suroeste del GM; mientras que la segunda comunidad dominó muy cerca de la plataforma frente a Tamaulipas (estación E15) en la región de la desembocadura del río Soto de Marina, asimismo lo manifestó la estación E47 ubicada al noroeste de Yucatán. La distribución espacial biogeográfica del fitoplancton a los 50 m de profundidad mostró cuatro principales comunidades del fitoplancton distribuidos a lo largo del área de estudio (Figura 135b): las dos primeras

comunidades (M1 y M2) dominaron casi en su totalidad la region del GM, mostrando la forma espectral M1 un dominio hacia la región central y norte con trayectoria este-oeste del área de estudio; mientras que la M2 dominó casi en su totalidad la región de la plataforma en dirección norte y suroeste del área de estudio. La forma espectral M3 se detectó en la estación E23 al norte de Yucatán y la estación E40 al sur de Veracruz.frente a la zona de descargas de los ríos Papaloapan y Coatzacoalcos.

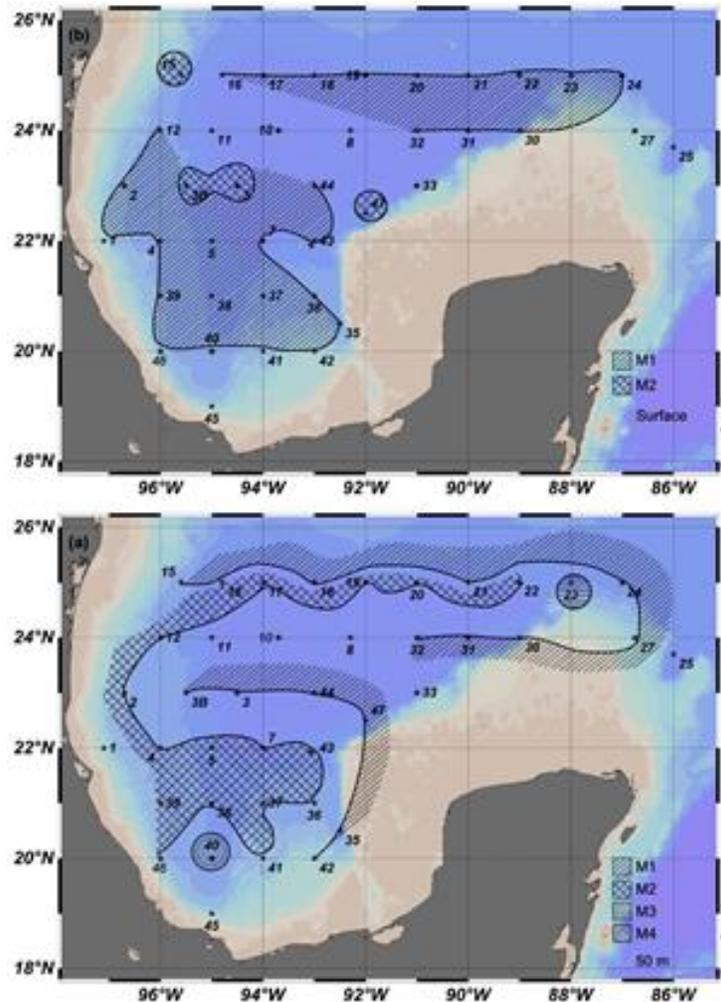


Figura 135. Distribución biogeográfica de fitoplancton. a) superficie y b) 50 m.

Referencias

Biggs, D.C. 1992. Nutrients, plankton, and productivity in a warm-core ring in the Western Gulf of Mexico. *J. of Geophysical Research: Oceans*, 97: 2143-2154.

- Cleveland J.S. 1995. Regional models for phytoplankton absorption as a function of chlorophyll *a* concentration. *Journal Geophys. Res.* 100 (7): 13333.
- Gilbes, F., C. Tomas, J.J. Walsh, and F.E. Muller-Karger. 1996. An episodic chlorophyll plume on the West Florida Shelf. *Continental Shelf Res.* 16, 1201-1224.
- Holm-Hansen, O., and B. Riemann. 1978. Chlorophyll a determination: improvements in methodology. *Oikos*, 30: 438-447.
- of chlorophyll *a* concentration. *Journal Geophys. Res.* 100 (7): 13333.
- Kiefer D.A., Mitchell B.G. 1983. A simple, steady state description of phytoplankton growth based on absorption cross section and quantum efficiency. *Limnol. and Oceanogr.* 28: 770-776.
- Kishino M., Takahashi N., Okami N., Ichimura S. 1985. Estimation of the spectral absorption coefficients of phytoplankton in the sea. *Bull. Mar. Sc.* 37: 634-642.
- Lohrenz, S.E., M.J. Dagg, T.E. Whitledge. 1990. Enhanced primary production at the plume /oceanic interface of the Mississippi River. *Continental Shelf Res.* 639-664.
- McPherson, B.F., R.T. Montgomery, and E.E. Emmons, 1990. Phytoplankton productivity and biomass in the Charlotte Harbor estuarine system, Florida. *Water Resources Bulletin*, 26(5): 787-800.
- Millán-Núñez, E., M.E. Sieracki, R. Millán-Núñez, J.R. Lara-Lara, G. Gaxiola Castro, C.C. Trees. 2004. Specific absorption coefficient and phytoplankton biomass in the southern region of the California Current. *Deep-Sea Res. II*, 51, 817-826.
- Millán-Núñez, E., and R. Millán-Núñez. 2004. Specific absorption coefficient and phytoplankton community structure in the southern region of the California Current during January 2002. *Journal of Oceanography*, 66, 719-730.
- Morey, S.L., P.J. Martin, J.J. O'Brian, A.A. Wallcraft and J. Zavala-Hidalgo. 2003. Export pathways for river discharges fresh water in the northern Gulf of Mexico. *J. of Geophysical Research: Oceans*, 100 (C8):1978-2012.

- Muller-Karger, F.E., J.J. Walsh, R.H. Evans, and M.B. Meyer. 1991. On the seasonal phytoplankton concentration and sea surface temperature cycles of the Gulf of Mexico. As determined by satellites. *J. Geophys. Res.* 96 (C7), 12645-12665.
- Muller-Karger, F.E. 2000. The spring 1998 NEGOM cold water event: Remote Sensing evidence for upwelling and for eastward advection of Mississippi water (or: how an errant LC anticyclone took the NEGOM for spin). *Gulf of Mexico Science*, 1, 55-67.
- Morel A., Bricaud A. 1981. Theoretical results concerning light absorption in a discrete medium, and application to specific absorption of phytoplankton. *Deep-Sea Res.* 28: 1375-1393.
- Orter, P.B., R.L. Ferguson, S.R. Piotrowicz, L. Chesal, G. Berberian, and A.V. Palumbo. 1984. Biological consequences of hydrographic and atmospheric advection with Loop Current intrusion. *Deep-Sea Res.*, 31(9): 1101-1120.
- Platt T., Sathyendranath S. 1988. Oceanic primary production: Estimation by remote sensing at local and regional scales. *Sci.* 241: 1613-1660.
- Qian, Y., A-E-, Jochens, M.C. Kennicott, and D.C. Biggs. 2003. Spatial and temporal variability of phytoplankton biomass and community structure over the Continental margin of the NEGOM based on pigment analysis. *Continental Shelf Res.* 23: 1-17.
- Yentsch, C.S., and D.A. Phinney. 1989. A bridge between ocean optics and microbial ecology. *Limnology and Oceanography*, 34, 1694-1705.

ICTIOPLANCTON

Responsable: Dra. Sharon Herzka, CICESE

Participantes: Laura del Pilar Echeverri García (estudiante de Maestría), M en C Maria Reyna Barradas, Concepción Curiel Mondragón, M en C Alfonsina Romo Curiel, M en C Ignacio Romero

Antecedentes

El ictioplancton consiste de las fases tempranas del desarrollo (huevos y larvas) de los peces. Tanto la etapa embrionica (huevos) como la larvaria (desde la eclosión hasta el inicio de la etapa juvenil) se caracterizan por procesos durante los cuales hay cambios radicales en las características morfológicas, así como en la capacidad fisiológica, sensorial y natatoria. Estas etapas se caracterizan por el desarrollo de los sistemas nervioso, digestivo, y osmoregulatorio, entre otros, y culmina cuando el pez tiene las características y sistemas fisiológicos de un adulto con la excepción de la capacidad reproductiva. Las etapas embrionicas y larvarias están sujetas a procesos dispersivos por la baja capacidad motriz de las larvas, por lo cual la relación entre las zonas de desove y las corrientes influye sobre el éxito en su supervivencia. También se caracterizan por tasas de mortalidad altas y variables como consecuencia de la depredación, falta de alimento y condiciones ambientales desfavorables. La abundancia y supervivencia durante la etapa larvaria están relacionadas al éxito o fracaso en el reclutamiento de los peces, razón por la cual esta etapa del desarrollo ha sido sujeta de estudio por más de 100 años (ver revisión en Fuiman y Werner, 2002, Govoni et al. 2005).

Durante el derrame del pozo Macondo, hubo mucha preocupación sobre el posible impacto del petróleo sobre la comunidad de ictioplancton, particularmente en relación a especies de importancia comercial como el atún aleta azul. La preocupación se debía al traslape entre las zonas y temporadas de desove y la cobertura espacial del petróleo, y al efecto que la mortalidad crónica o aguda pudiese tener sobre el reclutamiento (ver por ejemplo, Muhling et al. 2012b y Rooker et al. 2012, 2013). Uno de los requisitos más importantes para evaluar el impacto del derrame sobre el ictioplancton era el contar con una línea base de la abundancia y características del ictioplancton.

La mayoría de los estudios sobre el ictioplancton del GM se han llevado a cabo en la región norte, particularmente sobre la plataforma o en la corriente del Lazo (i.e., Leak 1981, Richards et al. 1993, Lindquist et al. 2005, Hernández et al. 2010, Hernández et al. 2011, Muhling et al. 2012a, Carassou et al. 2012). En la Zona Económica Exclusiva (ZEE) de México, hay pocos estudios que hayan caracterizado la abundancia, distribución espacial y temporal y la estructura de la comunidad de larvas de peces marinos. Al igual que en EUA, la mayoría se ha enfocado en zonas costeras o sobre la plataforma (Sánchez-Velasco et al. 1996, Sanvicente-Añorve et al. 2000, Flores-Coto et al. 2009, Espinosa-Fuentes et al. 2013). Solo unos pocos incluyen algunas estaciones de muestreo en la zona de aguas profundas del GM (> 1000 m de profundidad, como se

define en este estudio). Por ejemplo, Sanvicente-Añorve et al. (2000) incluyeron en su estudio la zona este de la bahía de Campeche. Lamentablemente, no hay estudios publicados previos a este en el cual se reporten las abundancias estandarizadas y la estructura de la comunidad del ictioplancton en la zona de aguas profundas del golfo dentro de la ZEE mexicana.

En este estudio y en los previos, se caracterizó la abundancia de larvas de peces marinos a partir de muestras recolectadas durante XIXIMI-1, XIXIMI-2 y XIXIMI-3. Al contar con datos para tres épocas del año, en este informe se hace un comparativo de los resultados de los tres cruceros.

Objetivo

Evaluar la distribución espacial y la estacionalidad de la abundancia estandarizada de las larvas de peces recolectadas durante los cruceros oceanográficos XIXIMI-1 (otoño), XIXIMI-2 (verano) y XIXIMI-3 (invierno) de manera comparativa.

Metodología

Las muestras de ictioplancton se recolectaron haciendo arrastres oblicuos en la columna de agua con la red Bongo de 333 μm de luz de malla (ver sección de Zooplancton en este informe y el informe de crucero XIXIMI-3, Herzka et al. 2013). Los arrastres durante XIXIMI-1 se hicieron en su mayoría desde los 150 m de profundidad hasta la superficie, mientras que en XIXIMI-2 y XIXIMI-3 se hicieron desde los 200 m hasta la superficie. Las muestras fueron fijadas al recuperarse la red en formol al 4% tamponado. En el laboratorio, fueron separadas todas las larvas de cada una de las muestras y se calculó la abundancia estandarizada (individuos por 1000 m^{-3}) usando las mediciones del volumen filtrado de los flujómetros. El número de muestras recolectadas durante XIXIMI-3 fue menor como consecuencia de la pérdida de la red Bongo; en este crucero solo se cubrieron las estaciones de la región sur del área de muestreo.

Resultados

La abundancia promedio de las larvas de peces fue más alta durante XIXIMI-1 (590 ind 1000 m^{-3}) que durante XIXIMI-2 y XIXIMI-3 (441 y 316 ind 1000 m^{-3} , respectivamente, Tabla 23). Los valores mínimos y máximos de la abundancia de cada crucero y el coeficiente de variación (CV, calculado como la desviación estándar dividido por la raíz cuadrada de n) indicaron que la abundancia fue mucho más variable durante XIXIMI-1 que durante los otros cruceros.

Tabla 23. Promedio \pm desviación estándar de la abundancia estandarizada de larvas de peces capturadas durante los cruceros XIXIMI-1, XIXIMI-2 y XIXIMI-3. Se incluyen la abundancia mínima y máxima obtenida para cada crucero, el número de muestras que se procesó y el coeficiente de variación.

	Promedio \pm DE (Ind 1000 m ⁻³)	Mínimo (Ind 1000 m ⁻³)	Máximo (Ind 1000 m ⁻³)	n	CV
XIXIMI-1 (otoño)	590 \pm 843	136	5,254	42	143
XIXIMI-2 (verano)	441 \pm 310	143	1,413	39	70
XIXIMI-3 (invierno)	316 \pm 118	153	577	20	38

La distribución espacial del ictioplancton durante XIXIMI-1 tuvo valores muy altos en la zona este y cerca al talud de bahía de Campeche (donde se registraron valores de ca. 1500 hasta 5,254 ind 1000 m⁻³). La abundancia en el resto de la región de estudio fue mucho menor (< 500 ind 1000 m⁻³). Durante XIXIMI-2 también se encontraron valores relativamente altos (ca. 1400 de ind 1000 m⁻³) en algunas estaciones el este de la bahía de Campeche. A diferencia de XIXIMI-1, también hubo una alta abundancia en varias estaciones a lo largo del paralelo 25N. La abundancia de larvas capturadas bajo condiciones de invierno (XIXIMI-3) fue relativamente baja. Es importante considerar que la mayoría de las estaciones cubiertas durante ese crucero estaban dentro de la bahía de Campeche (Figura 136).

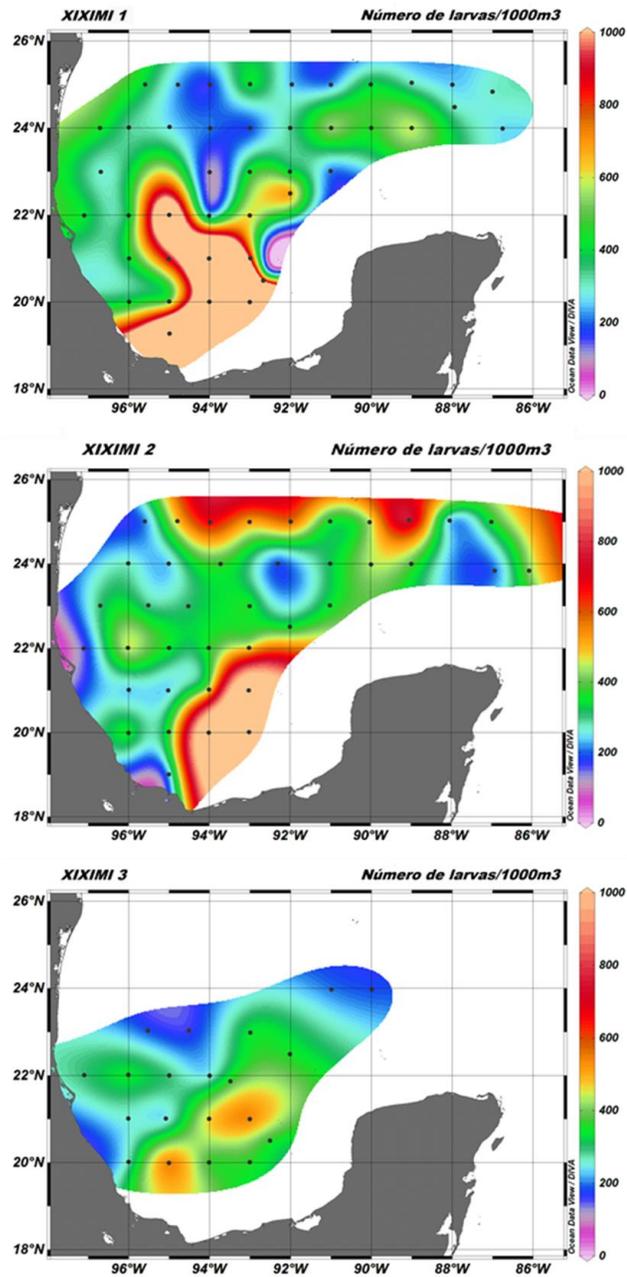


Figura 136. Abundancia estandarizada (ind 1000 m³) de larvas de peces durante los crueros oceanográficos XIXIMI-1 (otoño), XIXIMI-2 (verano) y XIXIMI-3 (invierno).

Discusión

En este estudio, se encontró una mayor abundancia promedio durante el otoño, seguido por el verano y el invierno. Son pocos los estudios que reportan las abundancias estandarizadas del ictioplancton en el GM (Tabla 24). Hernández et al. (2010) hicieron muestreos mensuales durante dos años en una sola estación sobre la plataforma de Alabama, EUA, localizada a 20 km de la costa. Se obtuvieron abundancias desde 520 larvas 1000 m^{-3} en enero hasta 24,830 larvas 1000 m^{-3} en agosto. La abundancia fue mayor en verano y primavera y menor durante el invierno, y el promedio anual fue de aprox. 10,000 larvas 1000 m^{-3} . A pesar de que ese estudio cubrió una región distinta, a grandes rasgos el patrón estacional que documentaron coincide con los de este estudio.

Sanvicente-Añorve et al. (2000) llevaron a cabo estudios de la ictiofauna en la bahía de Campeche, enfocándose en diferentes escalas espaciales y muestreando con una red bongo con luz de malla de $500\text{ }\mu\text{m}$. Encontraron la mayor abundancia de larvas en las zonas de influencia del sistema Grijalva-Usumacinta y cerca de la boca de la laguna de Términos. La estructura taxonómica de la comunidad varió en función de su cercanía a la plataforma, y se identificó una comunidad considerada como oceánica en la zona de aguas profundas de la bahía. En la zona oceánica, que es más relevante para fines comparativos con los resultados de este estudio, se observaron abundancias más altas durante el verano (200-1000 ind 1000 m^{-3}) que durante el invierno (150-450 ind 1000 m^{-3} ; Figura 137). Estos valores son similares a los estimados durante los cruceros XIXIMI (nótese que las abundancias de la Figura 137 están reportadas en unidades de ind 100 m^{-3}). Durante el verano, reportaron un pico de abundancia en el noroeste de la bahía de Campeche, en la zona en la cual por lo general se observa el giro anticiclónico. Es importante mencionar que la mayoría de las estaciones cubiertas en el estudio de Sanvicente-Añorve et al. (2000) estaban sobre la plataforma o el talud continental, y solo unas pocas estaciones en la zona de aguas profundas fueron cubiertas durante el invierno y el verano.

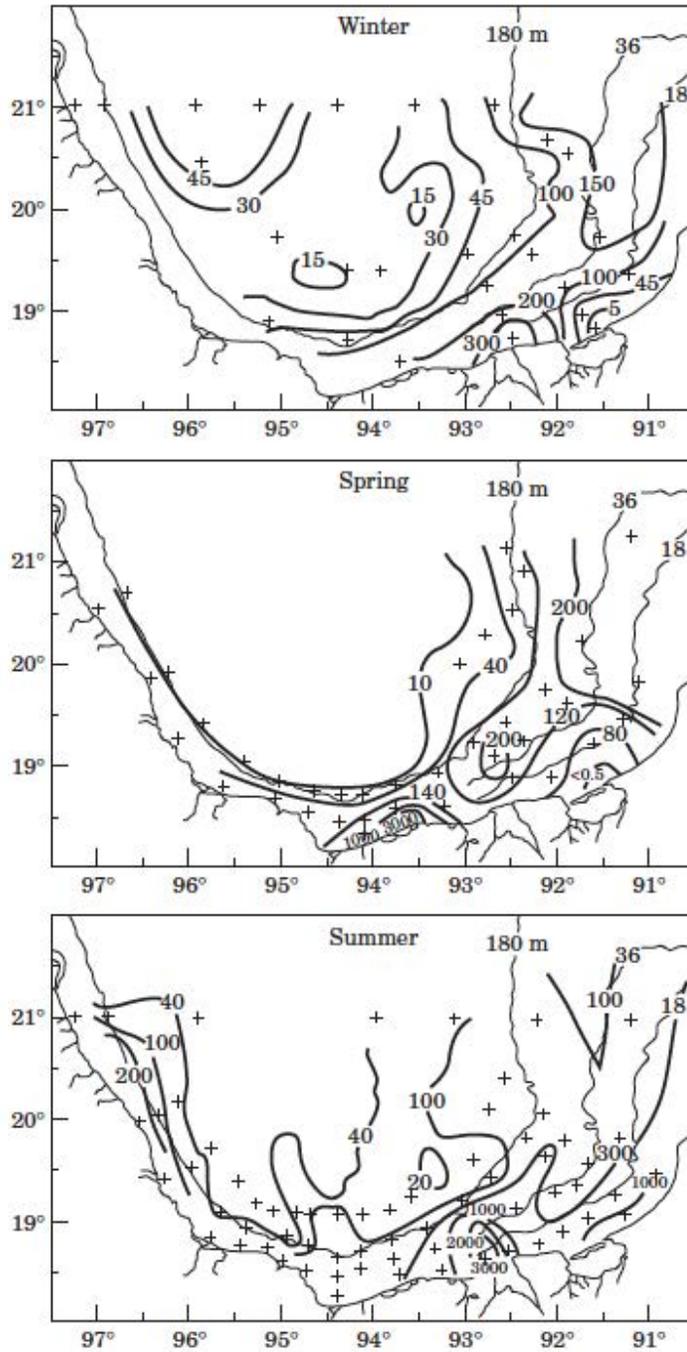


Figura 137. Abundancia estandarizada (ind 100 m⁻³) de larvas de peces recolectadas en el estudio de Sanvicente-Añorve et al. (2000). Las mayores abundancias se registraron cerca de la boca del sistema Grijalva-Usumacinta y en la boca de la laguna de Términos.

Espinosa-Fuentes et al. (2013) hicieron una evaluación estacional de larvas de peces en 1994-1995 en el sur del GM sobre la plataforma de Campeche y Tabasco,

abarcando estaciones hasta profundidades de 180 m. Sus arrastres cubrieron diferentes estratos verticales de la columna de agua con una red de 500 μm . Encontraron una mayor proporción de especies neríticas cerca de la superficie (0-18 m) y de la costa, mientras que predominaron las especies mesopelágicas a 45-105 m de profundidad en la columna de agua y en las estaciones de zonas más profundas. Sin embargo, no reportaron abundancias estandarizadas.

Tabla 24. Resumen de estudios de abundancia estandarizada ictioplancton en el GM.

ZONA	Abundancia mínima	Abundancia máxima	Fuente
	(número larvas 1000 m ⁻³)		
Región de aguas profundas	97	5,254	Este estudio (XIXIMI-1, XIXIMI-2, XIXIMI-3)
Plataforma norte (20 km de la costa de Alabama)	520	24,830	Hernandez et al. (2010)
Sur (Bahía de Campeche)	15	30,000	Sanvicente-Añorve et al. (2000)

La abundancia de larvas de peces es función de diversos procesos físicos, biológicos y ecológicos que operan en diferentes escalas temporales y espaciales. Estos incluyen la estacionalidad de las temporadas reproductivas, el tamaño de la población de adultos, la dirección y magnitud de las corrientes, la disponibilidad de alimento y los niveles de depredación. En este estudio, no se midieron estos factores. Sin embargo, las abundancias de las larvas son similares a las reportadas en los pocos estudios que hay hasta la fecha para la región oceánica del GM.

Conclusiones

- La abundancia de ictioplancton en el GM presenta variación a nivel estacional y espacial, siendo mayor durante el otoño y en la zona este de la bahía de Campeche.
- La variación espacial y temporal de la abundancia de ictioplancton coincide con lo documentado en otros estudios; para tener una comparación más robusta es necesario el muestreo durante la primavera en la región de aguas profundas de la ZEE mexicana, así como el registro de la abundancia en otras zonas dentro del GM como la región norte de aguas profundas y la corriente del Lazo.
- Las características físicas y oceanográficas de la bahía de Campeche pueden estar influyendo en la alta abundancia de ictioplancton, a través de

la relación de éstas con el comportamiento de desove y la supervivencia de huevos y larvas.

Recomendaciones

Es necesario obtener información de la abundancia de ictioplancton en la región de aguas profundas durante todas las temporadas del año en muestreos anuales, para complementar la información existente y reducir el efecto de cada año, de manera que pueda entenderse la variación temporal de manera robusta.

Para obtener un acercamiento a los factores que contribuyen a la variación del ictioplancton tanto espacial como temporalmente, es necesario analizar las características oceanográficas y evaluar la relación que existe entre éstas y la abundancia y diversidad de las larvas. Variables como la temperatura, salinidad, productividad primaria y alturas dinámicas, las cuales se vinculan con procesos de mesoescala, pueden influir en la distribución de las abundancias y de los taxones del ictioplancton, por lo que un análisis que integre estos factores aportará a explicar la variación observada.

Referencias

- Carassou, L., Hernandez, F. J., Powers, S. P., & Graham, W. M. (2012). Cross-Shore, Seasonal, and Depth-Related Structure of Ichthyoplankton Assemblages in Coastal Alabama. *Transactions of the American Fisheries Society*, 141(4), 1137–1150.
- Espinosa-Fuentes, M. de L. L., Flores-Coto, C., Zavala-García, F., Sanvicente-Añorve, L., & Funes-Rodríguez, R. (2013). Seasonal vertical distribution of fish larvae in the southern Gulf of Mexico. *Hidrobiológica*, 23, 42–59.
- Flores-Coto, C., Espinosa, M. D. L. L., Zavala, F. G., y Sanvicente, L.A. (2009). Ictioplancton del sur del Golfo de México: un compendio. *Hidrobiológica*, 19, 49–76.
- Fuiman, L. A., y Werner, R. G. (2002). *The unique contributions of early life stages*. Fishery Science. Oxford, Blackwell Science.
- Hernandez, F. J., Jr., Carassou, L., Muffelman, S., Powers, S. P., & Graham, W. M. (2011). Comparison of two plankton net mesh sizes for ichthyoplankton collection in the northern Gulf of Mexico. *Fisheries Research*, 108(2-3), 327–335.

- Hernandez Jr, F., Powers, S., & Graham, W. (2010). Seasonal variability in ichthyoplankton abundance and assemblage composition in the northern Gulf of Mexico off Alabama. *Fishery Bulletin*, 108(2), 193–208.
- Govoni, J. J. (2005). Fisheries oceanography and the ecology of early life histories of fishes: a perspective over fifty years. *Scientia Marina*, 69(S1), 125–137.
- Leak, J. C. (1981). Distribution and abundance of carangid fish larvae in the eastern Gulf of Mexico, 1971–1974. *Biological Oceanography*.
- Lindquist, D. C., Shaw, R. F., & Hernandez, F. J., Jr. (2005). Distribution patterns of larval and juvenile fishes at offshore petroleum platforms in the north-central Gulf of Mexico. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 62(4), 655–665.
- Muhling, B. A., Roffer, M. A., Lamkin, J. T., Ingram, G. W., Jr, Upton, M. A., Gawlikowski, G., et al. (2012a). Overlap between Atlantic bluefin tuna spawning grounds and observed Deepwater Horizon surface oil in the northern Gulf of Mexico. *Marine Pollution Bulletin*, 1–9.
- Muhling, B. A., Lamkin, J. T., & Richards, W. J. (2012b). Decadal-scale responses of larval fish assemblages to multiple ecosystem processes in the northern Gulf of Mexico. *Marine Ecology Progress Series*, 450, 37–53.
- Richards, W. J., McGowan, M. F., Leming, T., Lamkin, J. T., y Kelley, S. (1993). Larval fish assemblages at the Loop Current boundary in the Gulf of Mexico. *Bulletin of Marine Science*, 53(2), 475-537.
- Rooker, J. R., Simms, J. R., Wells, R. J. D., Holt, S. A., Holt, G. J., GRAVES, J. E., & Furey, N. B. (2012). Distribution and habitat associations of billfish and swordfish larvae across mesoscale features in the Gulf of Mexico. *PLoS ONE*, 7(4).
- Sánchez-Velasco, L., Flores-Coto, C., & Shirasago, B. (1996). Fish larvae abundance and distribution in the coastal zone off Terminos Lagoon, Campeche (Southern Gulf of Mexico). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 43(6), 707–721.
- Sanvicente-Añorve, L., Flores-Coto, C., & Chiappa-Carrara, X. (2000). Temporal and spatial scales of ichthyoplankton distribution in the southern Gulf of Mexico. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 51(4), 463–475.

ZOOPLANCTON

Responsables : Dr. Jaime Farber

Participantes : Concepción Curiel, Laura Echeverri

Antecedentes

La biomasa del zooplancton para la zona de estudio, no ha sido bien estudiada en el pasado López-Salgado y Suarez-Morales (1998) estudiaron la distribución de copépodos en aguas superficiales en la parte occidental del GM frente al estado de Tamaulipas; estos autores no presentan datos de biomasa.

Existen pocos estudios de la hidrología de la zona sur GM (particularmente de la zona profunda del GM) en comparación con el norte y oeste del GM. En esas zonas se presentan características muy diferentes frente al delta del río Mississippi, donde se ha documentado la presencia de hipoxia y anoxia estacional (Rabalais et al., 2002; Turner, 2001; Biggs, 1992; Biggs y Sanchez, 1997), lo que afecta la distribución del zooplancton (Turner y Allen, 1982a).

Objetivos

El objetivo principal de ésta parte del proyecto global es establecer una línea de base de las poblaciones de zooplancton presentes en la zona determinada (ver plan de estaciones), y relacionar ésta información con la hidrología de la zona de estudio, así como entender los cambios estacionales. Como primer objetivo se van a determinar las biomásas de zooplancton y como segundo objetivo, la composición taxonómica de las poblaciones presentes en la zona de estudio en la zona de aguas profundas del GM, incluyendo larvas de peces, para un total de 30 grupos taxonómicos.

Metodología

Se colectaron un total de 44 muestras durante la campaña oceanográfica XIXIMI-1 y el mismo número para el crucero XIXIMI-2. Las muestras fueron obtenidas con una red bongo. El marco de las redes utilizadas tiene una apertura de 80 cm, con 2 redes de diferente malla, de 333 μm y de 500 μm , cada una equipada con un flujómetro General Oceanics previamente calibrado. Para el crucero XIXIMI-1 la mayoría de los lances se llevaron a cabo desde los 150 m a la superficie, en forma oblicua, manteniendo un ángulo de 45° con el cable del winche. Para los cruceros XIXIMI-2 y XIXIMI-3 los lances fueron oblicuos hasta los 200 m, siendo el resto de la operación igual que para el crucero XIXIMI-1. Durante el crucero XIXIMI 3, las red bongo se perdieron por la rotura del cable del winche, y aunque se pudo conseguir otra red, el número de estaciones muestreadas, se redujera a 20. Durante todos los cruceros, las muestras de la red de malla de 333 μm fueron fijadas en formol al 4% tamponado con borato de sodio inmediatamente después

de su recolecta y posteriormente fueron analizadas para obtener los biovolúmenes y cuantificar la composición taxonómica del zooplancton por grandes grupos. Se identificaron un total de 30 grupos diferentes.

De la muestra total de la red de 333 μ m se obtuvieron los biovolúmenes por el método del volumen desplazado y obtuvieron sub-muestras con un fraccionador folsom para obtener muestras más pequeñas con el fin de llevar a cabo los conteos. En general, se analizó $\frac{1}{4}$ de la muestra completa excepto en el caso de las larvas y huevos de peces, para los cuales se extrajeron y contaron todos los organismos de la muestra total. El zooplancton se analizó bajo el microscopio para obtener su composición taxonómica por grandes grupos. La abundancia de zooplancton y los biovolúmenes se estandarizaron por 1000 m³ con base en las mediciones del volumen filtrado durante cada arrastre, utilizando los datos obtenidos por los flujómetros previamente calibrados antes del crucero. De la malla de 500 μ m se colectaron sub-muestras para isótopos estables, metales traza y bacterias; el resto se fijó en alcohol para estudios de genética (fuera del contexto del proyecto).

Resultados y discusión

Para el crucero XIXIMI 1, en noviembre del 2010, en general, los biovolúmenes y la abundancia fueron relativamente bajos, con la excepción de algunas estaciones cercanas a la plataforma, y en la zona sur del Golfo frente a Campeche (E38, E40, E42, E46), donde se registraron temperaturas relativamente bajas, salinidad baja y las más altas concentraciones de clorofila a (Figura 138 y Figura 139). Sin embargo, en el crucero XIXIMI 2, los biovolúmenes fueron mucho más elevados; estos se multiplicaron en promedio por un factor de 9.20 con respecto a XIXIMI-1.

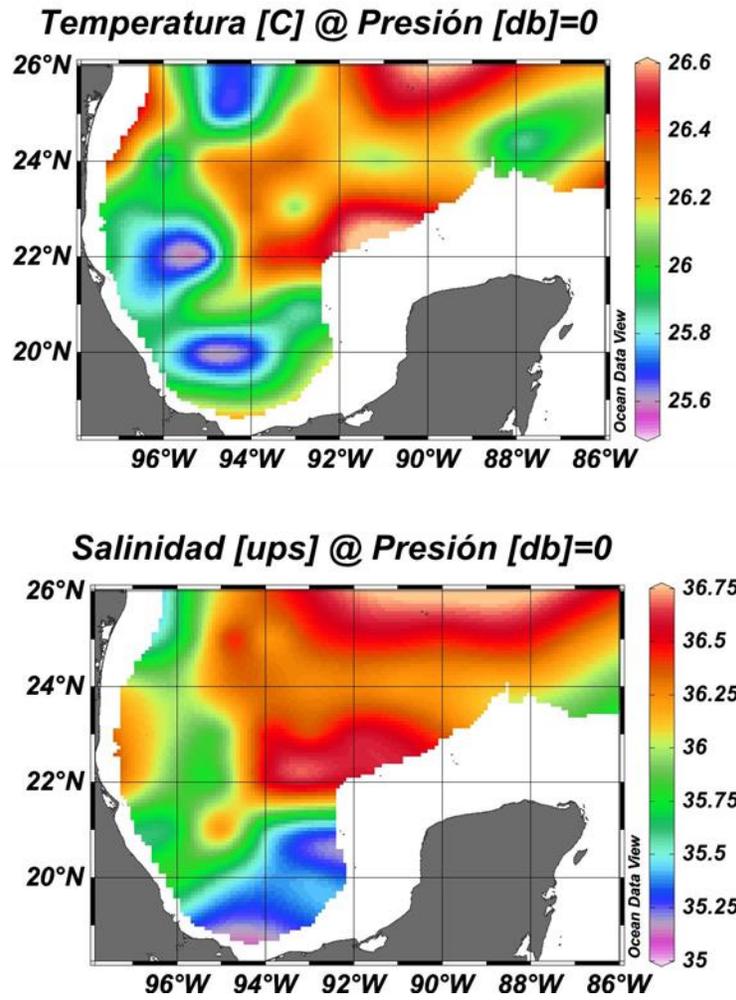


Figura 138. Temperatura a) y salinidad b) superficial de la zona de estudio durante el crucero XIXIMI 1 en el GM durante noviembre del 2010.

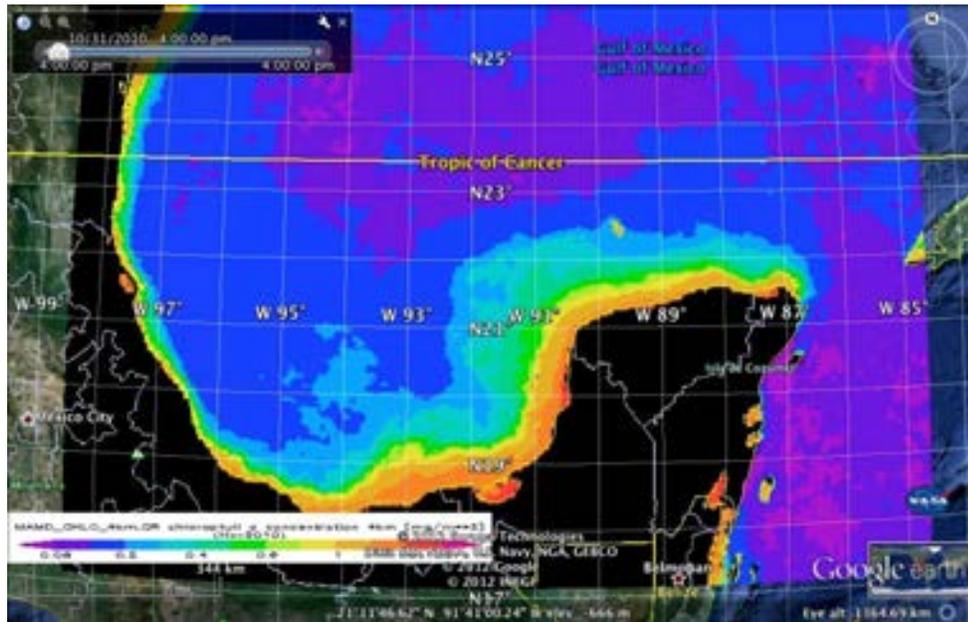


Figura 139. Concentración de clorofila-a en aguas superficiales del GM durante noviembre del 2010 (promedio mensual). La imagen fue generada con datos del satélite Aqua MODIS (resolución 4 x 4 km). Fuente: NASA (http://gdata1.sci.gsfc.nasa.gov/daac-bin/G3/gui.cgi?instance_id=ocean_month).

En la Tabla 25 se muestran los biovolúmenes del zooplancton recolectado durante las campañas oceanográficas XIXIMI-1, XIXIMI-2 y XIXIMI-3.

Tabla 25. Promedio \pm desviación estándar de los biovolúmenes del zooplancton recolectado durante las campañas oceanográficas XIXIMI-1, XIXIMI-2 y XIXIMI-3 en la zona de aguas profundas del GM.

Crucero	Media Bio-volumen ml 1000 m ⁻³ (n)
XIXIMI-1 (Noviembre 2010)	55.17 \pm 2.80 (44)
XIXIMI 2- (Julio 2011)	
Biovol (sin macrozooplancton)	274.28 \pm 15.59 (42)
Biovol (con macrozooplancton)	507.81 \pm 95.91 (42)
XIXIMI 3 (Febrero-Marzo 2013)	174.11 \pm 15.48 (20)

Este aumento tan importante en los biovolúmenes está relacionado, principalmente, con un "bloom" de salpas presente principalmente en la zona sur de muestreo. Si no se toma en cuenta las estaciones donde estuvieron presentes estos "blooms" de salpas, el biovolumen promedio es solo 4.97 veces más alto, aunque los

valores más altos siguen encontrándose en el sur de la zona muestreada frente a Campeche. La abundancia media de las salpas fue más alta en verano que en otoño (2197.14 ± 3234.16 y 375.72 ± 338.53 , respectivamente, aumenta por un factor de 5.84), y hubo una diferencia significativa entre las abundancias de los dos cruceros (Kruskall-Wallis, $H=24.73$ $P<0.001$ G.L.=43). No se encontraron salpas en invierno del 2013. Así mismo, los apendicularios pasaron de estar en el séptimo lugar en términos de abundancia promedio durante XIXIMI -1, al cuarto lugar de abundancia durante el crucero XIXIMI-2 y hubo una diferencia significativa entre los dos cruceros (H^2 , $87=13.52$, $P<0.001$). Las salpas y los apendicularios son consideradas oportunistas, sobre todo las salpas, y su aumento en abundancia puede venir de las fuertes lluvias, presentes en la zona, antes y durante el crucero de verano (julio 2011). Es posible que haya habido un aporte más importante de nutrientes que se derivó en una más alta productividad primaria y secundaria. Tomando en cuenta el tamaño de estos animales, se entiende que los biovolúmenes aumenten tanto. Existe una diferencia significativa entre los biovolúmenes promedio de otoño y verano (Kruskall- Wallis: $H1,87= 7.829$, $p<0.05$), así como entre los biovolúmenes de otoño, verano e invierno ($H^2,107= 81.243$, $P<0.001$), si vemos en la Tabla 26, Tabla 27 y Tabla 28, las salpas no estuvieron presentes entre los primeros 7 grupos más abundantes en el crucero de otoño y paso a ser el quinto grupo en abundancias en el crucero de verano, y estuvieron ausentes en invierno, sin embargo, también en esas mismas tablas vemos que los copépodos pasaron de 53.43% a 64.14%, manteniéndose prácticamente iguales en invierno con un 63.20 % de dominancia, y existe, para la abundancia, una diferencia significativa, entre los tres cruceros ($H^2,107 =14.83$, $P<0.001$).

Tabla 26. Abundancias (total, media, error estándar y porcentaje de abundancia con respecto al total) de los diferentes grupos taxonómicos estudiados del crucero XIXIMI-1 (n=44 estaciones).

GRUPOS	Total individuos 1000 m ⁻³	Media (Ind1000m ⁻³)	Error Estándar (Ind1000m ⁻³)	%de abundancia
Amphipoda	22979.92	522.27	349.78	0.93
Appendicularia	45769.29	1040.21	949.78	1.86
Bivalvia larvas	4269.51	99.29	99.47	0.17
Brachiopoda	697.97	16.62	28.30	0.028
Briozoa larvas	856.07	20.38	50.50	0.035
Caprilidaceos	40.36	0.98	4.41	0.002
Cephalopoda larvas	1005.33	22.85	26.38	0.041
Chaetognata	325278.17	7392.69	3287.68	13.22
Cirripedia larvas	153.26	3.74	9.70	0.006
Cladocera	405.65	9.89	23.20	0.017
Copepoda	1314719.41	29879.99	12052.39	53.43
Ctenophora	60.35	1.47	5.31	0.002
Decápoda	8660.37	196.83	167.13	0.35
Decápoda larvas	16477.83	383.20	327.68	0.67

Tabla 26, continuación.

Doliolida	21597.96	490.86	307.28	0.88
Echinodermata larva	22913.52	520.76	442.85	0.93
Euphausiacea	77820.18	1768.64	898.21	3.16
Foraminiferos	39047.80	887.45	1844.3	1.59
Gasteropodos larvas	1859.27	42.26	50.82	0.076
Heterópoda	3312.27	77.03	65.95	0.13
Isopodos	483.84	11.52	21.01	0.020
Medusae	5758.71	133.92	139.43	0.23
Misydaceos	635.06	15.49	30.02	0.026
Ostracoda	272117.63	6184.49	5611.89	11.06
Otras larvas inv.	1952.68	40.64	73.36	0.07
Piscis huevos	1380.96	32.12	39.81	0.06
Piscis larvas	25194.37	572.60	707.45	1.02
Polychaeta	25607.43	581.99	260.30	1.04
Polychaeta larvas	24682.13	560.96	1813.78	1.00
Pteropoda	96634.07	2196.23	1153.66	3.93
Radiolarios	1760.37	40.94	152.08	0.072
Salpida	16531.80	375.72	338.53	0.67
Siphonophora	79635.43	1809.90	713.57	3.24
Stomatopoda larvas	232.28	5.53	23.53	0.009
Total				100

Tabla 27. Abundancias (total, media, error estándar y porcentaje de abundancia con respecto al total) de los diferentes grupos taxonómicos estudiados del crucero XIXIMI 2 (n=40 estaciones).

GRUPOS	Total individuos 1000m-3	Media (Ind. 1000 m3)	Error estándar (Ind. 1000m3)	% de abundancia
Amphipoda	36052.83	924.43	887.33	1.11
Appendicularia	119755.20	3070.65	2892.73	3.70
Bivalvia larvas	0.00	0.000	0.000	0.00
Brachiopoda	31.12	0.80	4.984	0.00095
Briozoa larvas	3204.77	82.17	179.51	0.099
Caprilidaceos	0.00	0.00	0.00	0.00
Cephalopoda larvas	862.39	22.11	36.77	0.03
Chaetognata	315050.56	8078.22	5660.55	9.73
Cirripedia larvas	552.73	14.17	34.83	0.02
Cladocera	4263.44	109.32	237.41	0.13
Copepoda	2238221.02	57390.28	35190.80	69.14
Ctenophora	1170.84	30.02	64.38	0.04
Decápoda	12173.98	312.15	255.89	0.38
Decápoda larvas	2529.44	64.86	88.37	0.08
Doliolida	15098.54	387.14	395.68	0.47

Tabla 27, continuación.

Echinodermata larva	2659.02	68.18	205.19	0.08
Euphausiacea	82541.21	2116.44	1609.55	2.55
Foraminiferos	2789.99	71.54	256.74	0.09
Gasteropodos larvas	6746.34	172.98	247.52	0.21
Heterópoda	973.98	24.97	47.50	0.03
Isopodos	0.00	0.00	0.00	0.00
Medusae	25880.26	663.60	771.48	0.80
Misidaceos	3853.98	98.82	342.26	0.12
Ostracoda	142615.67	3656.81	2817.68	4.41
Otras larvas inv.	1657.54	42.50	134.40	0.05
Piscis huevos	988.83	25.36	32.29	0.03
Piscis larvas	17216.44	441.45	310.17	0.74
Polychaeta	23149.92	593.59	521.67	0.72
Polychaeta larvas	870.38	22.32	44.90	0.03
Pteropoda	2236.24	57.34	191.04	0.07
Radiolarios	2242.38	57.50	340.39	0.07
Salpida	85688.37	2197.14	3234.16	2.65
Siphonophora	84462.76	2165.71	1988.67	2.61
Stomatopoda larvas	1892.78	48.53	82.47	0.06
Total	3237432.95			101

Tabla 28. Abundancias (total, media, error estándar y porcentaje de abundancia con respecto al total) de los diferentes grupos taxonómicos estudiados del crucero XIXIMI-3 (n=20 estaciones).

GRUPOS	Total (Ind. 1000m ⁻³)	Media (Ind.1000 m ³)	Error estándar (Ind. 1000 m ³)	% de abundancia
Amphipoda	20671.5375	1033.58	168	1.413
Appendicularia	23159.6237	1158	191.54	1.583
Bivalvia larvas	0.00	0.00	0.00	0.00
Brachiopoda	526.8233	26.34	9.17	0.036
Briozoa larvas	631.3331	31.57	11.86	0.043
Cephalopoda larvas	585,4927	29.27	9.05	0.040
Chaetognata	152349.54	7617.48	1011	10.414
Cirripedia larvas	1316.37	65.82	48.31	0.090
Cladocera	0.00	0.00	0.00	0.00
Copepoda	924686.85	46234.34	6948.19	63.206
Ctenophora	1440,0518	72	26	0.098
Decápoda	6598.070	330	60.08	0.451
Decápoda larvas	0.00	0.00	0.00	0.00

Tabla 28, continuación.

Doliolida	14190.93	709.55	180.52	0.970
Echinodermata larva	4094.61	204.73	43.48	0.280
Euphausiacea	81481.24	4074	644.14	5.569
Foraminiferos	106.36	5.32	4.26	0.007
Gasteropodos larvas	0.00	0.00	0.00	0.00
Heterópoda	284.17	14.21	5.35	0.019
Isopodos	0.00	0.00	0.00	0.00
Medusae	4198.81	210	49.25	0.287
Misydaceos	127.70	6.39	4.1	0.0087
Ostracoda	89140.54	4457	629.22	6.093
Piscis huevos	6319.28	29.85	9.17	0.041
Piscis larvas	6319.28	316	26.48	0.432
Polychaeta	9205.35	460.27	71.69	0.630
Polychaeta larvas	0.00	0.00	0.00	0.00
Pteropoda	6099.27	305	46.71	0.417
Radiolarios	2734.87	136.74	32.84	0.187
Salpidae	0.00	0.00	0.00	0.00
Siphonophora	103510.58	5175.53	1123.45	7.07
Stomatopoda larvas	251.84	12.60	5.88	0.017
Tecosomata	7041.48	352	51.53	0.481
Total				100

Para XIXIMI-1, los siete grupos taxonómicos más abundantes constituyeron el 89.89% de la abundancia total. Otro grupo relativamente importante fue el de los poliquetos (1.04%) y el de las larvas de poliquetos (1.0%). Para el crucero XIXIMI-2, los 7 grupos más abundantes constituyen el 94.79% de la abundancia total. En relación con el primer crucero, se ve un aumento de las salpas y de los copépodos; estos últimos presentaron un aumento de 57% entre el otoño y el verano. En cuanto a las salpas éstas aumentaron 5.84 veces en abundancia, en verano con respecto al otoño, esto explicaría el aumento tan importante en los biovolúmenes (Tabla 29, Tabla 30 y Tabla 31)

Tabla 29. Grupos principales del zooplancton, del crucero XIXIMI 1 que componen el 89.89% de la abundancia del zooplancton recolectado en las zonas de aguas profundas del GM.

Grupo	Ind. 1000 m ⁻³	% Del Total
1.-Copépodos	29879.99 ± 12052.39	53.43
2.-Quetognatos	7392.69 ± 3287.68	13.22
3.-Ostrácodos	6184.49 ± 5611.89	11.06
4.-Pterópodos	2196.23 ± 1153.66	3.93
5.-Sifonóforos	1809.90 ± 713.57	3.24
6.-Eufásidos	1768.64 ± 898.21	3.15
7.-Apendicularios	1040.21 ± 949.78	1.86
		89.89

Tabla 30. Grupos principales del zooplancton, del crucero XIXIMI 2 que componen el 94.79% de la abundancia del zooplancton recolectado en las zonas de aguas profundas del GM

Grupo	Ind. 1000 m⁻³	% Del Total
1.-Copépodos	57390.28 ±35190.80	69.14
2.-Quetognatos	8078.22 ± 5660.55	9.73
3.-Ostrácodos	3656.81 ± 2817.68	4.41
4.-Apendicularios	3070.65 ± 2892.73	3.70
5.- Salpas	2197.14 ± 3234.16	2.65
6.- Sifonóforos	2165.71 ± 1988.67	2.61
7.- Eufásidos	2116.44 ± 1609.55	2.55
		94.79

Tabla 31. Principales grupos del zooplancton del crucero XIXIMI 3, que componen el 95.34% de la abundancia del zooplancton recolectado en las zonas de aguas profundas del GM.

Grupo	Ind. 1000 m⁻³	% Del total
1.-Copépodos	46234.34±6948.19	63.206
2.-Quetognatos	7617.48±1010.99	10.41
3.-Sifonóforos	5175.53±1123.45	7.07
4.-Ostrácodos	4457 ±629.22	6.09
5.- Eufásidos	4074.05±644.14	5.57
6.- Apendicularia	1157.98±191.54	1.58
7.-Anfípoda	1033.58±167.95	1.41
		95.34

Por otra parte, las abundancias de ostrácodos disminuyeron en verano, con respecto al otoño, pasando de 6184.49 ± 5611.89 en otoño a 3656.81 ± 2817.68 en verano subiendo a 4457 ± 629.22 en invierno, con un 11.06%, 4.41% y 6.09% del total respectivamente. Existe una diferencia significativa entre las abundancias de los tres cruceros (H^2 , $107=20.64$, $P<0.001$)

La abundancia de los 7 primeros grupos del zooplancton en el crucero XIXIMI 1 constituye el 89.89% del total, en el XIXIMI 2 es el 94.79%, y el 95.34% para el XIXIMI 3, los sifonóforos pasaron al tercer lugar de importancia, cuando en los cruceros 1 y 2, estaban en 5to y 6to lugar respectivamente. En verano hubo un aumento en la abundancia de ciertos grupos como los copépodos, las salpas y los apendicularios, las segundas ausentes durante el XIXIMI 3, pero otros están ausentes en verano, como las larvas de bivalvos, los isópodos y los caprilidaceos, otros disminuyeron en otoño, como las larvas de equinodermos y los foraminíferos, sin embargo, estos últimos no son muy eficientemente colectados, por las redes bongo, por su pequeño tamaño. Flores-Coto et al. (2009) describen la distribución de la biomasa zooplanctónica en la parte sur el GM. En su análisis de largo plazo, ellos concluyen que las biomasa zooplanctónicas son más altas en verano que en invierno, pero que esta tendencia se ha invertido en algunos años

(por ejemplo, 1994-1995) siendo más altas las biomásas en otoño e invierno que en verano. Sus resultados muestran valores similares a los encontrados por nosotros en noviembre del 2010. Sin embargo, sus estaciones son, en general, más costeras y estaban concentradas en la zona de la plataforma continental. Para el estudio taxonómico, López-Salgado y Suárez-Morales (1998) describen la abundancia de los copépodos frente al estado de Tamaulipas. Ellos deducen que la Corriente del Lazo influye en su distribución, presentándose también un gradiente costa-océano. En nuestros datos los valores más elevados estuvieron presentes, como ya se ha mencionado, frente a Campeche, presentándose en algunas estaciones valores de abundancia de más del doble que las estaciones adyacentes, esta tendencia se conserva en otoño pero con unos valores más elevados en verano, lo cual no coincide con lo que ellos dicen en relación al aumento reciente de las biomásas en otoño, sus resultados no pueden ser comparables a los nuestros dadas las diferencias en la zona de muestreo.

En la Figura 140, Figura 141, Figura 142 y Figura 143 podemos ver la distribución espacial de los 7 grupos principales del zooplancton del crucero XIXIMI 1.

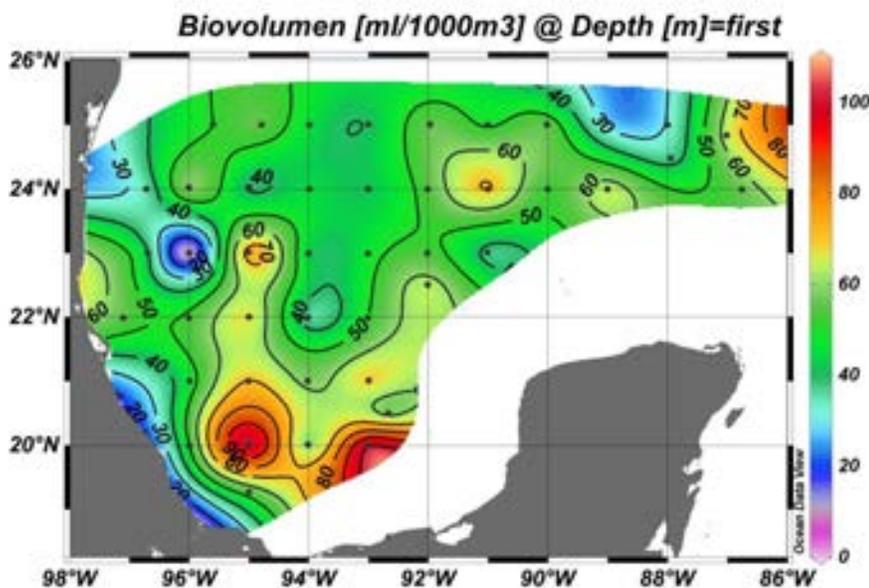


Figura 140. XIXIMI 1: Distribución de los biovolumenes del zooplancton en la zona de estudio (ml/1000 m³).

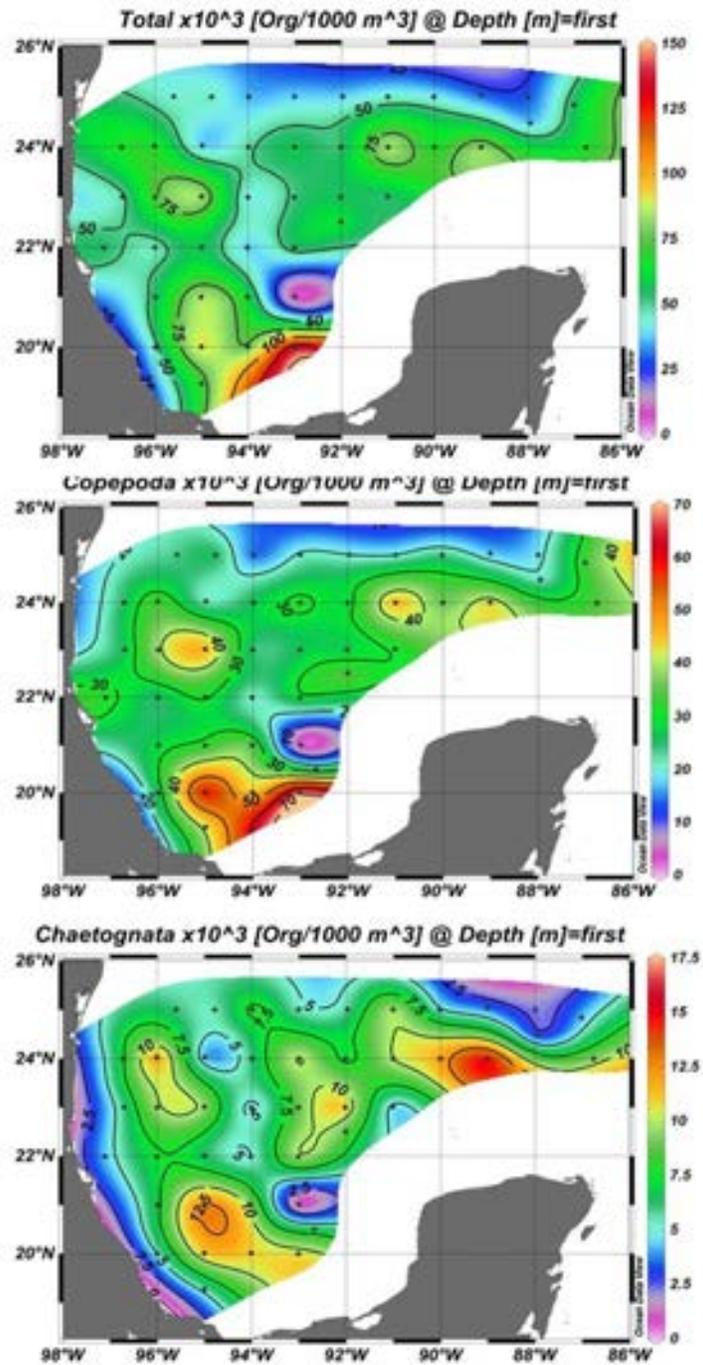


Figura 141. Abundancias XIXIMI 1. a) Total del zooplancton (ind/1000 m³), incluyendo los 30 grupos taxonómicos estudiados. b) Copépodos. c) Quetognatos.

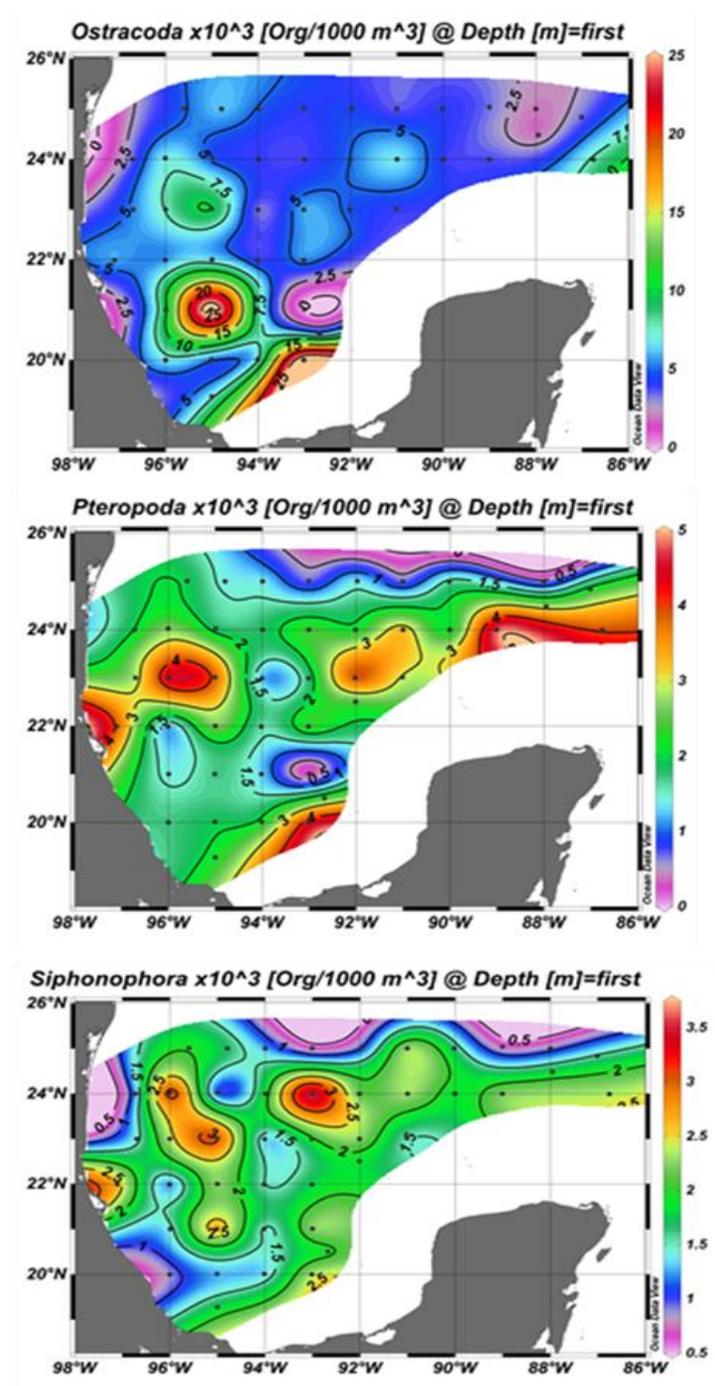


Figura 142. Abundancias de XIXIMI 1 a) Ostrácodos b) Pterópodos c) Sifonóforos.

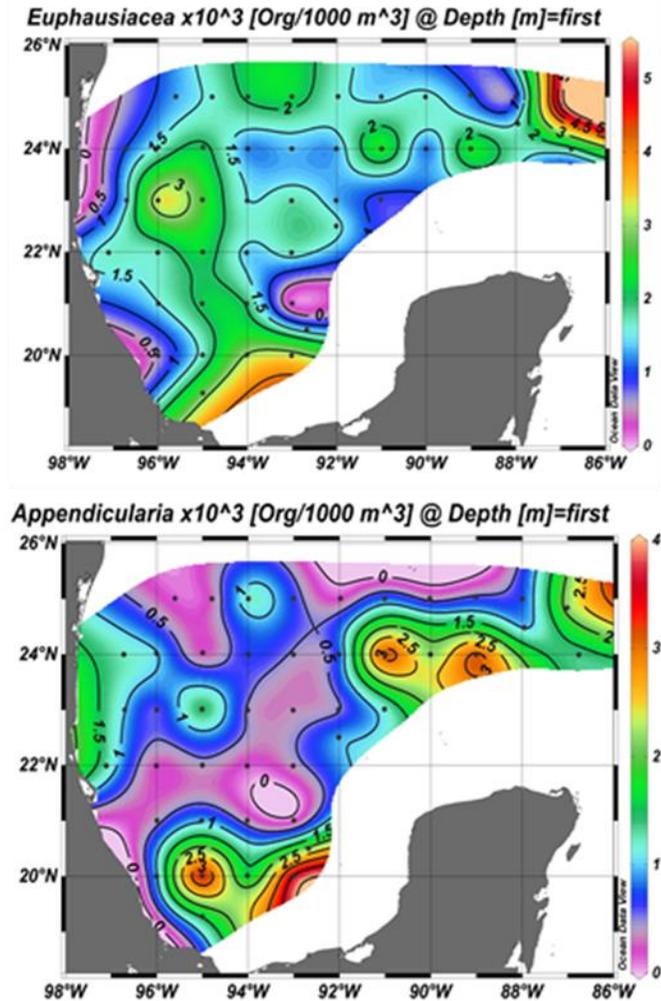


Figura 143. Abundancias de XIXIMI 1. a) Eufásidos. b) Apendicularios.

En la Figura 144, Figura 145, Figura 146, Figura 147 y Figura 148 podemos ver la distribución espacial de los 7 grupos principales del zooplancton del crucero XIXIMI 2. Para el XIXIMI 3, la distribución de los biovolúmenes del zooplancton se muestran en la Figura 149, las condiciones de temperatura y salinidad se muestran en la Figura 150 y las abundancias totales y los principales grandes grupos en la Figura 151, Figura 152 y Figura 153. Para XIXIMI 2, se presentan las figuras de biovolúmenes con macrozooplancton y sin macrozooplancton, ya que las diferencias tan grandes entre estaciones podrían ocultar las tendencias generales de la zona. Los grupos presentan variaciones en su distribución espacial, estos grupos representan en realidad fracciones muy inferiores de la muestra total, el segundo grupo en importancia, para el crucero XIXIMI 1 fueron los quetognatos con solo un 13.22% y para XIXIMI 2 fueron de nuevo los quetognatos, con solo el 9.73% del total, siendo para el crucero XIXIMI 3 solo el 10.41%. Sin embargo, siendo dominantes los copépodos, como ya se mencionó, éstos

muestran la misma tendencia, en su distribución espacial, que la abundancia total y los biovolúmenes del zooplancton.

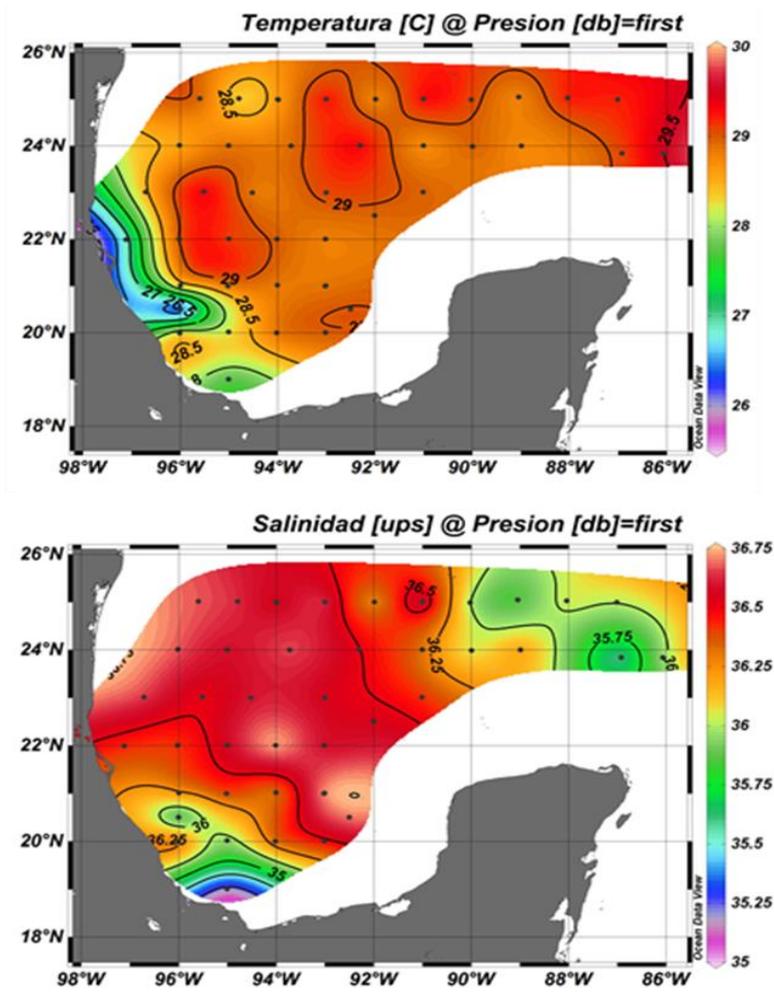


Figura 144. Temperatura y salinidad superficial de la zona de estudio durante el crucero XIXIMI 2 en el GM durante julio del 2011.

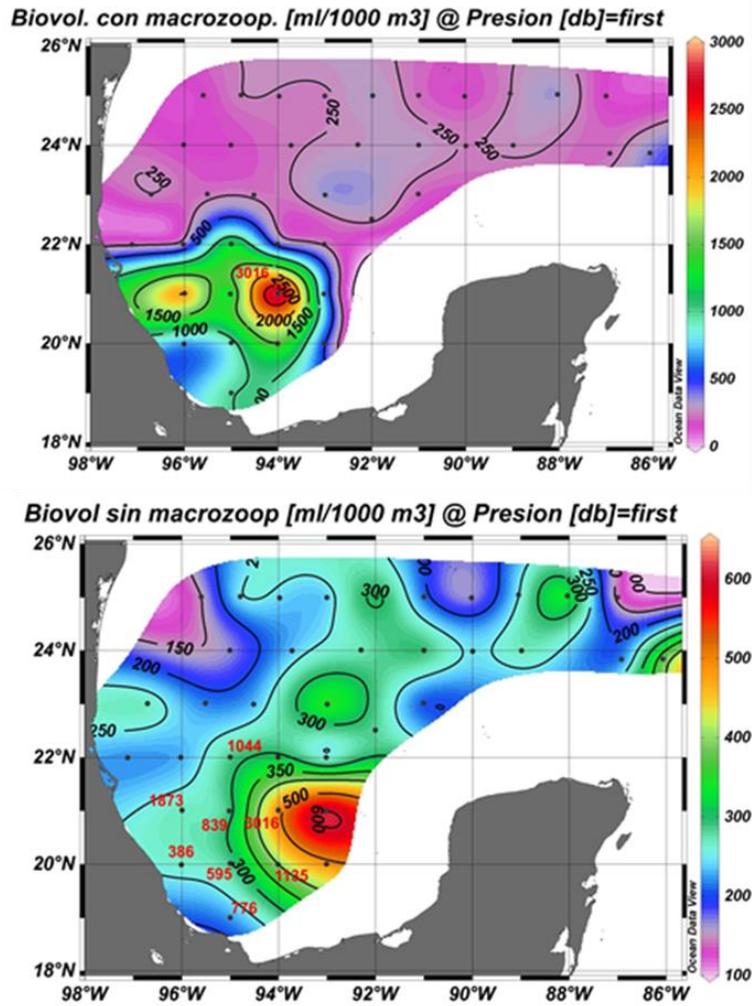


Figura 145. a) Biovolúmenes de zooplancton con macrozooplancton (en rojo el valor más alto). b) Biovolúmenes de zooplancton sin macrozooplancton (se sobreponen, en rojo, los valores, en mililitros, incluyendo el macrozooplancton).

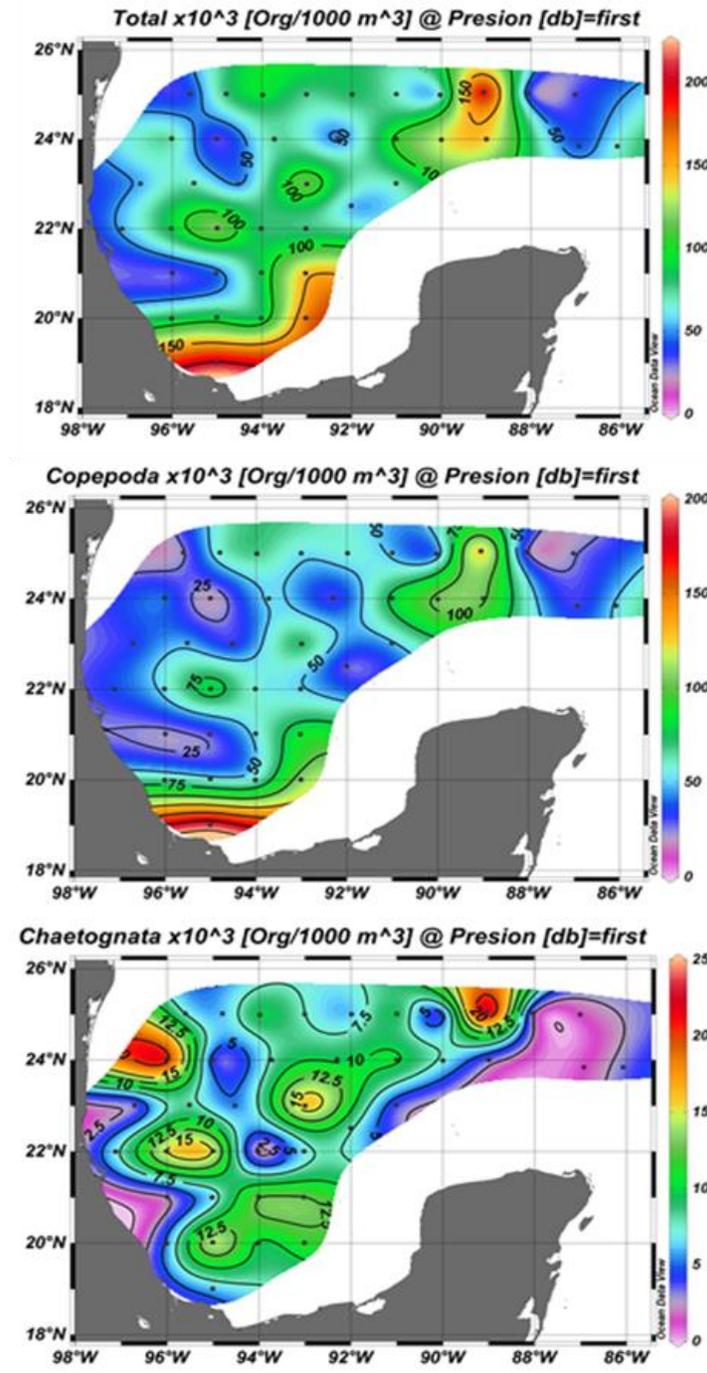


Figura 146. Abundancias del crucero XIXIMI 2. a) Abundancia total. b) Copépodos. c) Quetognatos.

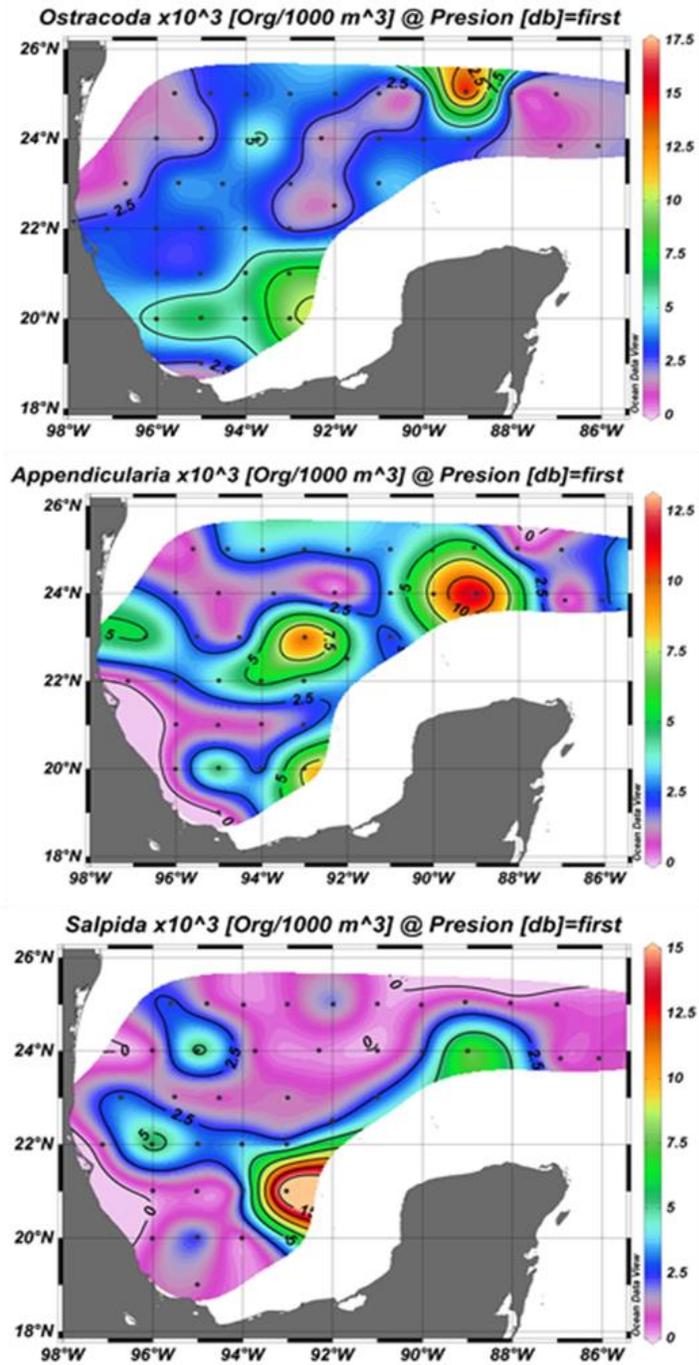


Figura 147. Abundancias de XIXIMI 2. a) Ostracoda. b) Apendicularia. c) Salpidae.

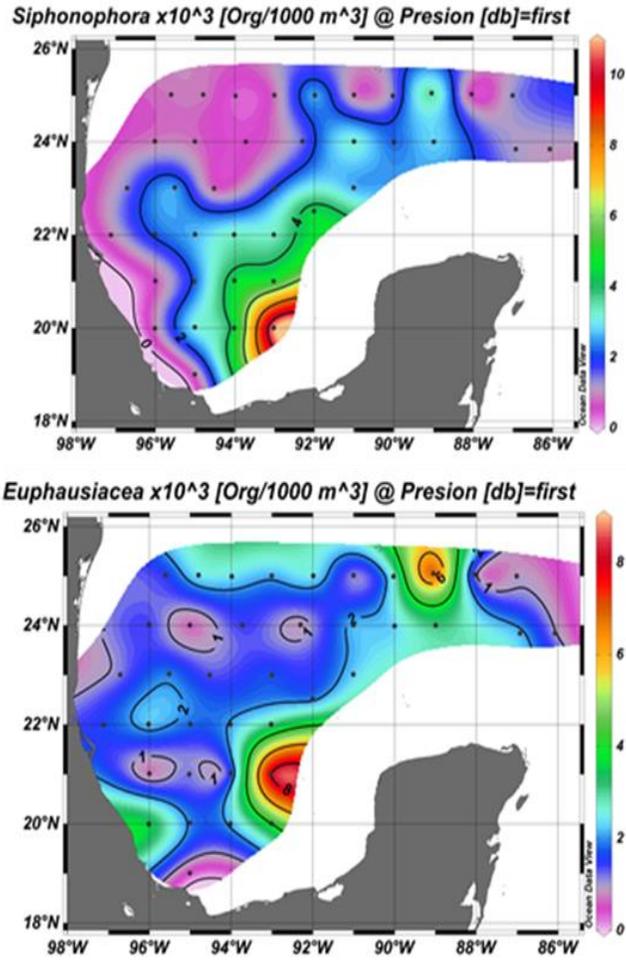


Figura 148. Abundancias de XIXIMI 2. a) Sifonóforos. b) Eufásidos.

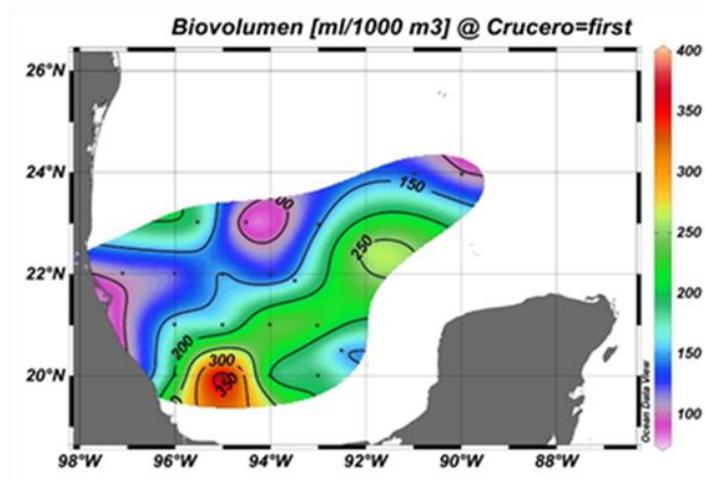


Figura 149. Distribución de los biovolúmenes del zooplancton del crucero XIXIMI 3.

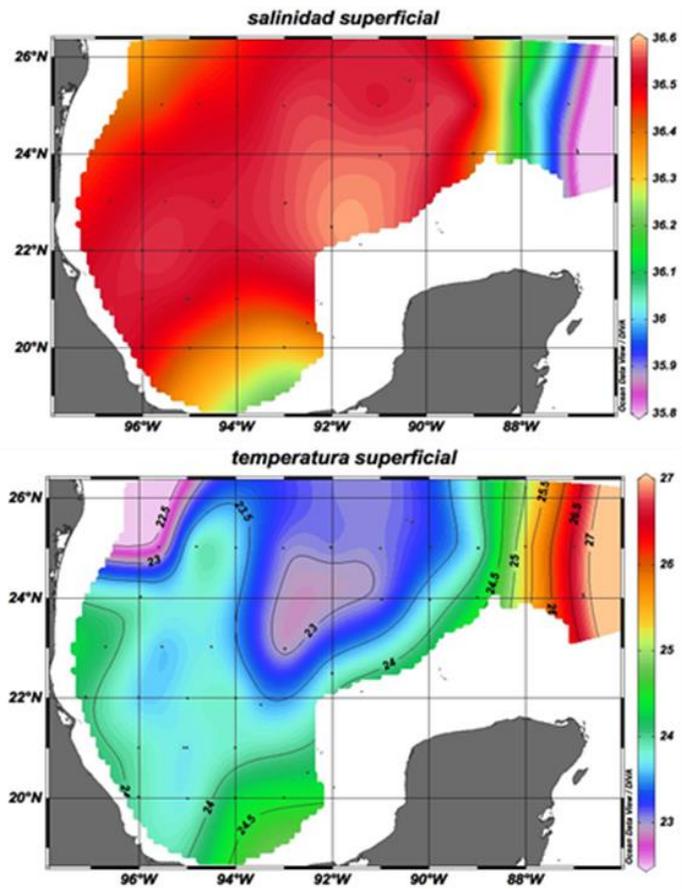


Figura 150. Salinidad y temperatura superficial durante el crucero XIXIMI 3.

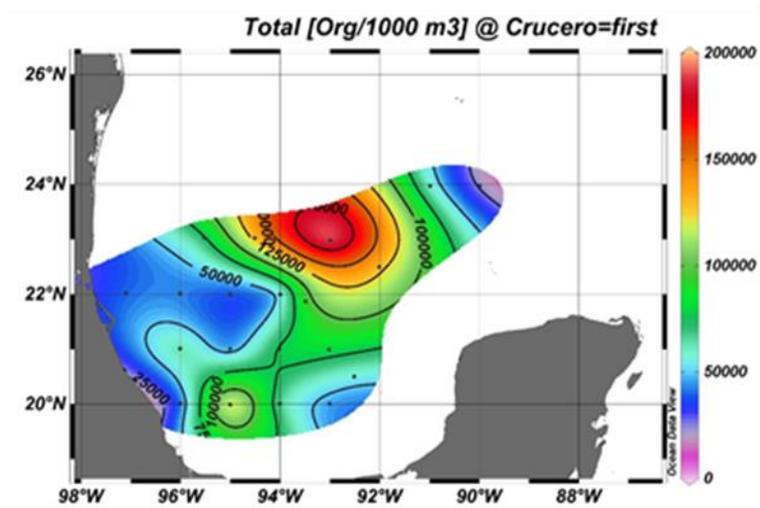


Figura 151. Distribución de la abundancia total del zooplancton del crucero XIXIMI 3.

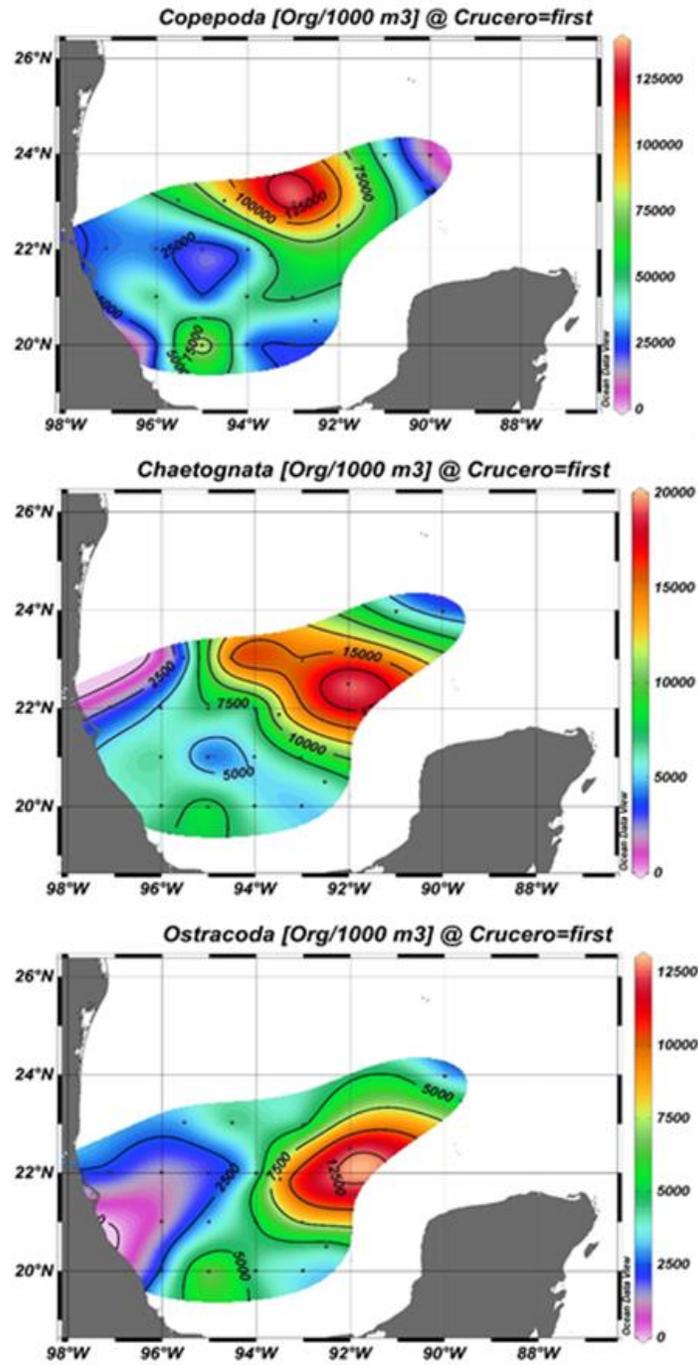


Figura 152. XIXIMI-3 a) Distribución de Chaetognata b) Copépodos c) Ostrácodos.

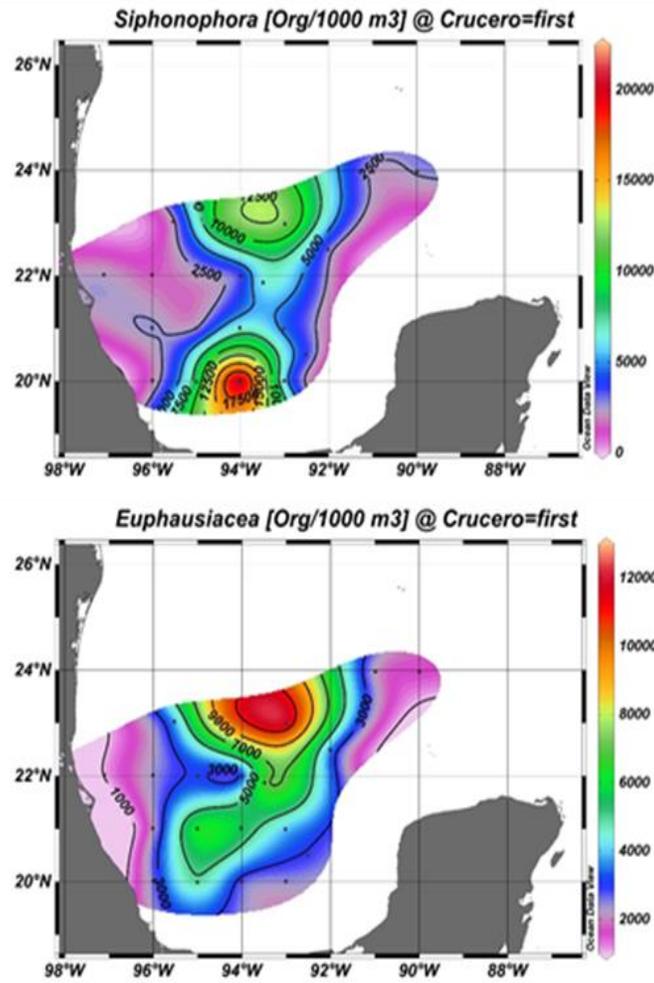


Figura 153. XIXIMI 3 a) Distribución de sifonóforos. b) Eufásidos

Conclusiones

Durante el otoño, la zona estudiada muestra temperaturas y salinidades un poco más elevadas en la zona norte y más frías y menos salinas en la zona sur, frente a Campeche y Veracruz. La imagen de satélite de la clorofila superficial, durante noviembre del 2010, muestra una coincidencia con esas condiciones físicas del medio (Fig. 4). Como ya se mencionó los valores encontrados son relativamente bajos y coinciden con los encontrados por Flores-Coto et al. (2009) para invierno, sin embargo las zonas no son coincidentes, su muestreo fue más costero, en aguas sobre la plataforma continental. Es importante resaltar que las mayores biomásas coinciden con los valores más elevados de clorofila, según lo muestra la imagen de satélite (Fig. 4). Esta zona podría estar enriquecida por los aportes continentales de los ríos presentes frente a dicha zona, en Campeche y Veracruz. En general, las abundancias totales más elevadas también estuvieron presentes en la misma zona sur. Así mismo, los copépodos, el grupo taxonómico más importantes tuvo el mismo patrón de distribución, así como otros grupos, como los ostrácodos, las larvas de peces y los eufásidos.

Durante el verano del 2011, por supuesto las temperaturas estuvieron más elevadas llegando a 30 grados en algunos lugares. Encontramos biovolumenes más elevados, estos fueron determinados principalmente por una mayor abundancia de salpas, las cuales debido a su gran tamaño representan un biovolumen considerablemente más elevado. Se observan patrones de distribución parecidos en verano y en otoño. Los copépodos presentaron un aumento considerable en su abundancia, en verano. Por otra parte algunos grupos disminuyeron en abundancia como los ostrácodos. Los cambios estacionales, en biomasa, parecen estar relacionados con las lluvias de verano con su aporte suplementario de nutrientes, que dan como resultado una más alta productividad primaria y secundaria.

Durante el invierno del 2013, el crucero XIXIMI 3, no se encontraron salpas. Sin embargo los biovolumenes más altos estuvieron en la misma zona, de la Bahía de Campeche. La presencia de un giro quasi-permanente, hace suponer que existe un mecanismo físico que incrementa la productividad durante gran parte del año (Perez-Brunius et al. 2013). Existe, por otra parte en la misma zona, un forzamiento de vientos paralelos a la costa que, debido a la forma semi-circular de la Bahía de Campeche, y a que soplan en direcciones opuestas, hace que en su parte central, las masas de agua fluyan hacia el noroeste (Martínez-Lopez y Zavala Hidalgo, 2009), esto aunado a las fuertes lluvias de verano, podría explicar este fenómeno de los "Blooms" de salpas y la más alta productividad durante todo el año, concentrada en la misma zona.

Recomendaciones

Sería deseable contar con una variable como la clorofila, simultáneamente durante el crucero, u otro indicador de condiciones tróficas para entender mejor cuales son los mecanismos que están determinando estas condiciones. El aporte de nutrientes a la zona de estudio podría ser otra variable muy importante a considerar. Otros cruceros durante otras estaciones del año, podrían aportar mayor información sobre los cambios estacionales.

Referencias

- Biggs, D. C., L. L., Sánchez (1997). Nutrient-enhanced primary productivity of the Texas-Louisiana continental shelf. *J. Mar. Sys.* 11:237-247.
- Biggs, D. C., (1992). Nutrients, plankton and productivity in a warm/core ring in the western Gulf of México. *J. Geophys. Res.* 97(C2): 2143-2154.
- Flores-Coto, M. L., Espinoza-Fuentes, F. Zavala-García, L. Sanvicente-Añorve. (2009) Ictioplankton del sur del Golfo de México. Un compendio. *Hidrobiol.* 19(1):49-76.
- Lopez-Salgado, I., E. Suarez-Morales (1998). Copepod assemblages in surface waters of the western Gulf of México. *Crustaceana.* 71(3) 312-330.

- Martínez-López, B., J. Zavala-Hidalgo. (2009). Seasonal and interannual variability of cross-shelf transports of chlorophyll in the Gulf of Mexico. *J. Mar. Sys.* 77, 1-20.
- Pérez-Brunius, P, P. García-Carrillo, J. Dubranna, J. Sheinbaum, J. Candela. (2013). Direct Observations of the upper layer circulation in the Gulf of Mexico. *Deep-Sea Res. II.* 85, 182-194.
- Rabalais, N. N., R. E. Turner, W. J. Wiseman. (2002) Gulf of Mexico hypoxia A.K.A. "The dead zone". *Ann. Rev. Ecol. Syst.* 33:235-263.
- Turner, R. E., (2001) Some effects of eutrophication on pelagic and demersal marine food webs In: Rabalais and Turner. *Coastal hypoxia: Consequences for living resources and ecosystems.* Am. Geophys. Union. 371-398.
- Turner, R. E., R. L. Allen. (1982) Plankton respiration rates in the bottom waters of the Mississippi river, delta bight. *Contr. Mar. Sci.* 25: 173-179.

Créditos

El M. C. Ignacio Romero-Vargas Márquez organizó todo el material para el crucero y la calibración de los flujómetros, José Luís Cadena llevó a cabo el análisis de las muestras de zooplancton y la determinación de las biomásas. El M.C. Cesar Almeda Jáuregui realizó las figuras de éste reporte. La Bióloga Concepción Curiel analizó las muestras de zooplancton y determinó las abundancias de los grupos taxonómicos y de las larvas y huevos de peces.

COMPOSICIÓN ELEMENTAL E ISOTÓPICA DE LOS SEDIMENTOS EN LOS TALUDES Y LLANURA ABISAL

Responsable: Dr. Juan Carlos Herguera, CICESE

Participantes: M. en C. Vicente Ferreira Bartrina, M en C. Cinthya Nava, Bertha Acosta, CICESE

Antecedentes

En esta trabajo colectamos muestras de sedimentos de los taludes y llanuras abisales del GM con el objetivo de caracterizar su geoquímica elemental y su composición isotópica para comprender la importancia de los procesos que controlan su abundancia y distribución y evaluar el posible impacto del derrame de hidrocarburos del pozo Macondo acaecido durante el verano del 2010 en esta región de aguas profundas. Los resultados de este estudio muestran la variabilidad de las abundancias relativas de carbono orgánico y su composición isotópica, carbonatos y del componente terrígeno en los sedimentos del talud continental y abisales del golfo, así como de sus tasas de sedimentación derivadas a partir de dataciones de radiocarbono 14. Utilizamos determinaciones de carbonatos, y análisis de portas frotis (smear-slides) para determinar los patrones de distribución de los carbonatos y terrígenos, así como la determinación del carbono orgánico, y su composición isotópica con el objetivo de caracterizar la importancia de los posibles controles de producción, transferencia y preservación de materia orgánica en la región de aguas profundas del GM al S del paralelo 25°N. Los resultados de este estudio muestran la variabilidad de las tasas de sedimentación que ayudan a explicar la distribución de los componentes lito- y biogénicos más importantes observados en los sedimentos del talud continental y abisales del golfo.

Se han publicado numerosos trabajos de investigación sobre múltiples aspectos de la sedimentología de la región norte del golfo, que abarcan desde transporte y dispersión de sedimentos (Coleman et al., 1991; Davies and Moore, 1970), a la mineralogía (Griffen, 1962), a las propiedades texturales como el tamaño de grano (Mazzulo. 1986), a las características acústicas y estructurales de los sedimentos (Bouma et al., 1990; Twichell et al., 1992), como a las distribuciones de metales (Trask et al., 1953; Huerta and Morse, 1992). La mayoría de estos trabajos destacan la importancia del flujo del río Mississippi, no solo para las plataformas cercanas (Doyle and Sparks, 1980; LeBlanc and Hodgson, 1959; Goldstein, 1942; Van Andel and Poole, 1960), sino para la zona del talud norte hasta la llanura abisal de Sigsbee (Bouma, 1972; Bouma et al., 1985; Davies and Moore, 1970). Sin embargo, para la región de aguas profundas y pie de talud al sur del paralelo 25°N la información que tenemos es aún muy fragmentaria.

Recientemente se han publicado un número importante de trabajos en los que se describen y explican los efectos que las fugas de hidrocarburos (Callender and Powell, 1992; Kennicutt and Brooks, 1990), troneras frías (Callender et al., 1992), sedimentos

asociado a gases (Anderson and Bryant, 1990), y piscinas de salmueras (MacDonald, 1992) tienen sobre los organismos bénticos y las características de los sedimentos asociados. Todos estos procesos ejercen un efecto marcado sobre la composición faunística y la naturaleza de los sedimentos, que a pesar de su restringida distribución espacial nos pueden servir de guía para evaluar el posible impacto del derrame en sedimentos profundos.

Desde los trabajos clásicos de hace 60 años, fundamentados en aproximaciones estratigráficas, se han estimado tasas de sedimentación en las zonas de talud a la llanura abisal de Sigsbee entre 4 a 30 cm/Ka (Ewing et al., 1958; Burk et al., 1969; Huang and Goodell, 1970; Kennett and Huddleston, 1972; Kennett and Shackleton, 1975). Las tasas de sedimentación más bajas están generalmente localizadas sobre las llanuras abisales, mientras que las más elevadas se encuentran asociadas a sedimentos de los cañones submarinos que disectan los taludes de esta región donde los procesos de deslizamientos de ladera y deslaves son los procesos de sedimentación de mayor importancia. Después de estos trabajos clásicos son contadas las publicaciones recientes que retoman esta tarea. Dos de ellos están basados en el disminución exponencial del perfil del ^{210}Pb no soportado (definido como el total del ^{210}Pb menos el ^{210}Pb soportado por el ^{226}Ra) por debajo de la capa de mezcla superficial bajo la interfase agua-sedimento (Yeager et al. 2004, y Gordon y Goñi, 2004). Las estimaciones de estos trabajos hay que tomarlas como valores máximos debido a varias razones; entre las más importantes se encuentran el efecto que la macrofauna ejerce sobre los procesos de mezcla en los sedimentos superficiales, enriqueciéndolos en los radioisótopos utilizados e esos estudios y lo cual conlleva a posibles sobre-estimaciones de las tasas de sedimentación. Por otro lado, su vida media relativamente corta (22 a) en relación a las tasas de acumulación (cm/Ka) en el fondo proporcionan una perspectiva a escalas decadales a centenarias, e ignora procesos a escalas multicentenarias a milenarias, por lo que estas estimaciones están desviadas hacia las máximas tasas de acumulación. Otro trabajo más reciente (Santschi and Rowe, 2008) utilizan determinaciones de radiocarbono en materia orgánica y estima velocidades de sedimentación entre 3 a 15 cm/Ka en los sedimentos del talud y la llanura abisal al N del paralelo 25°N .

Área de estudio

El GM es una pequeña cuenca oceánica con una extensión de $1.5 \times 10^6 \text{ Km}^2$ y rodeada por continente excepto en dos umbrales el canal de Yucatán al SE y el estrecho de la Florida al NE por donde se intercambian las aguas del Caribe y Atlántico con las del golfo mientras que por el segundo estas aguas salen hacia el Atlántico norte.

Para caracterizar el contenido elemental de los sedimentos profundos del GM optamos durante las campañas XIXIMI por elegir varios lugares repartidos a lo largo de todo el recorrido, por un criterio de economía de tiempo. El objetivo a medio plazo es el de complementar espacialmente estos muestreos hasta alcanzar una cobertura espacial de al menos de $1^\circ \times 1^\circ$. Las muestras en esta última campaña XIXIMI-3 se colectaron sobre la llanura abisal y las zonas de talud, generalmente a profundidades entre los 2200 a los

3800m, complementando las que habíamos tomado en campañas anteriores XIXIMI-1 y XIXIMI-2 (Figura 154) (Tabla núcleos XIXIMI-1-2-3). En la campaña XIXIMI-3 se utilizó un multinucleador que básicamente consiste en una estructura con forma de araña de 6 patas con una estructura central a la que se aseguran mediante unas camisas de acero cilindros de policarbonato de 45 cm de longitud y un diámetro de 9.5 cm al final de cada uno de los 6 brazos de la estructura. Cuando el multinucleador aterriza sobre el fondo marino el peso de esta estructura central fuerza la caída de la estructura central facilitando la penetración de los cilindros de policarbonato en los sedimentos. A medida que los 6 núcleos penetran por debajo de la interfase agua-sedimento un mecanismo interno situado en el eje central de la estructura topa sobre el sedimento y acciona el mecanismo disparador que libera las tapas de los nucleadores para cerrar los cilindros por su base. Cuando el cabestrante del barco comienza a cobrar la cuerda a la que está conectada el nucleador, este movimiento levanta los cilindros de policarbonato dejando que las tapas inferiores puedan cerrar los tubos por la base apresando los sedimentos durante su viaje ascendente por la columna de agua. Una vez recuperado el multinucleador por el marco de popa se asegura sobre la cubierta para desmontar las camisas de policarbonato que nos permita su posterior manipulación individual de cada uno de los subnúcleos recuperados. Para una descripción en mayor detalle de su funcionamiento recomendamos consultar el reporte de la campaña XIXIMI-2 (Herguera et al., 2011).

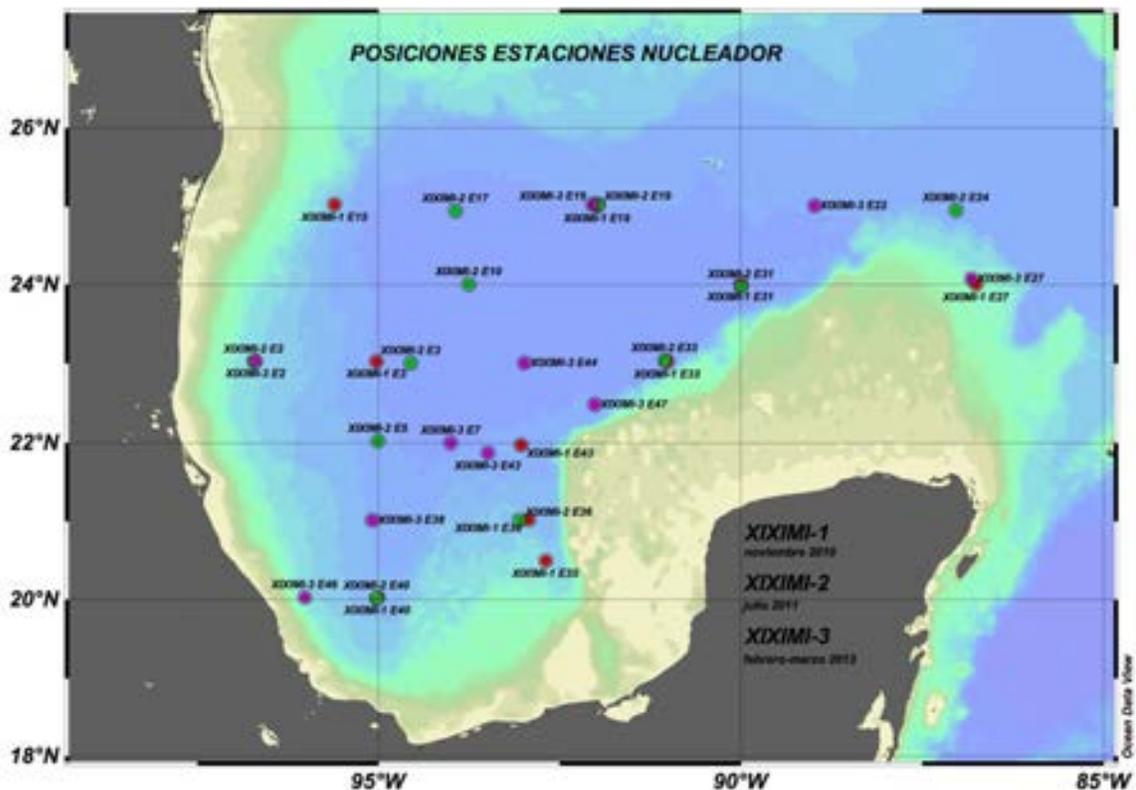


Figura 154. Mapa de localización de las estaciones en las que se colectaron núcleos de sedimentos para este reporte durante las campañas XIXIMI-1 y XIXIMI-2 y XIXIMI-3.

Los subnúcleos se muestrearon breves horas después de llegar a cubierta en segmentos cilíndricos perpendiculares al eje vertical del núcleo, generalmente los primeros 5 cm se muestreaban con resolución centimétrica y a partir de ese nivel cada 2 cm. Las muestras de sedimentos se mantuvieron congeladas hasta su posterior liofilización en el laboratorio. Reportamos los resultados de las distintas variables analizadas, incluyendo los contenidos relativos de carbono orgánico, carbonatos y sedimentos litogénicos de los primeros 10 cm del sedimento para evaluar hasta que punto la profundidad de la capa de mezcla afecta al contenido elemental de los núcleos, ya que a mayores profundidades nos encontramos con el registro geológico al que ya no afectan los procesos actuales de sedimentación en el fondo. En general para todos los núcleos se realizaron determinaciones de radiocarbono ^{14}C analizando el primer cm de la columna de sedimento y entre 4-6 cm por debajo de la interfase con el objetivo de capturar la profundidad de la capa de mezcla.

Objetivos

1. Cartografiar la distribución del contenido elemental de carbono orgánico e inorgánico y del componente litogénico de los sedimentos en la región de aguas profundas del GM al sur del paralelo 25°N con base en las determinaciones de carbonato y carbono orgánico para entender los controles de la sedimentación pelágica en esta región que nos permitan establecer la línea base de los patrones de la distribución de la sedimentación biogénica y litogénica.
2. Cartografiar la profundidad de la capa de mezcla por debajo de la interfase agua-sedimento y las tasas de acumulación de los sedimentos en la región de aguas profundas del GM al sur del paralelo 25°N derivadas de las determinaciones de radiocarbono ^{14}C para entender el control de las tasas de sedimentación sobre la preservación de los materiales de origen biogénico.
3. Evaluar el potencial impacto en los sedimentos profundos del GM como consecuencia de la oxidación de los hidrocarburos en muestras de sedimentos.

Metodología

Análisis de carbonatos

La metodología que utilizamos para las determinaciones del contenido de carbonatos en los sedimentos fue por coulometría. Con este fin utilizamos un coulómetro UIC Modelo 5014 CO_2 que proporciona determinaciones absolutas de carbonato en un flujo de gas controlado. El rango de detección se encuentra entre $0.01\mu\text{g}$ y 100 mg. La

celda de este coulómetro se llena con una solución propiedad de UIC que contiene monoetanolamina y un indicador colorimétrico del pH. En la celda se introducen unos electrodos de platino Pt –cátodo- y de plata Ag –ánodo. Ésta se coloca en el compartimento del coulómetro entre la fuente de luz y el fotodetector. A medida que el flujo de gas pasa por la celda, el CO₂ se absorbe cuantitativamente por medio de una reacción con la monoetanolamina para formar un ácido titulable. El ácido hace desaparecer la coloración indicadora de la solución que la celda fotoeléctrica monitorea y lo reporta como % de la transmitancia (%T). En paralelo al aumento de este porcentaje aumenta la corriente para la titulación de forma automática, lo que genera electroquímicamente la base con la que se neutraliza el ácido con una tasa proporcional al %T (aproximadamente 1500µg carbono/minuto). Cuando la solución retorna a su color original se detiene la corriente. La corriente de titulación se está midiendo continuamente, y como ésta es el agente titulador, no hay necesidad para la calibración de la muestra. Sin embargo para asegurarnos que la electrónica está trabajando adecuadamente todos los días antes de comenzar la corrida corremos un estándar de 100% calcita y entre las determinaciones de las muestras desconocidas intercalamos varios patrones internos del laboratorio que utilizamos para comprobar el correcto funcionamiento del coulómetro, así como para calcular la precisión interna de las determinaciones. A lo largo de todos los análisis que realizamos en los sedimentos de XIXIMI-1 la precisión interna fue de ±1%.

Análisis de frotis (smear slide)

Para el 1er cm de la columna de sedimentos utilizamos el frotis (smear-slide), método en el que se unta de sedimentos una lámina de cristal y se observa visualmente en el microscopio algunos de los caracteres texturales de los sedimentos y sus componentes. Estos se reportan como porcentajes y la nomenclatura adoptada es la utilizada por el Joint Ocean Deep Sea Drilling Project. Este es un análisis semicuantitativo que nos provee de información sobre la importancia relativa de los componentes bio- y litogénicos de los sedimentos.

Análisis de la composición de C orgánico y de su composición isotópica ($\delta^{13}\text{C}$)

Las muestras de sedimentos destinadas a este análisis se trataron previamente en el laboratorio de CICESE para disolver la fracción carbonatada de los sedimentos con la finalidad de que este componente no interfiriera con la medición de la composición isotópica del carbono orgánico. Se tomaron alícuotas de 150mg de sedimento previamente molido en tubos Falcon de base cónica de 50 ml. A cada uno de los tubos se añadieron 5ml de HCl al 10% y se dejaron reposar por 2 horas. Al cabo de este tiempo se agitó el sedimento con una espátula para comprobar que ya no había reacción y que la disolución del componente carbonatado había culminado. En los casos que se observaron burbujas, síntoma de una reacción incompleta, se volvió a realizar este primer paso hasta asegurarnos que la disolución de los carbonatos se había producido totalmente. Con la finalidad de extraer las sales que se producen como resultado de esta reacción de disolución se volvían a llenar los tubos Falcon con 40 ml de agua desionizada, se cerraban los tubos y centrifugaban a 4800rpm por 8 minutos. Se sacaban

de la centrifugadora y se extraía la mayor parte del sobrenadante con una pipeta, y se volvía a repetir hasta 2 veces este procedimiento con agua desionizada. Después de cada enjuague se resuspendía el sedimento mecánicamente cada vez que se introducía el agua desionizada. Finalmente, se extraía el sobrenadante y se dejaban secar a temperatura ambiente. Una vez seco se transfería a cápsulas de estaño para su posterior análisis elemental.

Las muestras se enviaron para su análisis al Stable Isotope Facility (SIF) de la Universidad de California Davis, lugar donde se llevaron a cabo utilizando un analizador elemental VarioElCube or Micro Cube elemental analyzer (Elementar Analysensysteme GmbH, Hanau, Germany) acoplado a un espectrómetro de masas PDZ Europa 20-20 (Sercon Ltd., Cheshire, UK). La metodología que se siguió para las determinaciones isotópicas de estas muestras incluye la combustión de los filtros a 1000°C en un reactor empacado con óxido de cobre y cromato de plomo en el analizador elemental. Después de la combustión, se separan los óxidos en una cámara de reducción (cobre reducido a 650°C). El gas acarreador empleado en este sistema, helio de alta pureza, fluye por una trampa de agua (perclorato de magnesio) donde se atrapan las moléculas de vapor de H₂O que resultan durante la reacción. Las moléculas de CO₂ que resultan de este proceso se separan mediante una trampa de absorción de tamiz molecular antes de entrar al espectrómetro de masas donde se ionizan las moléculas de CO₂ y se separan a lo largo de unos tubos de vuelo de acuerdo a sus masas y se cuantifican sus arribos en unos colectores Faraday fijos al final de dichos tubos, resultados que posteriormente se convierten en relaciones isotópicas referidas a un estándar internacional, el V-PDB (Vienna Pee Dee Belemnite).

Los valores isotópicos son expresados en la notación delta (δ):

$$\delta^{13}\text{C}_{\text{COS}} (\text{‰}, \text{V-PDB}) = [(R_{\text{muestra}} - R_{\text{estándar}}) / R_{\text{estándar}}] * 1000$$

Donde R es la razón del isótopo pesado al ligero (¹³C/¹²C).

Durante los análisis isotópicos de las muestras se intercalaron estándares secundarios internos al SIF (Nylon G-11 $\delta^{13}\text{C} = -27.81\text{‰}$; Hígado bovino: $\delta^{13}\text{C} = -21.69\text{‰}$; Ácido glutámico USGS-41 $\delta^{13}\text{C} = 37.63\text{‰}$; Hojas de durazno: $\delta^{13}\text{C} = -26.12\text{‰}$). Los promedios de los valores isotópicos de los estándares secundarios fueron -27.81 (n=67), -21.68 (n=5), 37.63 (n=10) y -26.15‰ (n=20), respectivamente. Para todos los estándares secundarios, la precisión fue $\leq 0.046 \text{‰}$ (± 1 desviación estándar).

Los resultados que se obtienen de SIF también incluyen estimaciones de la cantidad de carbono en cada muestra ($\mu\text{g C}$). Las concentraciones relativas de carbono orgánico reportado corresponden a sedimentos sin el componente carbonatado. Tanto los valores de $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ como las concentraciones de carbono orgánico se reportan y grafican con respecto a la profundidad media para cada muestra de sedimento.

Para la asignación de las etiquetas de calidad (quality flags) seguimos los criterios de asignación del programa de graficado de datos Ocean Data View (ODV) (Schlitzer, 2002), que es ampliamente utilizado por la comunidad oceanográfica internacional. Estos criterios básicamente distinguen cuatro categorías, la etiqueta = 0 se asigna a datos de buena calidad y certificado, la etiqueta = 1 se asigna a datos con calidad buena pero no certificada, la etiqueta = 4 se aplica a datos de calidad cuestionable, y la etiqueta = 8 se asigna a datos de mala calidad. En nuestro caso, utilizamos solo dos etiquetas (0 y 4) y el criterio de asignación fue el que tuvieran el peso adecuado de muestra para obtener una determinación isotópica fiable.

Dataciones de radiocarbono ^{14}C por electrotándem

Las dataciones radiométricas se realizaron sobre carbonatos precipitados en las testas de foraminíferos pláncnicos, organismos que viven y secretan sus testas de calcita en los primeros 200 m de la columna de agua y consiguientemente nos proporcionan la edad de la capa de mezcla superficial del mar. En general, se recogieron manualmente alrededor de 1500 caparazones de estos foraminíferos pláncnicos en el laboratorio de Paleoceanografía del CICESE de los distintos niveles de sedimento que se dataron para obtener los 1-2 mg de carbono necesarios para este tipo de análisis, y se enviaron al laboratorio de AMS (Accelerated Mass Spectrometry) de la Universidad de Arizona en Tucson para su posterior análisis.

En este laboratorio las muestras se limpiaron en una solución de H_2O_2 al 15% en un baño ultrasónico para remover el polvo adherido, carbonatos detríticos y capas orgánicas superficiales. Para liberar el CO_2 de los carbonatos las muestras se acidificaron en una solución de ácido fosfórico al 100% a 90°C de temperatura. El CO_2 resultante se redujo con H_2 sobre unos 2mg de polvo de Fe como catalizador, y la mezcla de carbono/hierro resultante se comprimió en un pellet en el colector diana.

La concentración de ^{14}C de las muestras se determinó comparando los haces de ^{14}C , ^{13}C , y ^{12}C de cada muestra contra los de un estándar de CO_2 de ácido oxálico y una muestra de foraminíferos de edad conocida en la cámara nebulizadora del electrotándem. Las edades ^{14}C se calcularon después de una corrección del $\delta^{13}\text{C}$ por el fraccionamiento isotópico basado en la relación $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ determinada simultáneamente con la relación $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ por el AMS. Este valor de $\delta^{13}\text{C}$ incluye los efectos por fraccionamiento durante la grafitización y por el sistema del AMS, razón por lo que sus valores no son comparables directamente con los que se hubieran obtenido en un espectrómetro de masas convencional. Todas las muestras rindieron suficiente carbono para producir un haz con la concentración de iones necesaria para estas determinaciones

Resultados

Patrones de distribución de los carbonatos

La composición promedio del contenido en carbonatos en los sedimentos abisales del GM oscilan entre el 15 al 50% del total del sedimento, aunque excepcionalmente en el talud N de la península de Yucatán este porcentaje aumenta hasta el 80%. En general se observan composiciones uniformes para todos los núcleos, al menos para los primeros 10 cm de la columna de sedimentos (Figura 155). En general el contenido relativo de calcita aumenta a medida que nos alejamos de las zonas del talud occidental –Tamaulipas a Veracruz- y meridional –Veracruz a Tamaulipas- hacia la llanura abisal de Sigsbee y este aumento se hace más marcado en la región al N del talud de la península de Yucatán y especialmente en su zona del talud, donde pueden llegar a observarse valores de hasta 80% en los contenidos de calcita.

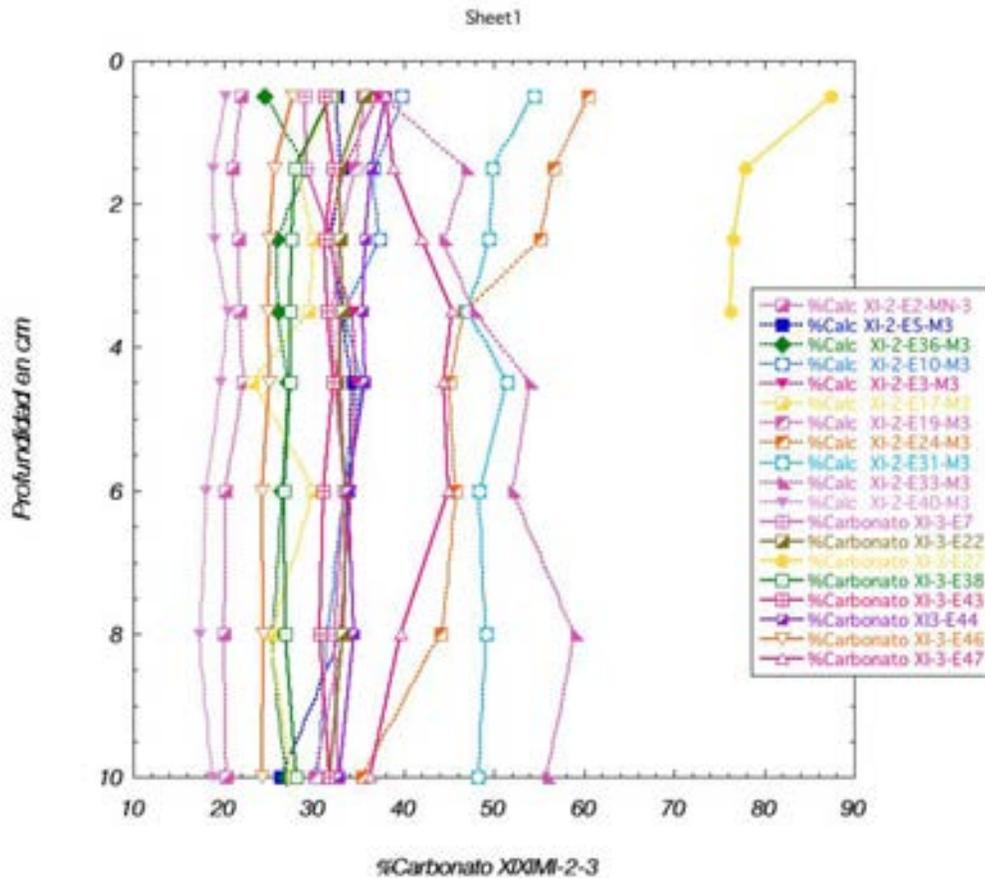


Figura 155. Contenido relativo de carbonatos en los sedimentos de aguas profundas del GM. Para fines comparativos se muestran los resultados de las muestras recolectadas durante XIXIMI-2 y XIXIMI-3.

Uno de los patrones más importantes a escala regional es la tendencia a aumentar en el contenido de carbonatos desde las zonas del talud continental hacia la llanura abisal, patrón que se invierte alrededor del talud norte de la península de Yucatán. El primer patrón es especialmente evidente en la parte nororiental y en la meridional a lo largo de los cañones de Coatzacoalcos y Campeche, paradójicamente el patrón corre en sentido contrario a lo que conocemos de los sedimentos de talud y abisales en los

océanos. En el talud y la llanura abisal lindantes al norte de la península de Yucatán observamos un enriquecimiento en carbonatos a profundidades intermedias del talud y una disminución progresiva en profundidad hasta la llanura abisal (Figura 156, panel superior derecho).

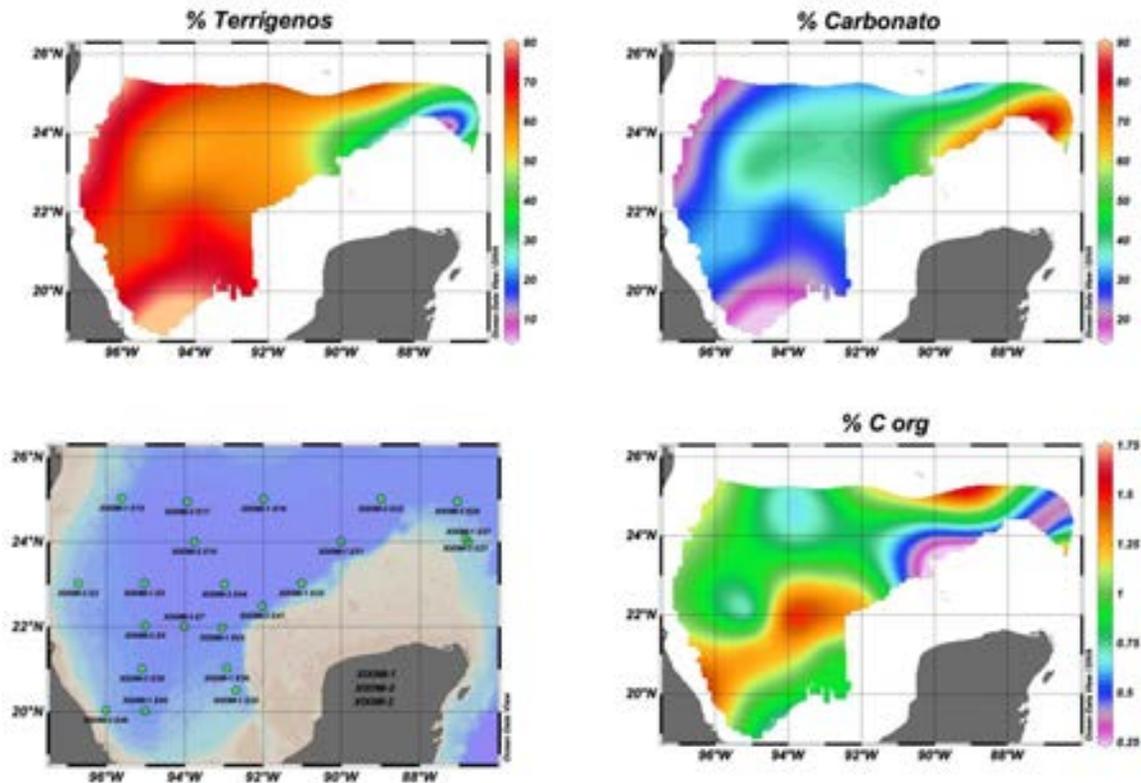


Figura 156. Mapas de los patrones de distribución de distintos componentes sedimentarios en la región de aguas profundas del GM. Se presentan los valores promedio de los primeros 10 cm de sedimento de todos los núcleos recolectados durante las campañas XIXIMI-1, XIXIMI-2 y XIXIMI-3. Panel superior izquierdo: contenido en sedimentos terrígenos. Panel superior derecho: contenido relativo de carbonatos. Panel inferior derecho: contenido relativo del carbono orgánico. Panel inferior izquierdo: localización de los núcleos estudiados.

Análisis de las láminas frotis

Los análisis de microscopio de las láminas frotis se realizaron sobre el residuo <math><64\mu\text{m}</math> que lavamos durante el proceso de tratamiento de las muestras. En estas láminas pudimos observar que el componente carbonatado de los sedimentos de la llanura abisal estaba compuesto fundamentalmente de placas de cocolitofóridos y fragmentos de foraminíferos. Las zonas de talud tanto occidental como el meridional mostraban un mayor contenido en limos y arcillas de origen continental. En contraste con la zona del talud al norte de Yucatán, en cuyos sedimentos además de la presencia de cocolitofóridos, foraminíferos y pterópodos, se observa un mayor contenido de calcita microcristalina sin morfologías aparentes, probablemente como resultado de la

fragmentación de estructuras originalmente coralinas, esqueletos de carbonatos – moluscos, equinoideos, briozoos-, pellets, clastos e intraclastos de carbonatos del frente de arrecife, y de oolitos de origen algal procedentes de la extensa plataforma al norte de la península de Yucatán. Esta sustitución de calcita microcristalina por los terrígenos explica el enriquecimiento en carbonatos observado, especialmente a profundidades intermedias del talud de Yucatán y en la región aledaña de la llanura abisal. También observamos una disminución progresiva de estos fragmentos microcristalinos entre las profundidades intermedias del talud hacia la llanura abisal, donde dominan las placas de los coccolitofóridos y caparazones de foraminíferos pláncnicos.

Contenido en carbono orgánico y composición isotópica del carbono de los sedimentos

El valor medio del carbono orgánico en los sedimentos (COS) es de $0.8 \pm 0.4\%$, promedio extraordinariamente bajo cuando lo comparamos con otras regiones profundas de talud y abisales del océano global. La distribución del promedio del contenido relativo del COS para los primeros 10 cm muestra un patrón de empobrecimiento entre el borde de la plataforma y el talud, con valores entre 0.65-1%, hacia la llanura abisal donde muestra un incremento relativo en sus valores de abundancia, entre 0.75 a 1.5 %. Los valores más empobrecidos se encontraron en el talud norte de la península de Yucatán, entre 0.25 a 0.5%. Este patrón trimodal, así como la variabilidad entre las concentraciones en los taludes oriental y sur, la llanura abisal y talud norte de Yucatán, coincide parcialmente con el descrito para los carbonatos, aunque con concentraciones de un orden de magnitud menor. Este cambio en las concentraciones relativas que se puede explicar en función del papel que juega el carbono orgánico al alimentar y sostener las redes tróficas por debajo de la zona fótica hasta las llanuras abisales y el papel relativamente inerte que tienen los carbonatos a estas profundidades.

Un patrón que observamos más claramente en los sedimentos recuperados en XIXIMI-3 es el enriquecimiento relativo en carbono orgánico en los primeros 2 cm por debajo de la interfaz agua sedimento en la mayoría de los núcleos recuperados, representados por los perfiles de las estaciones E7, E22, E38, E43, E44, E46, y E47. Este enriquecimiento relativo varía entre 0.1% en la estación XI3-E44, hasta 0.5% en las estaciones E22, y E47, lo que supone prácticamente el 50% por encima de su contenido en carbono orgánico por debajo de la capa de mezcla (Figura 157).

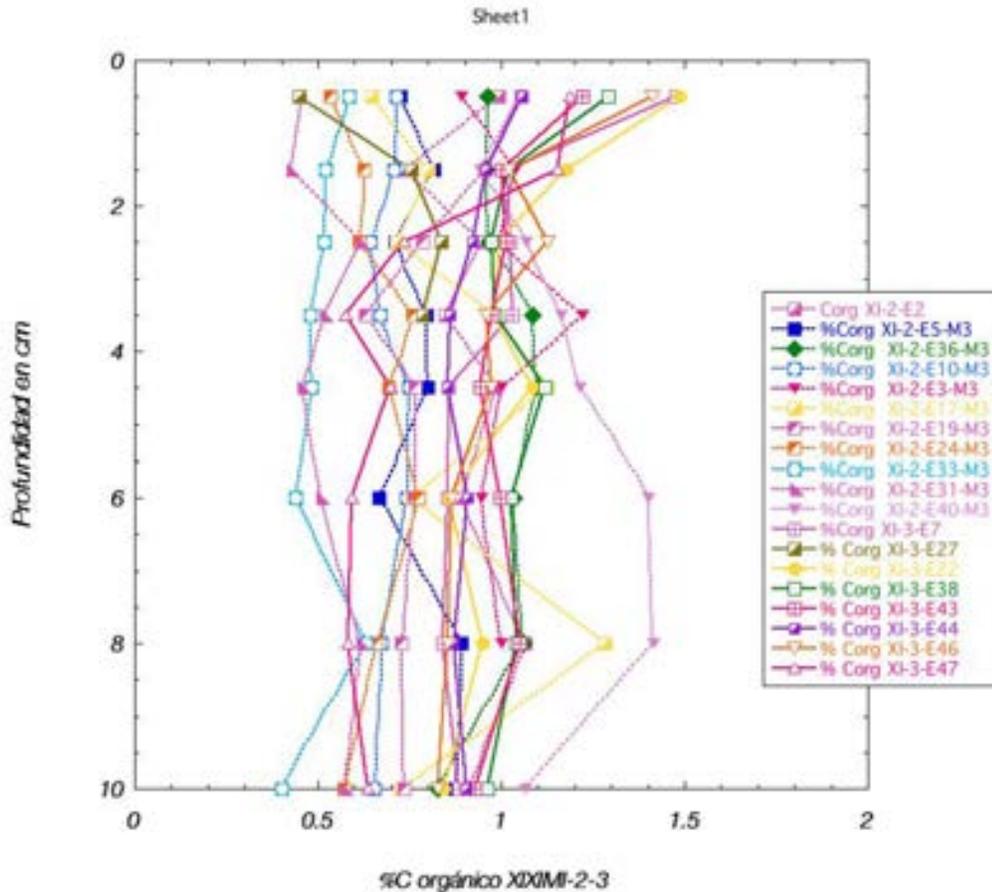


Figura 157. Perfiles en profundidad del contenido relativo en carbono orgánico en los primeros 10 cm por debajo de la interfase agua-sedimento. Para fines comparativos se muestran los resultados de las muestras recolectadas durante XIXIMI-2 y XIXIMI-3.

El promedio de las composiciones isotópicas del carbono del COS ($\delta^{13}\text{C}_{\text{COS}}$) es de $-26.5 \pm 2.5\text{‰}$, valores que son extraordinariamente negativos en comparación con los valores medios de la materia orgánica de origen marino y se acercan a los de la materia orgánica de origen continental. Su distribución espacial muestra un patrón hacia valores más negativos entre el borde la plataforma de Yucatán (-25‰) hacia la llanura abisal, región en la cual se observa el mayor empobrecimiento en los valores de $\delta^{13}\text{C}_{\text{COS}}$ justo por debajo de la corriente del Lazo (-28.5‰) de una forma análoga al patrón del contenido en el COS que observamos anteriormente. Sin embargo este patrón de similitud se rompe para el resto del golfo. Hacia el sur, especialmente en la región comprendida entre los cañones de Coatzacoalcos y Campeche, los valores son en general mucho más negativos ($-26.5 \pm 0.5\text{‰}$) que los típicos del carbono orgánico de origen marino ($-21 \pm 1\text{‰}$), tendencia que se hace aún más negativa sobre la llanura abisal de Sigsbee y aparentemente todo el talud occidental del GM entre Tampico hasta el norte de Veracruz ($-28 \pm 1\text{‰}$) (Figura 158).

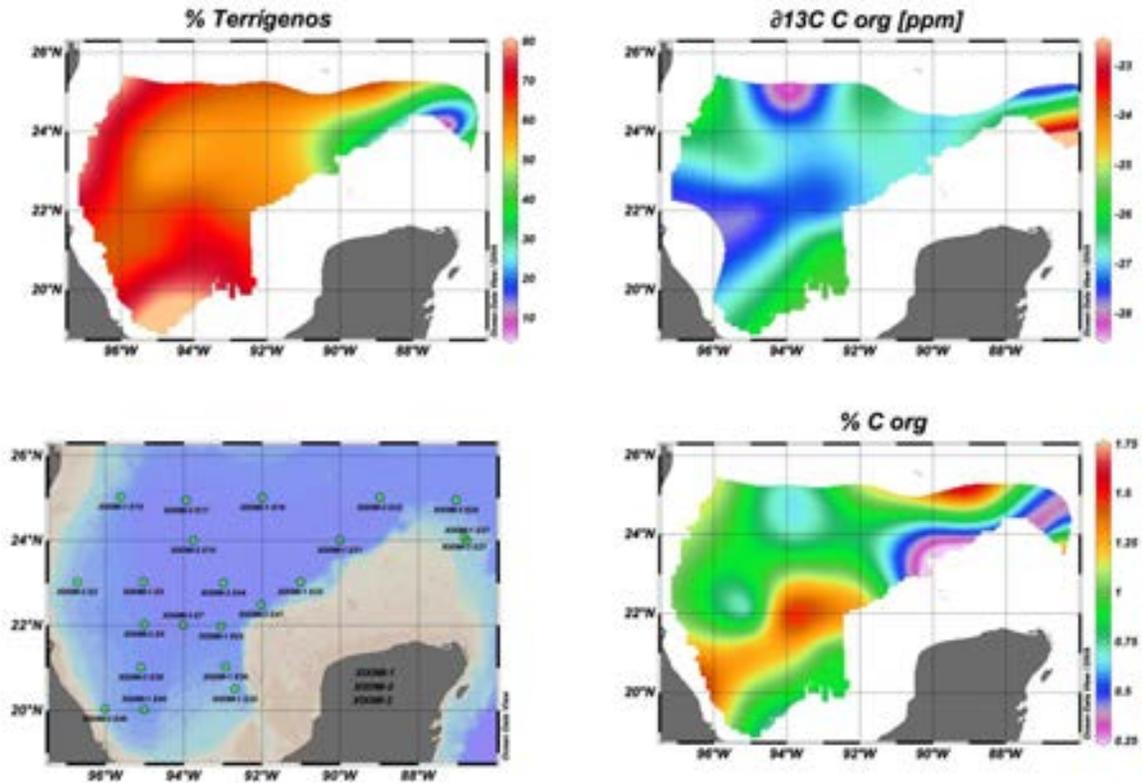


Figura 158. Mapas de los patrones de distribución de distintos componentes sedimentarios en la región de aguas profundas del GM. Se presentan los valores promedio de los primeros 10 cm de sedimento de todos los núcleos recolectados durante las campañas XIXIMI-1, XIXIMI-2 y XIXIMI-3. Panel superior izquierdo: contenido en sedimentos terrígenos. Panel superior derecho: composiciones isotópicas del carbono orgánico $\delta^{13}\text{C}_{\text{C org}}$ referido a PDB en ‰. Panel inferior derecho: contenido relativo del carbono orgánico. Panel inferior izquierdo: Localización de los núcleos estudiados.

Patrones de distribución de los sedimentos terrígenos

La proporción de los sedimentos terrígenos no la determinamos directamente, sino que la derivamos a partir de la diferencia entre el total relativo (100) y la suma de los porcentajes de carbonato y de carbono orgánico, al que agregamos un 3% de ópalo biogénico reportado en este informe. Los patrones que observamos en su distribución es el de un alto contenido en terrígenos bordeando todas las zonas del talud occidental y meridional, amplificado en los cañones de Coatzacoalcos y Campeche, y un empobrecimiento hacia la llanura abisal y especialmente en el talud norte de la península de Yucatán (Figura 158, panel superior izquierdo). Estos patrones de distribución nos indican la presencia de tres grandes regiones, una dominada por la sedimentación de los sedimentos de origen continental al occidente y sur del GM, la llanura abisal central donde disminuye la importancia de los terrígenos y aumenta la de los carbonatos pelágicos, y la región del talud al norte de la península de Yucatán, donde observamos los menores contenidos de terrígenos de todo el GM.

Patrones de distribución de las edades de los sedimentos

Los patrones de la distribución de edades en la interfase agua-sedimento (el primer cm de la columna de sedimentos), muestran un gradiente a aumentar entre los bordes de la plataforma continental hacia la llanura abisal, donde consistentemente se observan las mayores edades. Este gradiente espacial también implica un gradiente en profundidad ya que las mayores edades se encuentran consistentemente en la interfase agua-sedimento de los núcleos colectados a mayor profundidad (sobre la llanura abisal). Es importante señalar la excepcionalidad de las edades mayores encontradas en el núcleo de la estación E24 localizada por debajo de la estructura de mesoescala de la corriente del Lazo. Otro gradiente menor se puede observar entre las estaciones E33 y E32 situadas al pie del talud de la península de Yucatán, entre la estación más cercana al pie de talud (E33) hacia otra estación ligeramente más alejada (E31) del talud, entre las que se aprecia una diferencia de edad de cerca de 2000 años (Figura 159).

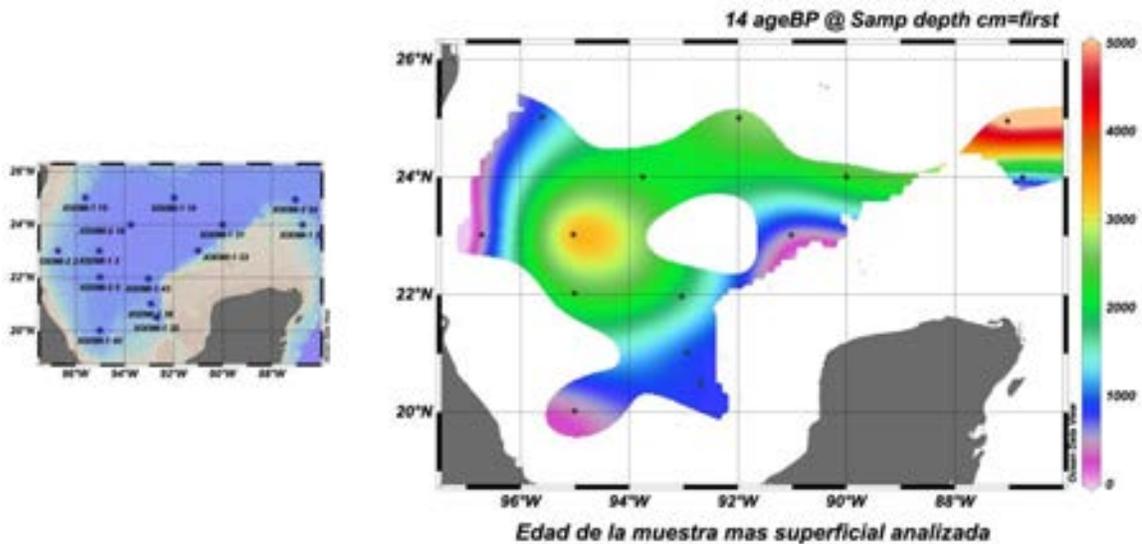


Figura 159. Distribución de las edades estimadas a partir de mediciones de radiocarbono ^{14}C en el primer cm de la columna de sedimentos obtenidas a partir de dataciones de AMS ^{14}C sobre los caparazones calcíticos de foraminíferos pláncnicos de los núcleos recolectados en las campañas XIXIMI-1, XIXIMI-2 y XIXIMI-3.

La capa de mezcla, o bioturbada, superficial tiene una profundidad media entre 4 a 7 cm de profundidad, como se puede apreciar en la Figura 160. En esta gráfica se muestran las edades estimadas a partir de mediciones de radiocarbono en profundidad en los sedimentos. La primera observación que podemos hacer es cómo generalmente éstas edades varían muy poco en los primeros cm por debajo de la interfase agua-sedimento. La segunda observación es el envejecimiento progresivo de esta capa de edades uniformes, entre los 700-800 años hasta los cerca de 3500, con la excepción del núcleo E24 que está en el talud de la península de Yucatán y que señalábamos anteriormente. Este envejecimiento progresivo tiene un marcado gradiente espacial y

otro en profundidad. El gradiente horizontal se observa entre las estaciones más cercanas al continente, las que están en el fondo de los cañones y los taludes continentales, y las que se encuentran sobre la llanura abisal. El gradiente vertical se observa en función de la profundidad al comparar las áreas más someras sobre los taludes y las profundidades mayores de la llanura abisal. El núcleo recolectado sobre la llanura abisal al norte de la península de Yucatán, E24, está en un área localizada debajo de la corriente del Lazo. Muestra las edades más viejas (6,000 años AP), que revela un hiatus en la sedimentación pelágica en esta área durante los últimos 6,000 años.

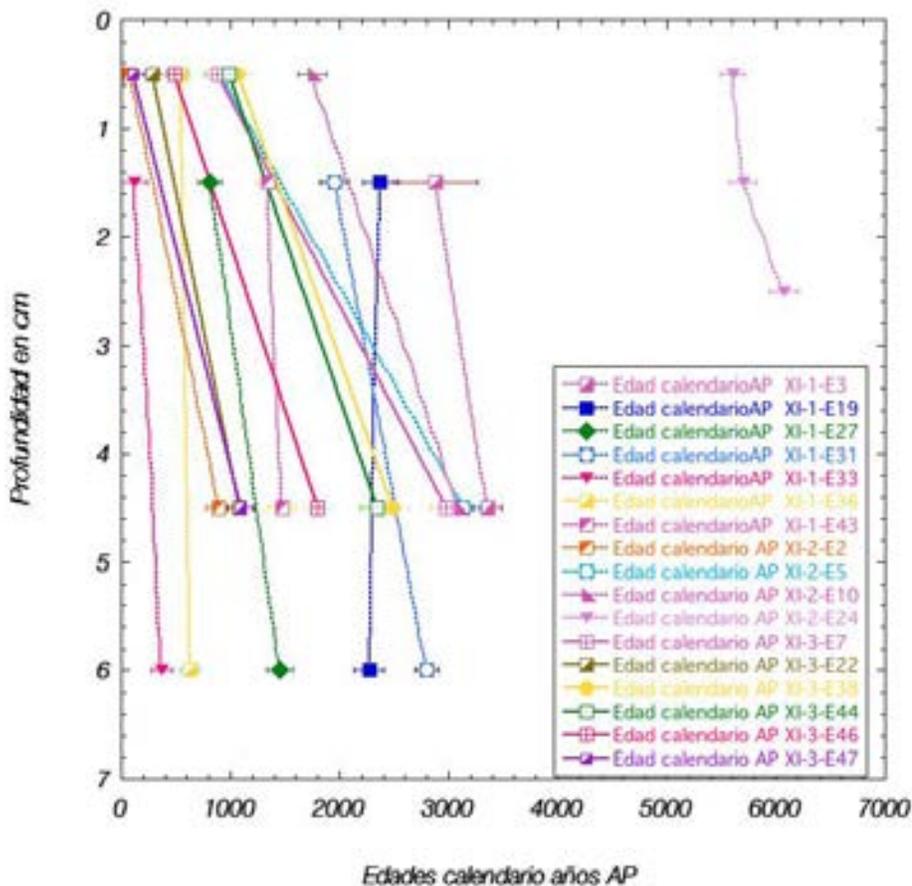


Figura 160. Edades estimadas a partir de mediciones radiocarbono ^{14}C en años calendario antes del presente (AP) en función de la profundidad en cm de la columna de sedimentos obtenidas a partir de dataciones de AMS ^{14}C sobre los caparazones calcíticos de foraminíferos pláncicos de los núcleos colectados en las campañas XIXIMI-1, XIXIMI-2 y XIXIMI-3.

Discusiones

Los patrones de la distribución de los carbonatos en los sedimentos pueden estar controlados por una serie de procesos que procedemos a discutir con las evidencias que tenemos. En principio la producción de placas y caparazones de calcita tanto por el fitopláncton como por el zoopláncton es aproximadamente uniforme para todo la región de aguas profundas del golfo (Lorenz and Verity, 2006). Su transferencia por la columna de agua y su sedimentación en el fondo podría estar afectadas bien por procesos de disolución controlados por el estado de saturación del ión carbonato en columna de agua, como por dilución por terrígenos procedentes por aportes de los ríos del continente. Esta dilución está fundamentalmente controlada por los materiales que aporta el delta del Mississippi al norte, cuyos efectos se notan hasta la llanura abisal de Sigsbee hasta los 24°N, y por los ríos que drenan la Sierra Madre oriental al oeste, y que son alimentados especialmente por el monzón de verano. En el sur el complejo de los ríos alimentados por el efecto de borde de la zona de Convergencia Intertropical, que abastece de agua a los ríos más caudalosos de todo el país: el complejo Grijalva-Usumacinta.

Seguidamente discutimos el papel que la disolución pudiera introducir en la preservación de estos carbonatos. En principio, la disolución de los carbonatos en la columna de agua está controlado por el estado de saturación de la calcita en el agua, y que está definido cómo :

$$\Omega = [X\alpha]_{aq} * [CO_3]_{aq} / [X\alpha]_{sat} * [CO_3]_{sat}$$

cuando $\Omega > 1$ decimos que esta sobresaturado y cuando $\Omega < 1$ decimos que está subsaturado, situación que favorece el proceso de disolución de los carbonatos, cuya intensidad va a depender fundamentalmente del estado de subsaturación y velocidad de enterramiento. Los carbonatos se disuelven a una tasa que está relacionada de una forma no lineal con el estado de subsaturación, y la disolución se puede producir bien en la columna de agua o en los sedimentos, especialmente cuando éstos tienen un alto porcentaje de materia orgánica. En principio, esto último no sucede en los sedimentos de las aguas profundas del GM debido a su bajo contenido en carbono orgánico. Procedemos a explorar el estado de saturación en la columna de agua con el objetivo de conocer si esta variable juega un papel en el estado de preservación de los carbonatos en los sedimentos. Para realizar el cálculo de Ω recurrimos a los datos públicos de mayor confiabilidad de la cuenca del Caribe campaña WOCE línea A22 (Johnson et al., 2003), cuyas aguas por encima de los 2000 m alimentan prácticamente todas las profundidades del GM y que constituyen su miembro inicial. Estos datos los tratamos con el programa CO2SYS.BAS y utilizando las constantes K1 y K2 de Mehrbach et al., 1973 referidas en Dickson y Millero, 1987, la $KHSO_4$ de Dickson y la escala de pH para agua de mar en [mol/kg-SW]. Como podemos observar en la (Figura 161), los valores de Ω se encuentran siempre por encima de 1, lo que implica que no hay procesos de disolución, ni en la columna de agua ni en los sedimentos, razón por la que podemos descartar la importancia de este control para explicar la distribución espacial del contenido en carbonatos de los sedimentos de las zonas de talud y en la llanura abisal del GM.

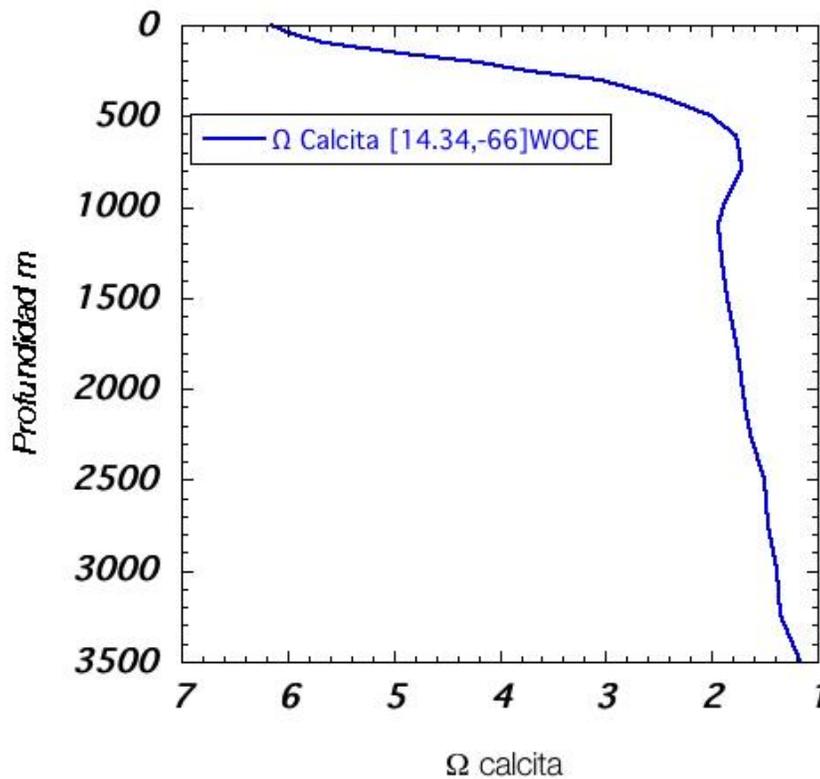


Figura 161. Estado de saturación de la calcita Ω descrita en el texto como la relación entre la concentración de los iones $[\text{CO}_3^{2-}][\text{Ca}]$ determinada en el agua sobre su concentración en equilibrio K_{sp} ; valores de $\Omega > 1$ denotan sobresaturación, $\Omega = 1$ denotan saturación, $\Omega < 1$ denota subsaturación y consiguientemente la disolución de los carbonatos.

Los patrones de distribución de los contenidos de carbonatos y terrígenos, junto con los obtenidos por análisis visual al microscopio de los frotis, delinean la importancia de cuatro grandes provincias en la región de aguas profundas: el talud y pie de talud de los márgenes de Tamaulipas-Veracruz, los cañones de Coatzacoalcos y de Campeche, la llanura abisal de Sigsbee y el talud norte de la península de Yucatán. Estas regiones esbozan las distintas provincias terrígenas dominadas por los sedimentos de origen litogénico que provienen por un lado de del río Mississippi al norte y de la Sierra Madre Oriental al occidente drenada por el sistema de ríos que atraviesan el continente desde Tamaulipas hasta Veracruz, y los cuales son alimentados estacionalmente por el monzón de verano en esta región. En el sur los cañones de Coatzacoalcos y de Campeche divididos por el pié de delta entre ambos están tapizados por sedimentos que provienen de los ríos que drenan los macizos del sur de Chiapas hasta Belice, el complejo Usumacinta-Grijalva, los que posiblemente son los más caudalosos del país y que descargan la precipitación de verano asociada a la migración latitudinal de la zona de convergencia intertropical. La llanura abisal central de Sigsbee, al estar rodeada por el continente y debido a su cercanía al mismo, captura una parte importante de los materiales litogénicos más finos junto con el material carbonatado de origen biogénico que se exporta desde la superficie. Estas arcillas de la llanura abisal han podido ser

transportadas por una variedad de procesos que incluyen plumas y filamentos originados durante las descargas de los ríos que pueden viajar cientos de km en suspensión, y por medio de los organismos los engullen y empaquetan como pellets, proceso que facilita su transferencia y sedimentación en el fondo, junto con otros procesos como son las corrientes turbidíticas, corrientes de gravedad, y transporte isopícnico.

La cuarta región la encontramos en el talud al norte de la Península de Yucatán donde la dilución del material biogénico de origen pelágico se produce con materiales carbonatados, principalmente calcita microcristalina con origen en la extensa plataforma de Yucatán. Esta fuente controla el enriquecimiento en carbonatos de estos sedimentos con respecto al resto del GM. Estos fragmentos y cristales de calcita van perdiendo importancia hacia el pie de talud hasta llegar a la llanura abisal de Sigsbee donde dejan de ser reconocibles en los sedimentos.

La distribución del contenido en carbono orgánico en los sedimentos confirma el papel que juega la dilución por terrígenos, que define el carácter de las regiones del talud norte de Yucatán donde se observa un gradiente a disminuir hacia el pie de talud, y los valores relativamente bajos sobre la llanura abisal de Sigsbee (Figura 158, panel inferior derecho). Sin embargo este patrón difiere sensiblemente en las regiones limítrofes entre los cañones de Coatzacoalcos y de Campeche en comparación con la llanura abisal, donde se aprecian unos contenidos relativamente mayores de carbono orgánico que los esperados. Este enriquecimiento relativo puede ser consecuencia de la menor importancia por dilución de los sedimentos terrígenos en las partes más distales de ambos cañones o consecuencia de una a mayor producción primaria en la región del giro de la bahía de Campeche. Estas observaciones implican un balance entre la aportación de terrígenos y la exportación de carbono particulado de origen fitopláctico y/o de un mayor aporte por los ríos de materia orgánica de origen continental, tanto para la región del cañón de Campeche cómo el talud de Tamaulipas.

La característica general más importante que observamos en las composiciones isotópicas de carbono en los sedimentos es su aparente ligereza o sus valores más negativos y cercanos a la materia orgánica de origen continental para todo el GM (Figura 158 panel superior derecho). En general la vegetación terrestre se encuentra empobrecida en el isótopo más pesado (C^{13}) con respecto al fitoplácton marino y esta diferencia se ha utilizado comúnmente para distinguir la procedencia de ambos tipos de carbono en los sedimentos (Wickman, 1952, Craig, 1953). Estos valores negativos en principio puede implicar un mayor enriquecimiento en este componente de origen terrestre en los sedimentos de las aguas profundas, especialmente teniendo en cuenta su carácter más refractario que el de origen marino, lo que explica su mejor preservación relativa en los sedimentos.

Aunque sabemos que la temperatura también puede introducir un efecto en la composición isotópica del carbono orgánico, particularmente durante el proceso fotosintético, la uniformidad de las temperaturas en las aguas superficiales del golfo y la baja variabilidad estacional que se observó en la composición isotópica del carbono

particulado descartan la posibilidad de que este mecanismo deje una señal reconocible en el carbono orgánico preservado en los sedimentos.

La distribución espacial de las composiciones isotópicas de carbono en los sedimentos muestra un patrón hacia valores más negativos entre el borde la plataforma de Yucatán hacia la llanura abisal, extendiéndose hasta los cañones de Coatzacoalcos y el talud de Veracruz en el suroeste, tendencia que se hace aún más negativa hacia el norte sobre la llanura abisal de Sigsbee. Estas tendencias son difíciles de conciliar con las observadas en el contenido relativo del carbono orgánico en los sedimentos, especialmente la distribución de los valores más negativos sobre la llanura abisal de Sigsbee y el talud entre Tamaulipas y Veracruz. Existe la posibilidad, que se señala en el capítulo del carbono orgánico particulado en la columna de agua (Herguera y Herzka, este informe), que haya procesos de fraccionamiento isotópico asociado a la remineralización microbológica en los sedimentos durante la asimilación del carbono orgánico. Sin embargo nuestro desconocimiento actual de estos procesos nos limitan para evaluar su importancia en los patrones observados, aunque no podemos descartar esta posibilidad.

Otros procesos que pueden alterar la composición isotópica del carbono, especialmente en los sedimentos del GM, son las fugas naturales de hidrocarburos que dan origen a las abundantes chapopoterías que se encuentran en el fondo de cañones como el de Campeche y sobre la llanura abisal los Sigsbee knolls. Estos aportes naturales contribuyen con carbono orgánico fósil a los sedimentos, y aportan una señal isotópica sensiblemente más ligera que la típica del fitopláncton y más cercana a la de origen continental. Si bien este proceso nos ayudaría a explicar las composiciones isotópicas más ligeras observadas en el cañón de Campeche y posiblemente en el de Coatzacoalcos, donde conocemos de numerosas chapopoterías reportadas, sin embargo, desconocemos de su importancia sobre la llanura abisal así como sobre talud de Tamaulipas hasta Veracruz.

Las edades estimadas a partir de las determinaciones de radiocarbono ^{14}C en el primer cm de la columna de los sedimentos muestran una tendencia a aumentar entre los bordes de la plataforma continental hacia la llanura abisal. También se observa esta tendencia reflejada en las edades de la capa de mezcla o bioturbada superficial que muestra unas profundidades medias entre 4 a 7 cm de profundidad para la mayoría de los núcleos. Este marcado gradiente espacial en la horizontal y en profundidad observado en el progresivo envejecimiento entre las áreas más cercanas al continente, tanto en el fondo de los cañones como en los taludes continentales hacia las más alejadas sobre la llanura abisal, implican una disminución de las tasas de sedimentación con la distancia del continente. Esta tendencia implica la importancia del aporte de materiales litogénicos del continente como el control principal de las tasas de sedimentación e indirectamente de las edades observadas. Esta relación entre la naturaleza de los materiales sedimentarios, la riqueza relativa en terrígenos y las edades se puede observar comparando el patrón espacial de las edades de los sedimentos de la Figura 159 con el contenido en terrígenos de la Figura 158, comparación que resalta el grado de paralelismo entre ambas. De esta forma altos contenidos relativos en

materiales terrígenos corresponden con edades consistentemente más jóvenes, mientras que menores contenidos de los mismos reflejan edades mucho mayores.

Esta relación la podemos representar comparando el contenido relativo de terrígenos con las tasas de sedimentación para todos los núcleos (Figura 162). En esta figura podemos observar una relación no lineal entre ambas variables, para contenidos de terrígenos por debajo del 55% las velocidades de sedimentación son relativamente constantes, mientras que por encima de este valor las tasas de sedimentación aumentan exponencialmente. La localización espacial de las estaciones con tasas de sedimentación anómalamente elevadas, la E15 en el talud de Tamaulipas, y la E35 en el fondo del cañón de Campeche, pueden ser indicativos de la posible importancia de otros procesos sedimentarios, como pueden ser deslizamientos de ladera y/o corrientes de turbidez.

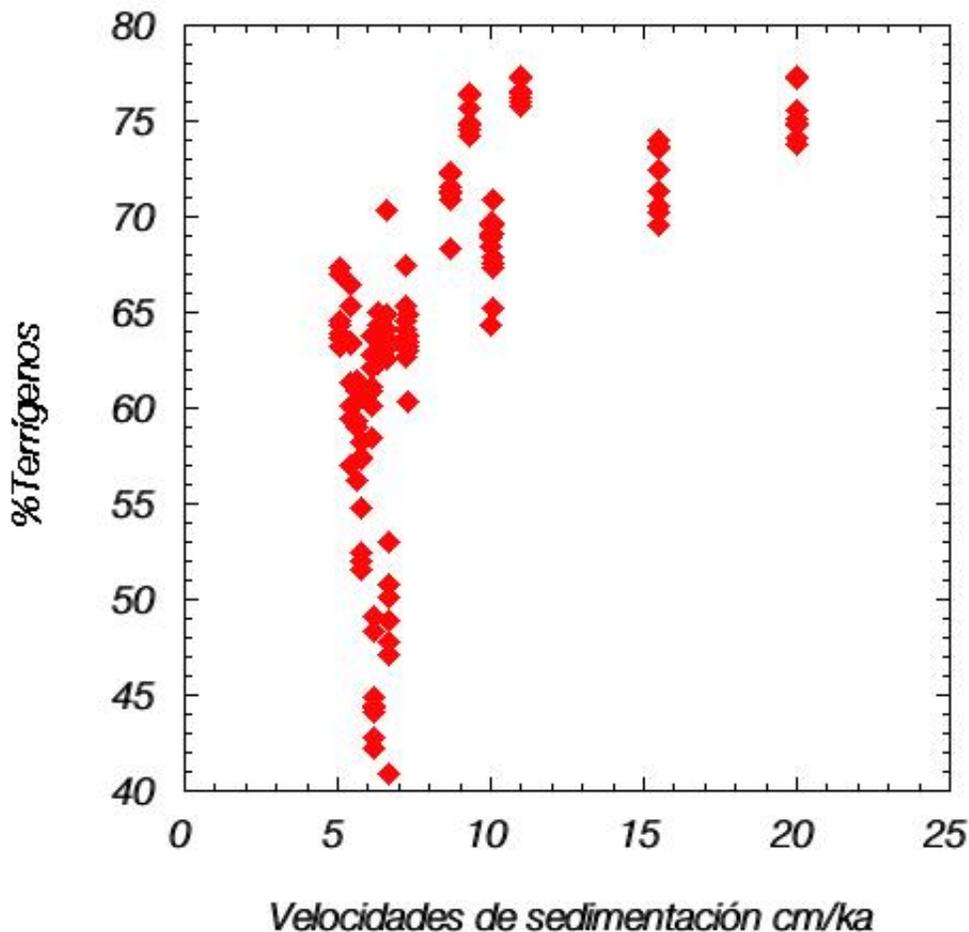


Figura 162. Gráfico de las velocidades de sedimentación en el eje de las abscisas en cm por 1000 años (ka), y en el eje de las ordenadas el contenido relativo en el componente terrígeno de los sedimentos.

La excepcionalidad de las edades más viejas del núcleo de la estación E24, localizada por debajo de la estructura de mesoescala de la corriente del Lazo, está relacionado a la alta energía de transporte desde la superficie hasta el fondo asociada con las corrientes y remolinos característicos de esta región, procesos que impiden la sedimentación de materiales litogénicos y biogénicos en esta zona e implican su transporte a otras zonas vecinas que no estén afectadas por los remolinos. Por otro lado, las edades relativamente más jóvenes del núcleo E33 colectado en el pié de talud al norte de la Península de Yucatán implican una mayor velocidad de los procesos de sedimentación, posiblemente por otros procesos aun por entender y particulares a este talud característico por su alta pendiente batimétrica.

Aunque en principio el número de núcleos que obtuvimos del fondo del GM no nos permite establecer con alto grado de significancia estadística los patrones de distribución encontrados, no encontramos evidencias de enriquecimientos anómalos de carbono orgánico por aporte de hidrocarburos a los sedimentos, como tampoco observamos empobrecimientos anómalos de carbonato que pudieran interpretarse como disolución debida a procesos de oxidación de hidrocarburos.

Conclusiones

La composición promedio del contenido en carbonatos en los sedimentos abisales del Golfo de México varían entre el 15 al 50% mostrando una gran uniformidad en los 10 primeros cm de cada núcleo, excepto en el talud al norte de la península de Yucatán, donde este porcentaje aumenta hasta el 80%.

En general el contenido relativo de carbonatos aumenta a medida que nos alejamos de las zonas del talud occidental –Tamaulipas a Veracruz- y meridional hacia la llanura abisal de Sigsbee y este aumento se hace más marcado en la región al norte del talud de la península de Yucatán

Los procesos de disolución no juegan un papel en la columna de agua ni en los sedimentos, por lo que la dilución por el componente terrígeno es el mecanismo principal que modula la abundancia relativa del componente carbonatado de los sedimentos.

Los sedimentos biogénicos de composición calcítica de la llanura abisal están compuestos fundamentalmente de placas de foraminíferos pláncnicos, cocolitos y fragmentos de foraminíferos. Las zonas de talud tanto occidental como el meridional muestran un mayor contenido en limos y arcillas de origen continental. En contraste con la zona del talud al norte de Yucatán en cuyos sedimentos además de la presencia de cocolitofóridos, foraminíferos y pterópodos, se observa un mayor contenido de calcita microcristalina con origen en las profundidades más someras de la vecina plataforma de Yucatán.

Los patrones de distribución de los contenidos en carbonatos y terrígenos junto con los obtenidos por análisis visual al microscopio delinean la importancia de cuatro grandes provincias de sedimentación en la región de aguas profundas. El talud y pie de talud de los márgenes de Tampico-Veracruz, los cañones de Coatzacoalcos y de Campeche, la llanura abisal de Sigsbee y el talud N de la península de Yucatán.

Los sedimentos del GM muestran unos valores promedio extraordinariamente bajos de carbono orgánico $0.8 \pm 4\%$, en comparación con otras regiones profundas de talud y abisales del océano global. El patrón multimodal observado, variabilidad de las concentraciones en los taludes orientales, región de los cañones de Coatzacoalcos y Campeche, llanura abisal y talud norte de Yucatán, coincide parcialmente con el descrito para los carbonatos, aunque con concentraciones de un orden de magnitud menores. Este cambio en las concentraciones relativas se puede explicar por el papel del carbono orgánico que alimenta y sostiene las redes tróficas por debajo de la zona fótica hasta las llanuras abisales.

La distribución del contenido en carbono orgánico en los sedimentos confirma la importancia de la dilución por terrígenos. Sin embargo, este patrón difiere sensiblemente al norte del cañón de Campeche donde se aprecian contenidos relativamente mayores de carbono orgánico en comparación con los valores que se extienden hacia el talud de Veracruz. Estas observaciones implican un balance entre el aporte de terrígenos y de la producción exportada de la superficie de carbono de origen fitopláctico y/o de un mayor aporte por los ríos de materia orgánica de origen continental.

El promedio de las composiciones isotópicas del COS $\delta^{13}C_{COS}$ es de $-26.5 \pm 2.5\%$, valores que son extraordinariamente mucho más negativos en comparación con los valores medios de la materia orgánica de origen marino y se acercan a los de la materia orgánica de origen continental. La distribución espacial de las composiciones isotópicas de carbono en los sedimentos muestra un patrón hacia valores más negativos entre el borde la plataforma de Yucatán hacia la llanura abisal extendiéndose hasta la región limítrofe entre los cañones de Campeche y Coatzacoalcos y la llanura abisal de Sigsbee hasta el talud occidental de Veracruz. Esta distribución implica un mayor aporte de carbono orgánico de origen continental, mezcla con fugas locales de hidrocarburos, y/o por procesos de asimilación biológicos aun relativamente desconocidos.

Los gradientes espaciales y en profundidad observados en el progresivo envejecimiento de las edades de los sedimentos entre las áreas más cercanas al continente, que incluyen el fondo de los cañones y los taludes continentales, hacia las más alejadas sobre la llanura abisal, muestran una disminución de las tasas de sedimentación con la distancia del continente lo que implica la importancia del aporte de materiales litogénicos como control principal de las tasas de sedimentación e indirectamente de las edades observadas.

Referencias

- Bouma (1972). Bouma, A.H., 1972. Distribution of sediments and sedimentary structures in the Gulf of Mexico. In: Rezak, R., Henry, V.J. (Eds.), Contributions on the Geological and Geophysical Oceanography of the Gulf of Mexico. Texas A&M University Oceanographic Studies 3, 35–61.
- Bouma et al (1990). A.H. Bouma, H.H. Roberts and J.M. Coleman, Acoustical and geological characteristics of near-surface sediments, upper continental slope of northern Gulf of Mexico. *Geo-Marine Letters* 10 (1990), pp. 200–208.
- Callender and Powell (1992). W.R. Callender and E.N. Powell, Taphonomic signature of petroleum seep assemblages on the Louisiana upper continental slope: recognition of autochthonous shell beds in the fossil record. *Palaios* 7 (1992), pp. 388–408.
- Davies and Moore (1970). D.K. Davies and W.R. Moore, Dispersal of Mississippi sediment in the Gulf of Mexico. *Journal of Sedimentary Petrology* 40 (1970), pp. 339–353.
- Griffen (1962). G.M. Griffen, Regional clay-mineral facies—product of weathering intensity and current distribution in the northeastern Gulf of Mexico. *Geological Society of America Bulletin* 73 (1962), pp. 737–768.
- Huerta-Diaz M.A. and Morse J.W. (1992) Pyritization of trace metals in anoxic marine sediments. *Geochim. Cosmochim. Acta* 56, 2681-2702.
- Johnson K., R. Key, F. Millero, C. Sabine, D. Wallace, C. Winn, L. Arlen, K. Erickson, K. Friis, M. Galanter, J. Goen, R. Rotter, C. Thomas, R. Wilke, T. Takahashi, and S. Sutherland. 2003. Carbon Dioxide, Hydrographic, and Chemical Data Obtained During the R/V Knorr Cruises in the North Atlantic Ocean on WOCE Sections AR24 (November 2 - December 5, 1996) and A24, A20, and A22 (May 30 - September 3, 1997), A. Kozyr (ed.) ORNL/CDIAC-143, NDP-082. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tennessee. doi: 10.3334/CDIAC/otg.ndp082
- Kennicutt, M. C. II and J.M. Brooks, 1990. Recognition of areas effected by petroleum seepage: northern Gulf of Mexico continental slope. *Geo-Marine Letters* 10 (1990), pp. 221–224.
- Logan (1969). B.W. Logan, Carbonate sediments and reefs, Yucatan Shelf, Mexico. *American Association of Petroleum Geologists Memoir* 11 (1969), pp. 7–128.

- Lohrenz, S. and Verity, P. 2005. Chapter 6. Regional Oceanography: Southeastern United States and Gulf of Mexico, in: *The Sea*, v. 14, ed. A. R. Robinson and K. H. Brink, p. 169-223.
- Rezak and Edwards (1972). Rezak, R., Edwards, G.S., 1972. Carbonate sediments of the Gulf of Mexico. In: Rezak, R.V.J., Henry (Eds.), *Contributions on the Geological and Geophysical Oceanography of the Gulf of Mexico*. Texas A&M University Oceanographic Studies 3, 263–280.
- Thunell (1976). R. Thunell, Calcium carbonate dissolution history in late Quaternary deep-sea sediments, western Gulf of Mexico. *Quaternary Research* 6 (1976), pp. 281–298.
- Trask (1953). Trask, P.D., 1953. Chemical studies of sediments of the western Gulf of Mexico: Part 2. In: *The Sediments of the Western Gulf of Mexico*. *Papers in Physical Oceanography and Meteorology* 12, 49–120.
- van Andel and Poole (1960). T.J. Van Andel and D.M. Poole, Sources of recent sediment in the northern Gulf of Mexico. *Journal of Sedimentary Petrology* 30 (1960), pp. 91–122.

METALES TRAZA EN LOS SEDIMENTOS

Responsable: Dr. Miguel Angel Huerta, IIO-UABC
Participantes: Ocean. Arturo Siqueiros, IIO-UABC

Antecedentes

La pirita representa una de las principales fases reducidas producida durante los procesos de diagénesis temprana en sedimentos anóxicos y además tiene una gran capacidad para incorporar metales traza (Huerta-Díaz y Morse, 1992). La formación de pirita está directamente relacionada con las tasas de reducción de sulfato, la cual a su vez depende de la cantidad y labilidad de la materia orgánica presente en los sedimentos (e.g., Berner, 1980, 1981). Para el caso específico del hierro y manganeso, dichos elementos forman sulfuros en la zona anóxica del sedimento (Berner, 1964, 1970), y oxihidróxidos en su parte óxica (Jenne, 1968; Belzile *et al.*, 1989). Estos componentes tienen una profunda influencia en la geoquímica de los sedimentos marinos, sobre todo en las reacciones que gobiernan el almacenamiento (o liberación) de elementos traza (Jenne, 1977; Lion *et al.*, 1982; Huerta-Díaz y Morse, 1992; Huerta-Díaz *et al.*, 1993; 1998). Una vez depositados y enterrados, los oxihidróxidos de Fe y Mn que eventualmente alcanzan la zona reducida/anóxica de los sedimentos, son reducidos a Fe(II) y Mn(II), respectivamente, y solubilizados en el agua intersticial. Una vez disueltos, una porción de estos dos constituyentes se difundirá hacia la interfaz sedimento/agua, mientras que la porción restante se difundirá hacia en profundidad, en donde precipitará como sulfuros (FeS amorfo, mackinawita, greigita, pirita, MnS), coprecipitando en el proceso gran parte de los metales traza en solución (e.g., Jacobs *et al.*, 1987; Morse y Arakaki, 1993; Huerta-Díaz *et al.*, 1998). El porcentaje de incorporación de Fe al mineral pirita puede ser medido a través del grado de piritización (DOP, por sus siglas in inglés; Berner, 1970), el cual puede ser calculado a partir de la siguiente ecuación:

$$\text{DOP}(\%) = \left(\frac{\text{Fe}_{\text{pir}}}{\text{Fe}_{\text{pir}} + \text{Fe}_{\text{HCl}}} \right) \times 100 \quad (1)$$

En donde Fe_{HCl} y Fe_{pir} se refieren a los metales asociados a las fracciones HCl y pirita, respectivamente. De manera similar al DOP, el grado de asociación de los metales traza al mineral pirita puede ser medido a través de los grados de piritización de metales traza (DTMP; Huerta-Díaz y Morse, 1990), los cuales pueden ser calculados a partir de la ecuación:

$$\text{DTMP}(\%) = \left(\frac{\text{Me}_{\text{pir}}}{\text{Me}_{\text{pir}} + \text{Me}_{\text{HCl}}} \right) \times 100 \quad (2)$$

En donde Me_{HCl} y Me_{Pir} se refieren a los metales asociados a las fracciones HCl y pirita, respectivamente.

El conocimiento de la distribución de los metales traza en las principales fracciones geoquímicas de los sedimentos marinos es importante ya que esta asociación determinará si los metales van a estar preservados en los sedimentos, o reciclados de nuevo a través de su incorporación a la columna de agua. El reciclado de los metales traza es una función de la “labilidad” o “reactividad” de la fase mineral a la cual se encuentran asociados, por lo que la cuantificación de las masas elementales asociadas a las fracciones más “reactivas” del sedimento (e.g., pirita, oxihidróxidos metálicos) puede servir para evaluar los efectos de la acumulación y/o presencia de hidrocarburos (petróleo). Estudios realizados por Huerta-Díaz y Morse (1992) mostraron como sedimentos asociados con derrames crónicos de petróleo (e.g., Green Canyon) del GM se podían diferenciar fácilmente de los sedimentos profundos y de la plataforma continental del GDM combinando los valores de DTMP con los de DOP. Para el caso particular de Green Canyon, los valores de DTMP para Cd, Co, Cu, Mn, Pb y Ni fueron generalmente superiores a los obtenidos para sedimentos de la plataforma continental del GDM. La hipótesis central correspondiente a esta parte del estudio es que los hidrocarburos representan materia orgánica sumamente lábil que puede ser aprovechada fácilmente por las bacterias sulfato-reductoras, incrementándose en el proceso las tasas de reducción de sulfato y, como consecuencia, la formación de cantidades importantes de pirita y metales traza asociados (Cd, Co, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, V), lo cual podría ser observado a través de diagramas DOP vs. DTMP similares a los reportados por Huerta-Díaz y Morse (1992).

Objetivos

El objetivo fundamental de este estudio fue cuantificar la pirita (FeS_2) sedimentaria y metales traza asociados en los sedimentos profundos del GM para el establecimiento de una línea base de elementos traza en sedimentos y su aplicación a una posible intrusión de hidrocarburos.

Metodología

Para el crucero XIXIMI-3 se recolectaron en total 8 núcleos de los que se obtuvieron 98 muestras de sedimento continuas en el eje vertical de la profundidad. Si a la cantidad de núcleos anteriores se le suman los recolectados en las campañas de XIXIMI-1 (diez) y XIXIMI-2 (cinco), se tienen entonces un total de 23 núcleos sedimentarios que representan 334 muestras, a cada una de las cuales se le analizaron un total de ocho metales (Cd, Co, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, V) en la fracción HCl y los mismos ocho elementos en la fracción pirita. Los núcleos sedimentarios fueron recolectados con un muestreador de caja, submuestreados con cilindros de plástico, extruidos y seccionados cada centímetro por medio de espátulas de plástico. Las muestras fueron congeladas en el barco y permanecieron congeladas hasta el momento de iniciar su procesamiento en el laboratorio.

Para el caso de los metales traza asociados a la pirita, se realizó una extracción secuencial química para obtener las fracciones operacionalmente definidas de ácido clorhídrico (Me_{HCl}), silicatos y pirita (Me_{Pir}) desarrollada por Huerta-Díaz y Morse (1990). Este método consiste en la digestión de 2.5 g de sedimento seco durante 16 h con 20 mL de HCl 1 N (fracción HCl, incluye carbonatos, óxidos de Fe y Mn, y monosulfuros de hierro), seguido de la eliminación de los aluminosilicatos (principalmente arcillas) con dos extracciones sucesivas (de 1 y 16 horas, respectivamente) con 30 mL de HF 10 M (fracción silicatos), y finalmente la disolución del residuo resultante (fracción pirita) con 10 mL de HNO₃ concentrado durante una hora. La fracción de silicatos fue descartada ya que los metales traza asociados a esta fase mineral son considerados esencialmente como "no lábiles" (Huerta-Díaz y Morse, 1992), mientras que la suma de las fracciones HCl y pirita ($Me_{FR} = Me_{HCl} + Me_{Pir}$) representan la fracción "reactiva" o "lábil" (Me_{FR}) del sedimento.

Las mediciones de metales traza fueron realizadas por medio de espectrofotometría de absorción atómica a la flama (Varian modelo SpectrAA 220 Fast Sequential) o por absorción atómica con horno de grafito (Varian modelo SpectraAA 850Z). Los límites de detección para cada una de las dos fracciones obtenidas se muestran en la

Tabla 32. No se utilizaron materiales certificados de referencia (MCRs) para evaluar la exactitud de las extracciones dado que no existen MCRs disponibles para extracciones secuenciales químicas. La precisión analítica de la absorción atómica a la flama estuvo normalmente entre el 5 y el 10% (\pm desviación estándar relativa). Debido a problemas técnicos, no fue posible efectuar las mediciones de V para la campaña de XIXIMI-3, las cuales se realizarán en fecha posterior.

Tabla 32. Límites de detección para los diferentes metales traza en las fracciones HCl y pirita medidos en absorción atómica a la flama y con horno de grafito (para vanadio) para las tres diferentes campañas oceanográficas.

Elemento	Campaña	Límite de detección (mg/L)	
		Fracción HCl	Fracción pirita
Cd	XIXIMI-1	0.027	0.024
Co	XIXIMI-1	0.025	0.030
Cu	XIXIMI-1	0.017	0.037
Fe	XIXIMI-1	0.090	0.055
Mn	XIXIMI-1	0.023	0.026
Ni	XIXIMI-1	0.094	0.079
Pb	XIXIMI-1	0.088	0.078
V	XIXIMI-1	0.0014	0.0011
Cd	XIXIMI-2	0.022	0.022

Tabla 32, continuación.

Co	XIXIMI-2	0.042	0.037
Cu	XIXIMI-2	0.027	0.019
Fe	XIXIMI-2	0.028	0.076
Mn	XIXIMI-2	0.019	0.097
Ni	XIXIMI-2	0.037	0.031
Pb	XIXIMI-2	0.035	0.075
V	XIXIMI-2	0.0030	0.0049
Cd	XIXIMI-3	0.0026	0.015
Co	XIXIMI-3	0.018	0.029
Cu	XIXIMI-3	0.029	0.052
Fe	XIXIMI-3	0.020	0.029
Mn	XIXIMI-3	0.029	0.033
Ni	XIXIMI-3	0.075	0.031
Pb	XIXIMI-3	0.11	1.0

Resultados

Los resultados del crucero XIXIMI-3 serán descritos en conjunto con los obtenidos en las dos campañas anteriores (XIXIMI-1 y XIXIMI-2) para tener una mejor perspectiva del comportamiento de los metales traza en los sedimentos profundos del Golfo de México. Las concentraciones promedio de metales traza en la fracción HCl (Me_{HCl}) obtenidas en XIXIMI-3 estuvieron generalmente dentro de los rangos obtenidos en los primeros dos cruceros para esta misma fracción (Anexo 3). En el caso particular de la campaña XIXIMI-3, los mayores valores en la fracción HCl se encontraron en las estaciones E43 y E38, presentando un rango de concentraciones promedio entre <0.041 (Pb; estación E27) y $58.0 \pm 7.3 \mu\text{mol g}^{-1}$ (Fe; estación E38). Los mayores valores de Me_{HCl} promedio para todos los cruceros combinados se encontraron en las estaciones E15 y E38 (Anexo 3), con rangos globales promedio de concentración entre <0.00019 (Cd; varias estaciones) y $162 \pm 54 \mu\text{mol g}^{-1}$ (Fe; estación E19).

De manera similar a los resultados obtenidos en la fracción HCl, las concentraciones de la fracción pirita (Me_{pir}) obtenidas en la tercera campaña oceanográfica se encontraron dentro de los rangos de concentraciones obtenidos en las dos primeras campañas (Anexo 4), con valores dispersos a lo largo de las diferentes estaciones (Figura 164). Para la campaña XIXIMI-3, las mayores concentraciones promedio de metales asociados a la pirita generalmente se encontraron en las estaciones E47 y E44, con un rango de concentraciones que abarcó de <0.0011 (Cd; todas las estaciones) a $4 \pm 13 \mu\text{mol g}^{-1}$ (Mn; estación E47). De manera global, las concentraciones de Me_{pir} de los tres cruceros estuvieron en el rango <0.0011 (Cd; varias estaciones) a

$7.6 \pm 1.9 \mu\text{mol g}^{-1}$ (estación E27), con las mayores concentraciones generalmente asociadas a las estaciones E33, E27 y X-3-EX47 (Anexo 4).

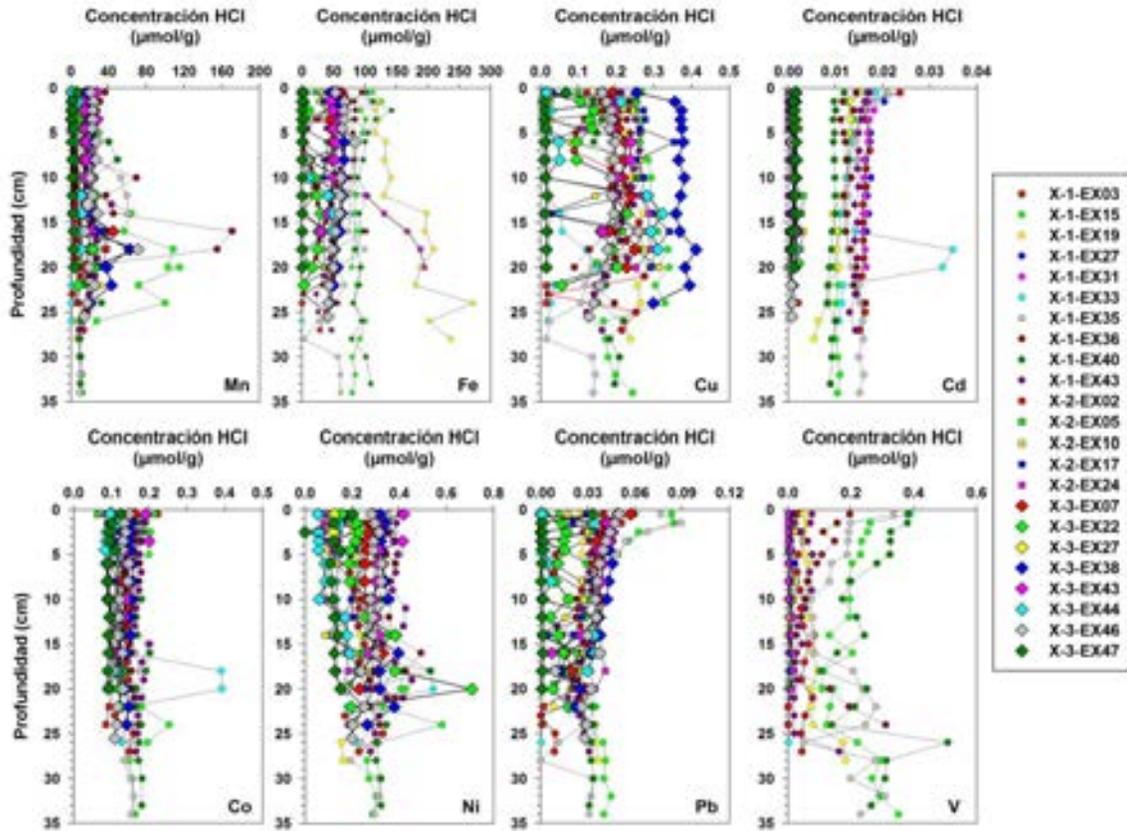


Figura 163. Perfiles de las concentraciones de metales asociados a la fracción HCl (Me_{HCl}) para sedimentos de las diferentes estaciones del GM correspondientes a las tres campañas oceanográficas (XIXIMI-1, XIXIMI-2 y XIXIMI-3).

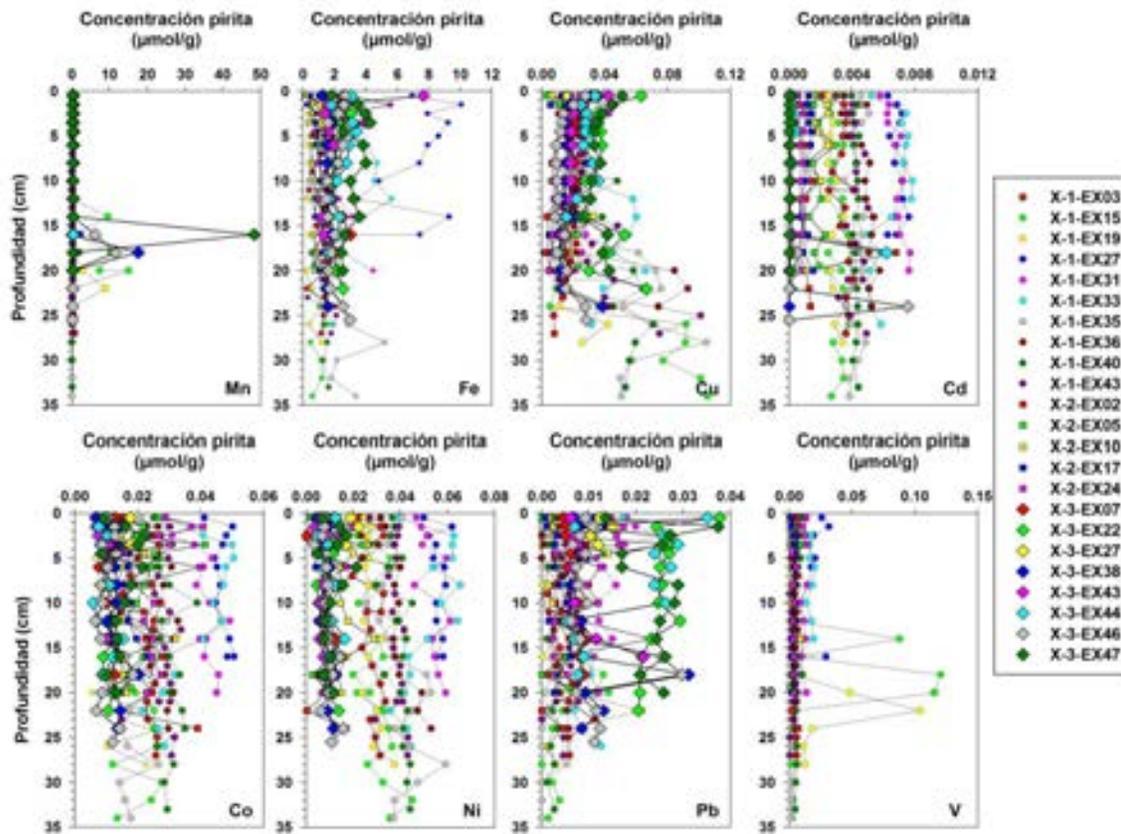


Figura 164. Perfiles de las concentraciones de metales asociados a la fracción pirita (Me_{pir}) para sedimentos de las diferentes estaciones del GM correspondientes a las tres campañas oceanográficas (XIXIMI-1, XIXIMI-2 y XIXIMI-3).

Los perfiles de DOP y de DTMP muestran que generalmente las estaciones X-1-EX31, X-1-EX27 y X-3-EX47 son las que, en promedio, presentan los mayores niveles de grado de piritización de metales traza (Figura 165). La presencia de valores elevados de DTMP y DOP en estas estaciones es una consecuencia de sus valores bajos de Me_{HCl} y altos de Me_{pir} que consistentemente fueron medidos para estas tres estaciones. Para el caso particular de XIXIMI-3, se puede observar que para casi todos los metales las estaciones X-3-EX47, X-3-EX27 y X-3-EX44 fueron las que consistentemente presentaron los valores promedio más elevados de DOP y de DTMP, mientras que los valores más bajos correspondieron a las estaciones X-3-EX07, X-3-EX38 y X-3-EX43 (Figura 166). La consistencia en valores elevados de DOP y DTMP de las estaciones X-1-EX31, X-1-EX27 y X-3-EX47 se puede ver más claramente en la Figura 166, en la cual se arreglaron las estaciones en orden creciente de DOP y DTMP. En esta figura también se puede observar que los únicos metales que llegaron a alcanzar valores promedio de piritización cercanos a 100% para algunas de las estaciones fueron el Fe, Pb, Cd y V. La Figura 167 muestra como, en general, los valores elevados de DOP corresponden con valores elevados de DTMP, indicando que la incorporación de metales traza a la pirita

aumenta conforme aumenta la piritización de los sedimentos, especialmente cuando los valores de DOP son cercanos al 100%. Esta tendencia se pudo observar en las estaciones de las 3 campañas XIXIMI-1, XIXIMI-2 y XIXIMI-3 (Figura 167).

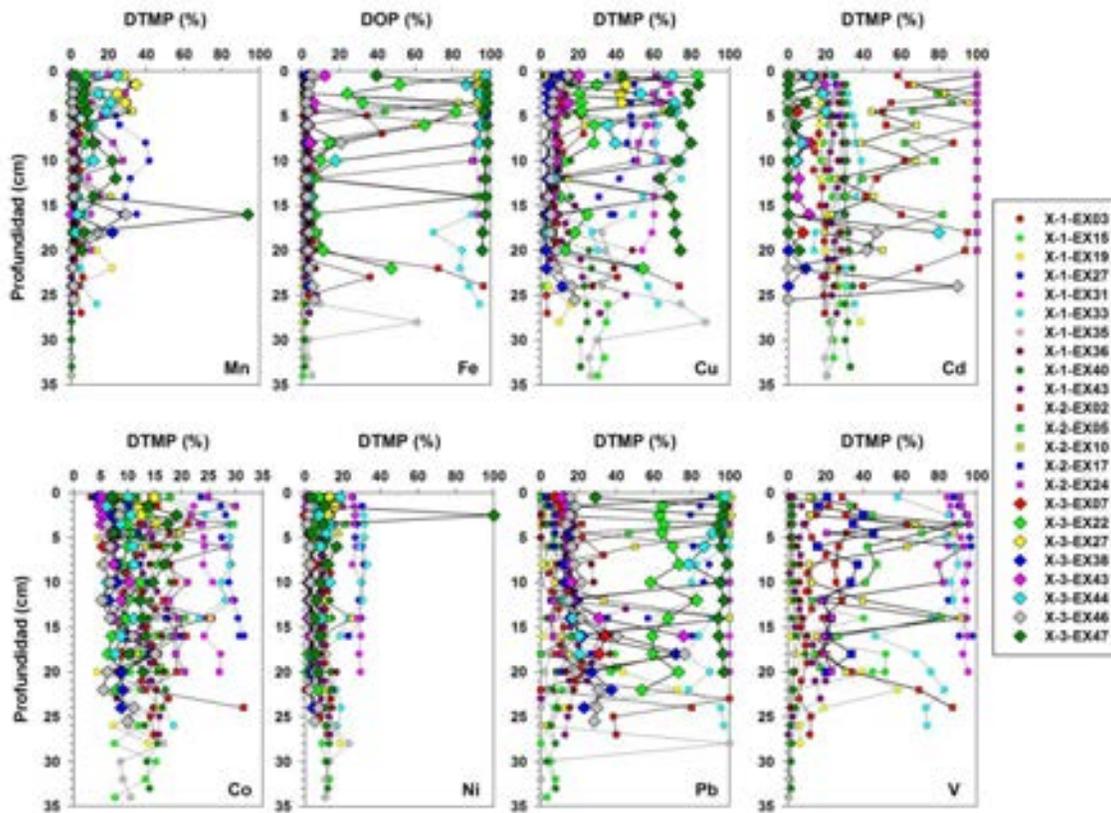


Figura 165. Perfiles de valores de grados de piritización (para Fe) y de grados de piritización de metales traza (para el resto de los elementos traza) para sedimentos de las diferentes estaciones del GM correspondientes a las tres campañas oceanográficas (XIXIMI-1, XIXIMI-2 y XIXIMI-3).

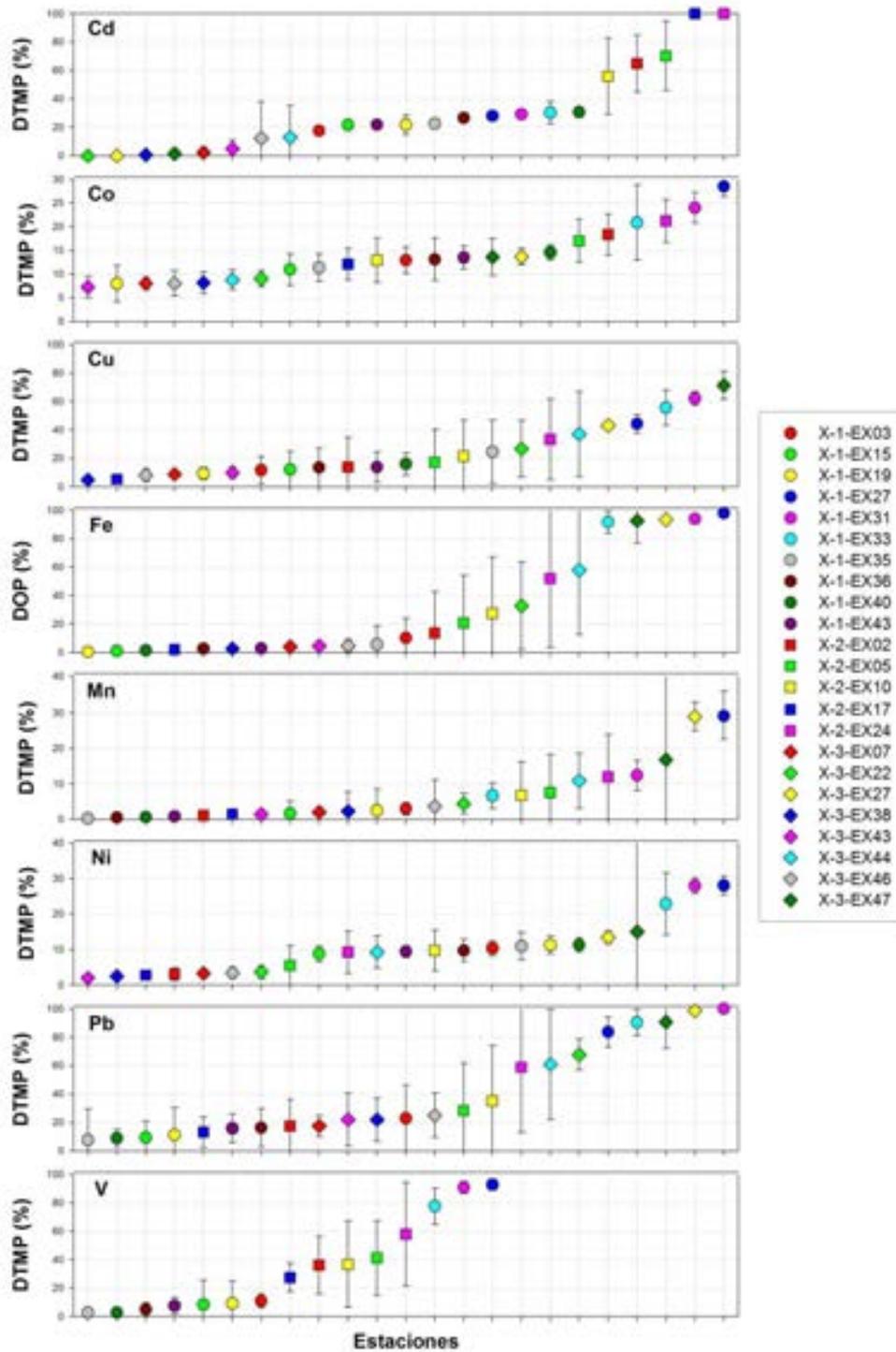


Figura 166. Valores promedio (\pm una desviación estándar) de grados de piritización (DOP) y grados de piritización de metales traza (DTMP) arreglados en orden creciente de magnitud para todas las estaciones correspondientes a las tres campañas oceanográficas (XIXIMI-1, XIXIMI-2 y XIXIMI-3).

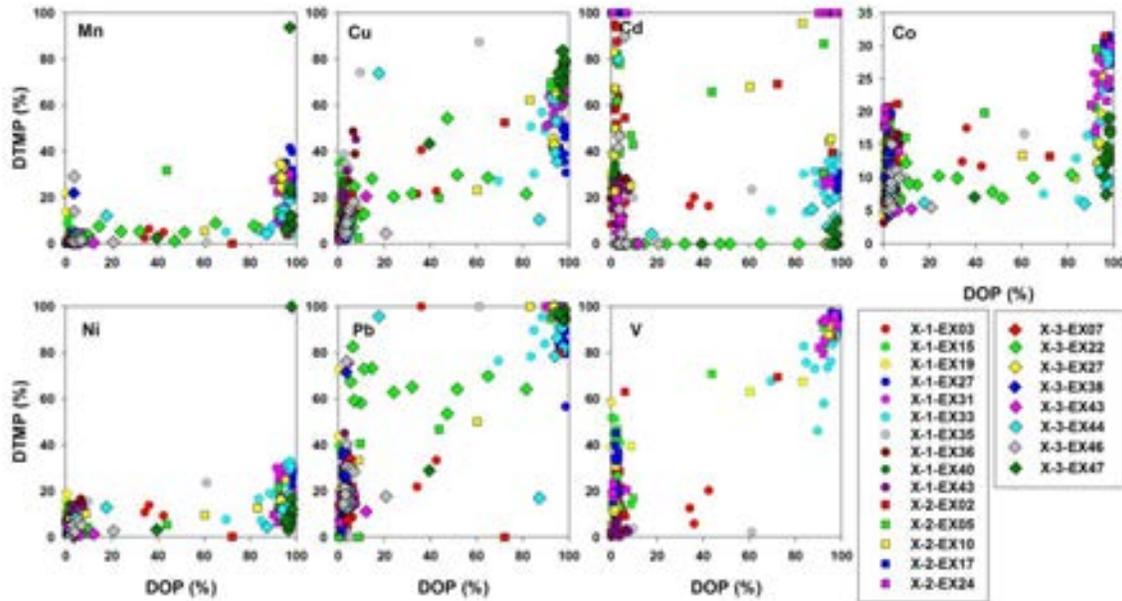


Figura 167. Grados de piritización (DOP) graficados contra los grados de piritización de metales traza (DTMP) para Mn, Cu, Cd, Co, Ni, Pb y V y para las diferentes estaciones muestreadas en el GM (campañas de XIXIMI-1, XIXIMI-2 y XIXIMI-3).

Los elevados porcentajes de DOP observados en las estaciones X-1-EX27, X-1-EX31, X-1-EX33, X-3-EX27, X-3-EX47 y, hasta cierto punto, X-2-EX24 y X-3-EX44 pueden ser ocasionados por: (1) La presencia de concentraciones elevadas de materia orgánica lábil (muy *poco probable* dada la profundidad a la que fueron recolectados los sedimentos y la escasa materia orgánica exportada desde la superficie); (2) por la falta de Fe reactivo, representado en este caso por la suma de $Me_{HCl} + Me_{pir}$ (*probable*); (3) debido a la dilución por carbonatos o por aportes terrígenos al sedimento (*probable*). Las siete estaciones que mostraron los valores más elevados de DOP y de DTMP fueron X-2-EX24 y X-3-EX44, o en el talud N de la de la Península de Yucatán, X-1-EX27, X-1-EX31, X-1-EX33, X-3-EX27, X-3-EX47. Estas estaciones tienen sedimentos con elevadas concentraciones de carbonato de calcio (rango de 47 ± 3 a $75 \pm 3\%$, estaciones X-1-EX33 y X-1-EX27, respectivamente) de acuerdo a Juan Carlos Herguera (comunicación personal). Como comparación, los sedimentos recolectados en en la llanura abisal presentaron menores concentraciones promedio de $CaCO_3$. entre 20 ± 1 y $37 \pm 2\%$ (Juan Carlos Herguera, comunicación personal). El carbonato de calcio actúa como diluyente en los sedimentos, disminuyendo la concentración de Fe (*i.e.*, Fe_{HCl}) y del carbono orgánico disponible para la formación de pirita (Berner, 1984). Combinando los valores de DOP con los de carbonato (Figura 168) se puede apreciar que los valores promedio más elevados de DOP (92 ± 8 , 94 ± 1 y $98 \pm 1\%$ para las estaciones X-1-EX33, X-1-EX31 y X-1-EX27, respectivamente) corresponden a las menores concentraciones de Fe_{HCl} (0.14 ± 0.01 , 0.15 ± 0.02 y $0.21 \pm 0.17 \mu mol g^{-1}$ para las estaciones X-1-EX27, X-1-EX31 y X-1-EX33, respectivamente) y con los contenidos más elevados de

carbonato de calcio. Sin embargo, es muy posible que los valores bajos de DOP (0.34 ± 0.16 a $10 \pm 14\%$) para las estaciones de aguas profundas (E19, E15, E40, E17, E36, E38, E43, E07, E43, E46, E35 y E03) sea una consecuencia de la falta de materia orgánica lábil. La materia orgánica que llega a la superficie del sedimento, después de viajar a lo largo de la columna de agua desde la zona fótica, es sumamente refractaria ya que fue considerablemente mineralizada durante su largo viaje desde la superficie del mar (Hedges et al., 1999). Una vez en la superficie del sedimento y dadas las relativamente bajas tasas de sedimentación presentes en los sedimentos de aguas profundas, la materia orgánica está sujeta a degradación adicional durante su estancia en la parte superficial de los sedimentos, entre cientos a mil años, ya que se encuentra en contacto permanente con las aguas oxigenadas sobreyacentes (Hedges et al., 1999). Nuestros resultados muestran, por un lado, la existencia de sedimentos altamente piritizados como consecuencia de la dilución de sus contenidos de Fe reactivo y materia orgánica lábil por los carbonatos y, por otro lado, la existencia de sedimentos poco piritizados (a pesar de la abundancia de Fe reactivo) como consecuencia de la falta de materia orgánica lábil en los sedimentos profundos. Sin embargo, es importante enfatizar que, a pesar del efecto de dilución producido por el aporte de carbonatos, los sedimentos recolectados en el talud N de Yucatán muestran concentraciones que son significativamente más elevadas que las medidas en los sedimentos profundos (Figura 169).

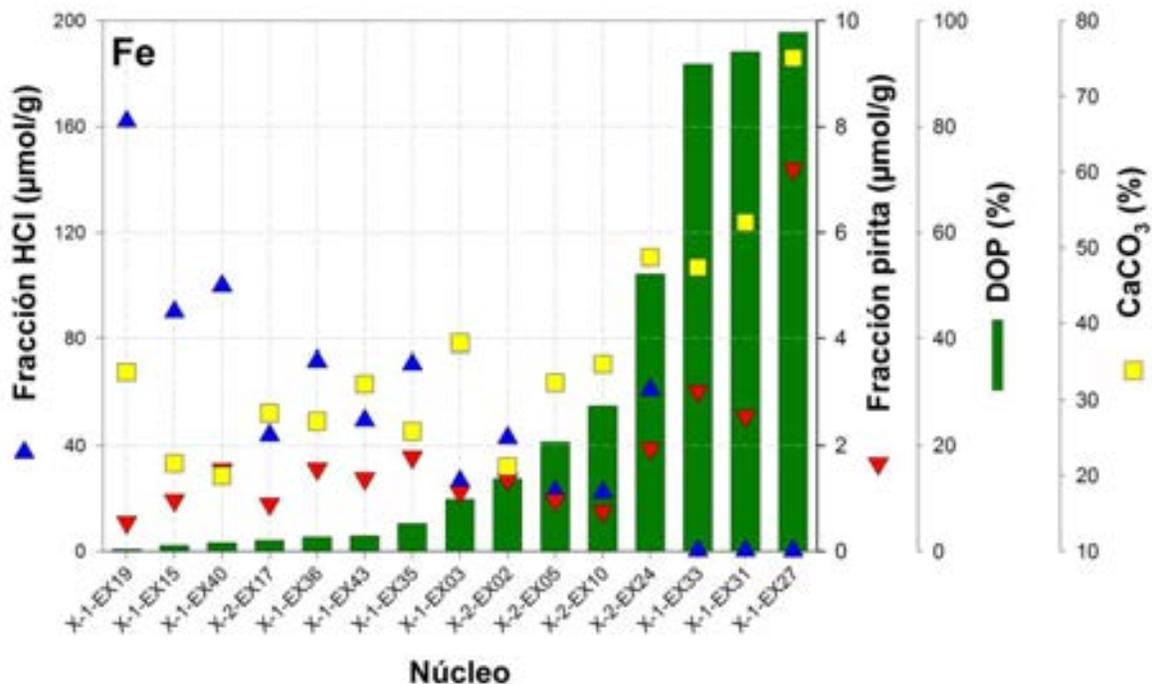


Figura 168. Valores promedio de las concentraciones de carbonato de calcio (datos proporcionados por Juan Carlos Herguera) y hierro en las fracciones HCl y pirita, así como los valores promedio de grados de piritización (DOP) correspondientes a las diferentes estaciones del GM recolectadas durante los cruceros XIXIMI-1 y XIXIMI-2 únicamente. Las barras de error se omitieron para una mayor claridad. Los datos fueron ordenados en orden de DOP creciente.

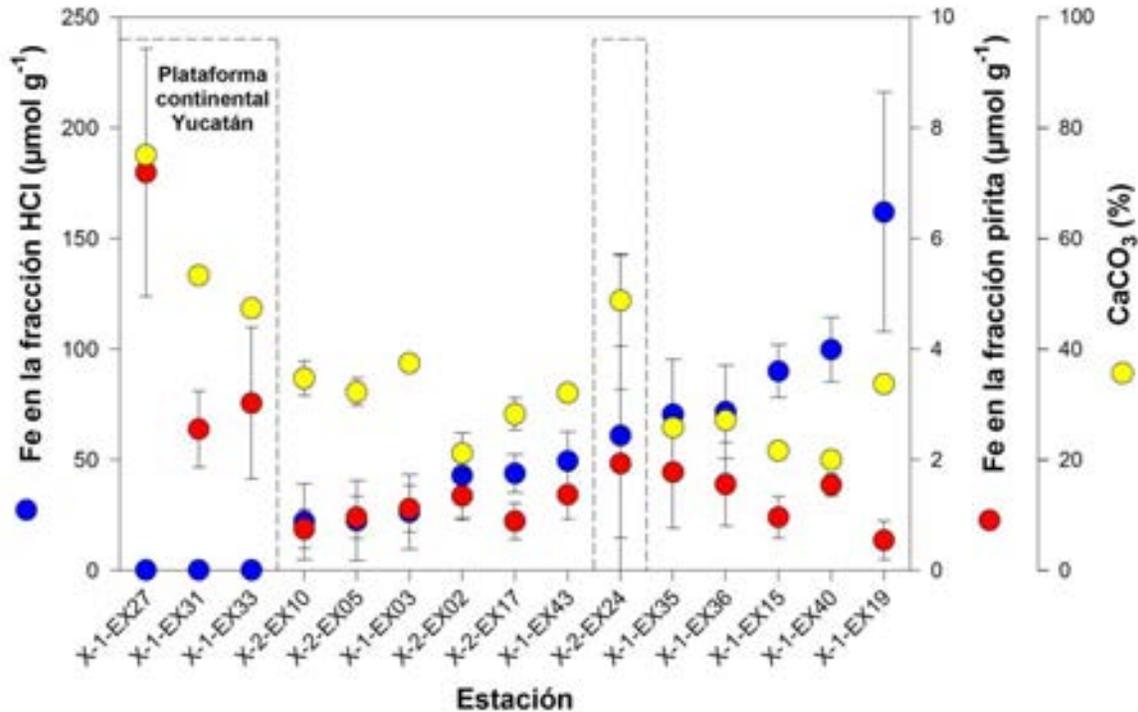


Figura 169. Valores promedio de carbonato de calcio (datos proporcionados por Juan Carlos Herguera) y de las fracciones HCl y pirita para las diferentes estaciones del GM recolectadas durante los cruceros XIXIMI-1 y XIXIMI-2. Las estaciones recolectadas cerca de o en el talud de la Península de Yucatán se encuentran comprendidas dentro de las áreas demarcadas por las líneas discontinuas.

La relación significativa obtenida entre las concentraciones promedio de la fracción HCl y las de la fracción pirita que fue observada para las estaciones de los cruceros XIXIMI-1 y XIXIMI-2 también se conservó para las estaciones combinadas de estos cruceros y XIXIMI-3, como se puede observar en la Figura 170, en donde se graficó el logaritmo de las concentraciones de ambas fracciones. Se utilizó el logaritmo de las concentraciones debido al amplio rango de concentraciones involucradas, que abarcaron, en algunos casos, hasta un poco más de seis órdenes de magnitud (Figura 170). La linealización utilizando todas las estaciones fue altamente significativa ($r^2 = 0.64$, $n = 158$, $p \leq 0.001$) y dio como resultado la siguiente ecuación:

$$\log(\text{Me}_{\text{pir}}) = (0.640 \pm 0.039)\log(\text{Me}_{\text{HCl}}) - (1.085 \pm 0.056) \quad (3)$$

La ecuación (3) nos indica que existe una importante dispersión en los valores de los metales traza, lo que sugiere la existencia de una elevada heterogeneidad en los ambientes sedimentarios del GM. Los resultados obtenidos sugieren que los valores medidos de Fe pirítico y Fe-HCl (y metales traza asociados) corresponden a lo que podríamos denominar como línea base de metales y elementos traza reactivos para los diferentes ambientes sedimentarios del GM. También se puede observar en la Figura

171 que los valores promedio de Fe pirítico tienen un rango muy restringido de valores, abarcando en general de 0.55 ± 0.35 a $3.18 \pm 0.74 \mu\text{mol g}^{-1}$. Este estrecho rango de valores sencillamente refleja las limitaciones en la producción de pirita autigénica producidas por las bajas concentraciones de Fe reactivo (para los sedimentos carbonatados) y la poca labilidad de la materia orgánica (para los otros sedimentos).

Como se mencionó en los dos informes anteriores, las concentraciones de los metales traza en los sedimentos profundos del GM son extraordinariamente bajas cuando se les compara con sedimentos de otras regiones oceánicas o incluso con las zonas costeras del mismo GM. La inclusión de las nuevas estaciones obtenidas en XIXIMI-3 no modificó los resultados mostrados en la Figura 172, en donde las concentraciones máximas de Fe pirítico son comparadas con valores máximos de otras zonas del GM y con sedimentos de otras regiones oceánicas. De hecho, algunos de los valores máximos de Fe pirítico obtenidos en XIXIMI-2 y XIXIMI-3 fueron menores a los obtenidos en XIXIMI-1. La Figura 172 nos muestra que el valor máximo de Fe pirítico medido en nuestra zona de estudio fue sumamente bajo ($10.1 \mu\text{mol g}^{-1}$) comparado con los otros ambientes sedimentarios. De hecho esta característica se puede extender a los otros metales traza, lo que indica que la línea base de estos elementos en los sedimentos profundos del GM también es sumamente baja en relación a otros sedimentos oceánicos.

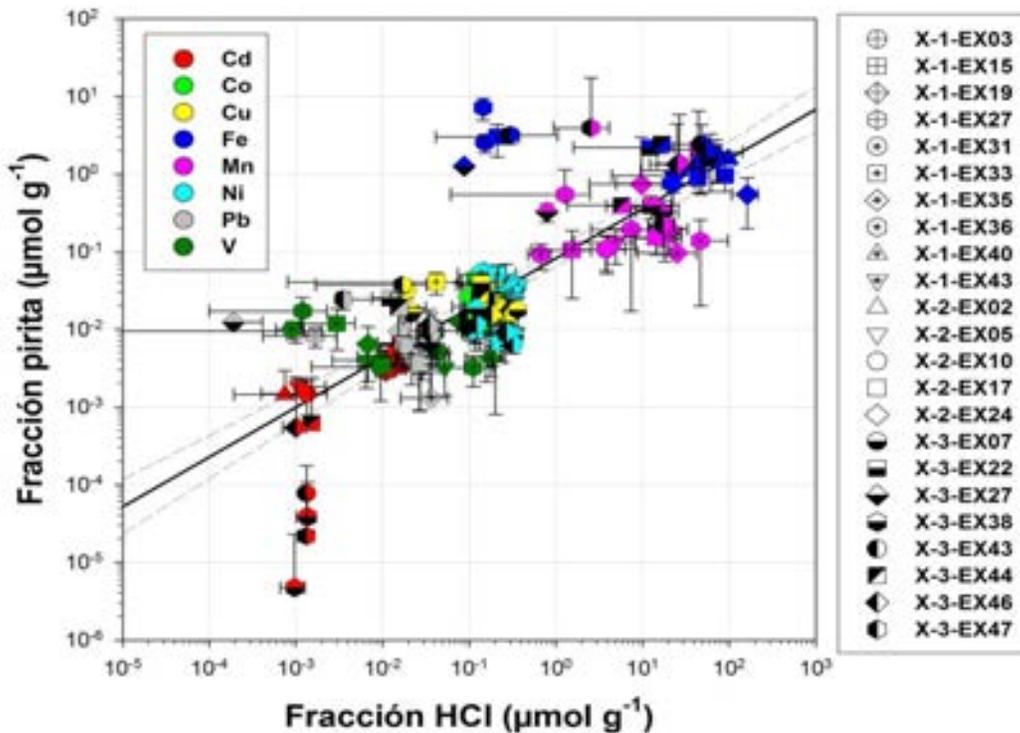


Figura 170. Valores promedio de las concentraciones metales traza en las fracciones HCl y pirita correspondientes a las diferentes estaciones del GM. Nótese la escala logarítmica en ambos ejes de la gráfica.

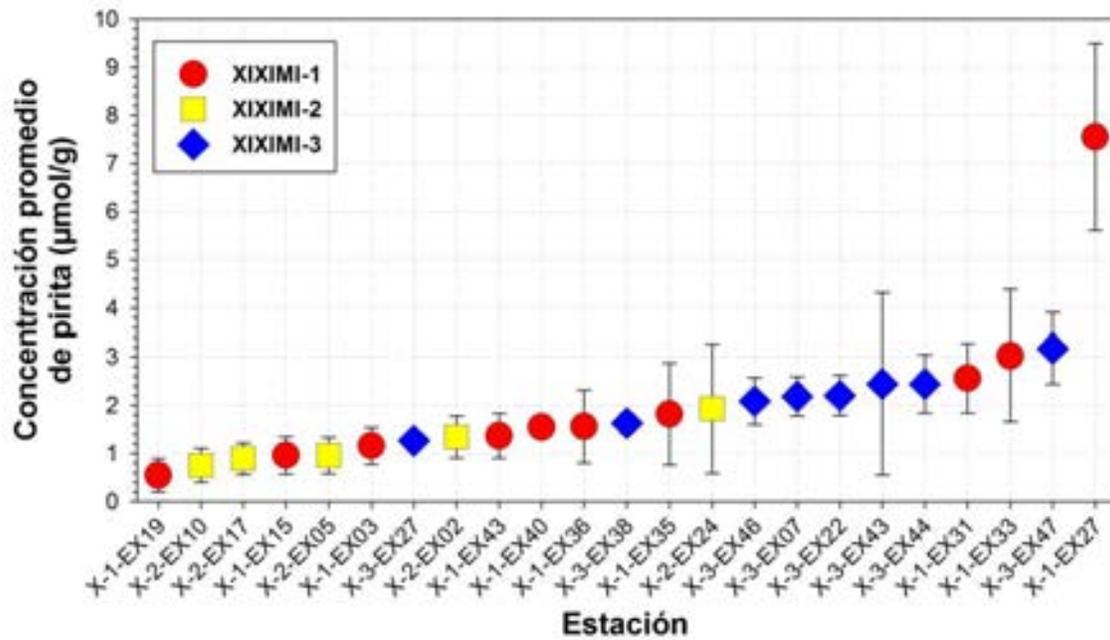


Figura 171. Valores promedio de Fe pirítico arreglados en orden creciente de concentración para todas las estaciones de las tres campañas oceanográficas (XIXIMI-1, XIXIMI-2 y XIXIMI-3).

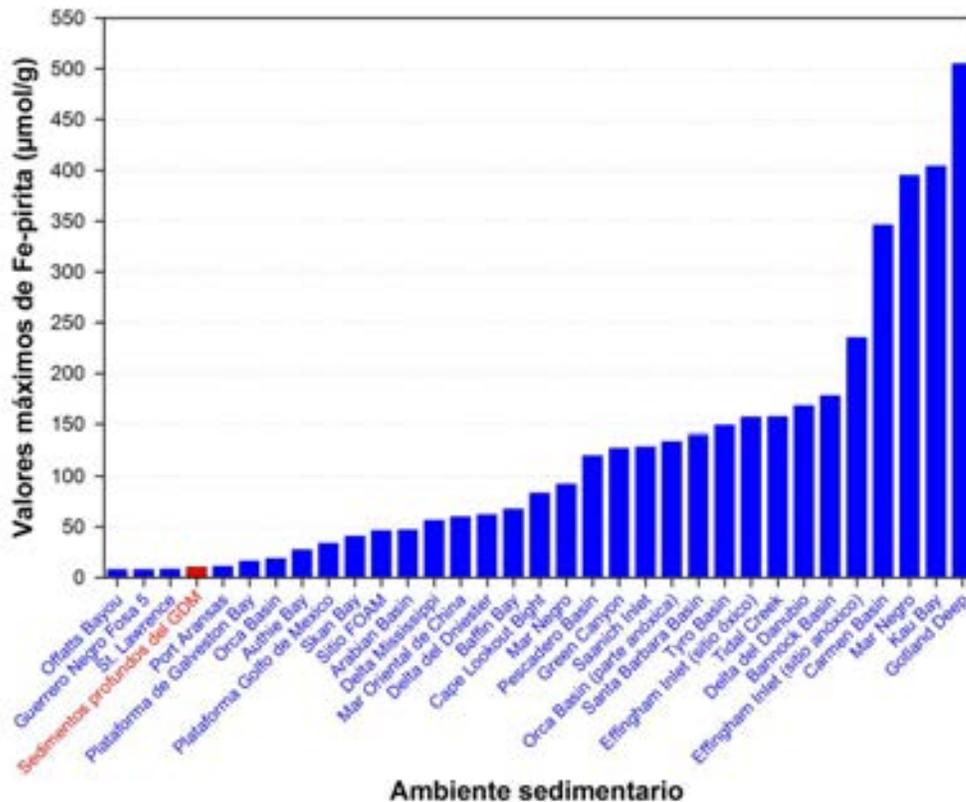


Figura 172. Valores máximos de las concentraciones de Fe pirítico en diferentes ambientes sedimentarios: Offatts Bayou, Port Aransas, plataforma de Galveston Bay, Orca Basin, plataforma GDM (GM), Skan Bay, Sitio FOAM, Delta Mississippi, Baffin Bay, Cape Lookout Bight, Saanich Inlet, Tidal Creek (Cooper y Morse, 1996); Guerrero Negro Fosa 5, (Huerta-Díaz et al., 2011); Green Canyon (derrame crónico de petróleo; Huerta-Díaz y Morse, 1992); St. Lawrence (Morse y Cornwell, 1987); Sedimentos profundos del GDM (este estudio); Authie Bay (norte de Francia; Billon et al., 2001); Arabian Basin (núcleo 484BC; Passier et al., 1997); Mar Oriental de China (Lin et al., 2000); Delta del Dniester (Wijsman et al., 2001); Mar Negro (Lyons, 1997); Pescadero Basin (Golfo de California; Goldhaber y Kaplan, 1980); Orca Basin (parte anóxica; Hurtgen et al., 1999); Santa Barbara Basin (Kaplan et al., 1963); Tyro Basin (Mar Mediterráneo, sulfídico, hipersalino; Henneke et al., 1997); Effingham Inlet (sitio óxico, Hurtgen et al., 1999); Delta del Danubio (Wijsman et al., 2001); Bannock Basin (Mar Mediterráneo, sulfídico, hipersalino; Henneke et al., 1997); Effingham Inlet (sitio anóxico; Hurtgen et al., 1999); Carmen Basin (Golfo de California; Goldhaber y Kaplan, 1980); Mar Negro (Wijsman et al., 2001); Kau Bay (Middelburg, 1991); Gotland Deep (Mar Báltico; Boesen y Postma, 1988). El valor máximo mostrado para los sedimentos profundos del GM corresponde a la estación E27 ($10.1 \mu\text{mol g}^{-1}$), recolectada en el crucero XIXIMI-1.

Conclusiones

Las conclusiones a las que se llegó en base a los datos obtenidos con la adición de los sedimentos recolectados en XIXIMI-3 son esencialmente las mismas que se obtuvieron con los resultados de XIXIMI-1 y XIXIMI-2:

Las concentraciones de las fracciones HCl, pirita y los valores de DOP y DTMP sugieren dos tipos de limitaciones en la formación de pirita en los sedimentos:

- a) Limitación por disponibilidad de Fe lábil representado por las concentraciones de Fe_{HCl} en los sedimentos carbonatados.
- b) Limitación por la disponibilidad de materia orgánica lábil para el resto de los núcleos de la llanura abisal del GDM.

La abundancia de metales traza reactivos (Me_{HCl}) en los sedimentos limitados por materia orgánica lábil sugiere que los aportes de petróleo, que representarían materia orgánica reactiva, en principio podrían incrementar las concentraciones de pirita en los sedimentos. Este incremento podría propiciar un incremento en las concentraciones de metales traza asociados a este mineral (Me_{pir}) y, por ende en los grados piritización de metales traza.

Las concentraciones medidas de Fe asociado a la fracción pirita son sumamente bajas cuando se las compara con las reportadas para otros ambientes sedimentarios marinos, tanto del GDM como de otras zonas geográficas.

La dispersión observada en los valores promedio de metales asociados a las fracciones HCl y pirita indica la existencia de diferentes ambientes en los sedimentos profundos del GM.

Recomendaciones

Los resultados obtenidos indican que el tipo de sedimento más sensible a los efectos ocasionados por un posible derrame de petróleo sería el carbonatado, el cual de manera natural posee contenidos bajos de materia orgánica lábil y Fe reactivo. Dada la dificultad y costo asociado a la recolección de núcleos de sedimentos profundos, el monitoreo de metales traza en sedimentos carbonatados parece ser la opción más adecuada para la implementación de un Programa Nacional de Monitoreo y para la obtención de un marco de referencia a través de la elaboración de líneas base de metales traza en sedimentos del GM.

Referencias

- Belzile N., De Vitre R.R. y Tessier A. (1989) *In situ* collection of diagenetic iron and manganese oxyhydroxides from natural sediments. *Nature* 340, 376-377.
- Berner R.A. (1964) Stability fields of iron minerals in anaerobic marine sediments. *J. Geol.* 72, 826-834.

- Berner R.A. (1970) Sedimentary pyrite formation. *Amer. J. Sci.* 268, 1-23.
- Berner R.A. (1980) A rate model for organic matter decomposition during bacterial sulfate reduction in marine sediments. In: *Colloques Internationaux du C.N.R.S., No. 293 - Biogéochimie de la Matière Organique à L'interface Eau-Sédiment Marin*, pp. 35-44.
- Berner R.A. (1981) Authigenic mineral formation resulting from organic matter decomposition in modern sediments. *Fortsch. Miner.* 59, 117-135.
- Bindler R., Renberg I., Anderson N.J., Appleby P.G., Emteryd O. y Boyle J. (2001) Pb isotope ratios of lake sediments in West Greenland: inferences on pollution sources. *Atmos. Environ.* 35, 4675-4685.
- Berner R.A. (1984) Sedimentary pyrite formation: An update. *Geochim. Cosmochim. Acta* 48, 605-615.
- Billon G., Ouddane B. y Boughriet A. (2001) Chemical speciation of sulfur compounds in surface sediments from three bays (Fresnaye, Seine and Authie) in northern France, and identification of some factors controlling their generation. *Talanta* 53, 971-981.
- Boesen C. y Postma D. (1988) Pyrite formation in anoxic environments of the Baltic. *Amer. J. Sci.* 288, 575-603.
- Cooper D.C. y Morse J.W. (1996) The chemistry of Offatts Bayou, Texas: A seasonally highly sulfidic basin. *Estuaries* 19, 595-611.
- Goldhaber M.B. y Kaplan I.R. (1980) Mechanisms of sulfur incorporation and isotope fractionation during early diagenesis in sediments of the Gulf of California. *Mar. Chem.* 9, 95-143.
- Hedges J.I., Hu F.S., Devol A.H., Hartnett H.E., Tsamakis E. y Keil R.G. (1999) Sedimentary organic matter preservation: a test for selective degradation under oxic conditions. *Am. J. Sci.* 299, 529-555.
- Henneke E., Luther G.W., III, de Lange G.J. y Hoefs J. (1997) Sulphur speciation in anoxic hypersaline sediments from the eastern Mediterranean Sea. *Geochim. Cosmochim. Acta* 61, 307-321.
- Huerta-Diaz M.A. y Morse J.W. (1990) A quantitative method for determination of trace metal concentrations in sedimentary pyrite. *Mar. Chem.* 29, 119-144.
- Huerta-Diaz M.A. y Morse J.W. (1992) Pyritization of trace metals in anoxic marine sediments. *Geochim. Cosmochim. Acta* 56, 2681-2702.

- Huerta-Diaz M.A., Carignan R. y Tessier A. (1993) Measurement of trace metals associated with acid volatile sulfides and pyrite in organic freshwater sediments. *Environ. Sci. Technol.* 27, 2367-2372.
- Huerta-Diaz M.A., Tessier A. y Carignan R. (1998) Geochemistry of trace metals associated with reduced sulfur in freshwater sediments. *Appl. Geochem.* 13, 213-233.
- Huerta-Diaz M.A., Delgadillo-Hinojosa F., Otero X.L., Hernandez-Ayon J.M., Segovia-Zavala J.A., Galindo-Bect M.S. y Amaro-Franco E. (2011) Iron and trace metals in microbial mats and underlying sediments: results from Guerrero Negro saltern, Baja California Sur, Mexico. *Aquat. Geochem.* 17, 603-628.
- Hurtgen M.T., Lyons T.W., Ingall E.D. y Cruse A.M. (1999) Anomalous enrichments of iron monosulfide in euxinic marine sediments and the role of H₂S in iron sulfide transformations: Examples from Effingham Inlet, Orca Basin, and the Black Sea. *Am. J. Sci.* 299, 556-588.
- Jacobs L., Emerson S. y Huested S.S. (1987) Trace metal geochemistry in the Cariaco Trench. *Deep-Sea Res.* 34, 965-981.
- Jenne E.A. (1968) Controls on Mn, Fe, Co, Ni, Cu, and Zn concentrations in soils and water: the significant role of hydrous Mn and Fe oxides. In: Gould R.F. (ed.) *Trace Inorganics in Water*. Adv. Chem. Ser. 73, pp. 337-387.
- Jenne E.A. (1977) Trace element sorption by sediments and soil-sites and processes. In: Chappel W. y Petersen K. (eds.) *Symposium on Molybdenum in the Environment*. Marcel Dekker, pp. 425-453.
- Kaplan I.R., Emery K.O. y Rittenberg S.G. (1963) The distribution and isotopic abundance of sulfur in recent marine sediments off southern California. *Geochim. Cosmochim. Acta* 27, 297-331.
- Lin S., Huang K.-M. y Chen S.-K. (2000) Organic carbon deposition and its control on iron sulfide formation of the southern East China Sea continental shelf sediments. *Continental Shelf Res.* 20, 619-635.
- Lion L.W., Altmann R.S. y Leckie J.O. (1982) Trace-metal adsorption characteristics of estuarine particulate matter: evaluation of contributions of Fe/Mn oxide and organic surface coatings. *Environ. Sci. Technol.* 16, 660-666.

- Lyons T.W. (1997) Sulfur isotopic trends and pathways of iron sulfide formation in upper holocene sediments of the anoxic Black Sea. *Geochim. Cosmochim. Acta* 61, 3367-3382.
- Middelburg J.J. (1991) Organic carbon, sulfur, and iron in recent semi-euxinic sediments of Kau bay, Indonesia. *Geochim. Cosmochim. Acta* 55, 815-828.
- Morse J.W. y Arakaki T. (1993) Adsorption and coprecipitation of divalent metals with mackinawite (FeS). *Geochim. Cosmochim. Acta* 57, 3635-3640.
- Morse J.W. y Cornwell J.C. (1987) Analysis and distribution of iron sulfide minerals in recent anoxic marine sediments. *Mar. Chem.* 22, 55-69.
- Passier H.F., Luther G.W., III y De Lange G.J. (1997) Early diagenesis and sulphur speciation in sediments of the Oman Margin, northwestern Arabian Sea. *Deep-Sea Res. Part-II* 44, 1361-1380.
- Wijsman J.W.M., Middelburg J.J. y Heip C.H.R. (2001) Reactive iron in Black Sea Sediments: Implications for iron cycling. *Mar. Geol.* 172, 167-180.

Glosario de términos

DOP: Grado de piritización. Indica el porcentaje de Fe reactivo (Fe_{FR}) que se encuentra en forma del mineral pirita.

DTMP: Grado de piritización de metal traza. Indica el porcentaje de metal (Me) reactivo (Me_{FR}) que se encuentra asociado al mineral pirita.

Me_{pir} : Metal asociado a la fracción pirita.

Me_{HCl} : Metal asociado a la fracción HCl (incluye carbonatos, óxidos de Fe y Mn, y monosulfuros de hierro) el cual eventualmente puede ser transformado por procesos diagenéticos a Me_{pir} .

Me_{FR} : Metal asociado a la fracción reactiva y definido como la suma de $Me_{HCl} + Me_{pir}$.

Créditos

La parte analítica de este trabajo contó con la ayuda de la M.C. Gabriela Cervantes Díaz y la asesoría del Oc. Arturo Siqueiros Valencia. Los datos de porcentaje de carbonato fueron proporcionados amablemente por el Dr. Juan Carlos Herguera de CICESE.

ESTUDIO FAUNÍSTICO DE LA MEIOFAUNA (TAXONOMÍA)

Responsable: Dr. Axayácatl Rocha, CICESE

Participantes: José Alejandro Cisterna, Mirayana Marcelino Barros, Ivonne Martínez Mendoza, CICESE

Antecedentes

A pesar de que desempeña un papel clave en el funcionamiento ecosistémico, la fauna meiobéntica del mar profundo es una de las comunidades marinas menos estudiadas. Entre sus funciones fundamentales se encuentran su participación en los ciclos biogeoquímicos globales, en la estabilidad del sedimentos marinos, diagénesis de la materia orgánica y presupuesto de carbono del mar profundo (Baguley et al. 2008). Además, estas comunidades representan una herramienta muy importante, debido a que son utilizadas como bioindicadores de disturbios, ambientales (Street et al. 1998; Boyd et al. 2000; Rocha-Olivares et al. 2004). Por lo tanto, caracterizar su biodiversidad, y su dinámica espacio-temporal, representa un nicho de investigación muy amplio y necesario para alcanzar un mayor entendimiento sobre los procesos mencionados anteriormente.

Los estudios sobre comunidades bentónicas del mar profundo del GM se han desarrollado sobre la infauna del mar patrimonial de E.U.A. (Baguley et al. 2006a; Baguley et al. 2006b; Sharma et al. 2007; Baguley et al. 2008; Bernhard et al. 2008; Rowe et al. 2008; Cordes et al. 2009; Sharma et al. 2012). En comparación, los estudios que abarcan la fauna profunda de la ZEE mexicana del GM son escasos. Entre ellos, la mayoría se enfoca en la macrofauna (Escobar-Briones et al. 1999; Escobar-Briones et al. 2008a; Wei et al. 2012). Se han realizado varias tesis de grado como las de Hernández (1999), Muñiz (2001), Rodríguez (2003) y Alonso (2006). En estos trabajos se han identificado patrones ecológicos tales como el decremento en la densidad de la macrofauna béntica con la profundidad, asociándolo a la hidrodinámica, a la disponibilidad de alimento, a condiciones de hipoxia, a interacciones con la meiofauna, y al tipo de sedimento. Se ha observado también una disminución de la densidad con la profundidad y con respecto a la distancia de la costa (Velázquez 2005); éste patrón está relacionado con la disminución en la cantidad de materia orgánica que se observa desde la costa hacia la zona oceánica.

Son pocos los trabajos que se han realizado sobre la comunidad meiofaunística profunda del GM. Rowe y Menzel (1971) realizaron un estudio seminal sobre el talúd continental y en la planicie abisal frente al banco de Campeche (escarpe de Campeche) y frente a Florida (escarpe de Florida) (Figura 173), y observaron una fauna béntica profunda depauperada en comparación con la abundancia y diversidad de otras cuencas oceánicas. Se observó una disminución logarítmica de la biomasa infaunal (expresada en peso húmedo y seco, abundancia numérica, y carbono orgánico) con la profundidad, que fue interpretada como resultado de la pérdida considerable de energía a lo largo de

la trama trófica de la columna de agua. Un par de décadas después, Escobar-Briones et al. (1997) realizaron un estudio comparativo de la densidad y biomasa de la meiofauna presente en la parte superior del talud continental en dos regiones del golfo (zona sedimentaria frente a Tamaulipas y Veracruz y frente al escarpe de Campeche), encontrando una mucho mayor abundancia y densidad en los fondos sedimentarios frente a las costas de Tamaulipas. También reconocieron diferencias en la composición taxonómica entre los sectores occidental (dominado por aportes terrígenos) y sur (dominados por sedimentos carbonatados). Salas (2001) analizó el patrón de distribución de la biomasa y densidad de la meiofauna a lo largo del gradiente batimétrico (21 a 2230 m) en el suroeste del GM. En el plano espacial reconoció variación de los promedios de densidad y biomasa de este a oeste, vinculándolo a producción local de la superficie y su contribución al fondo, así como a lo largo del gradiente latitudinal

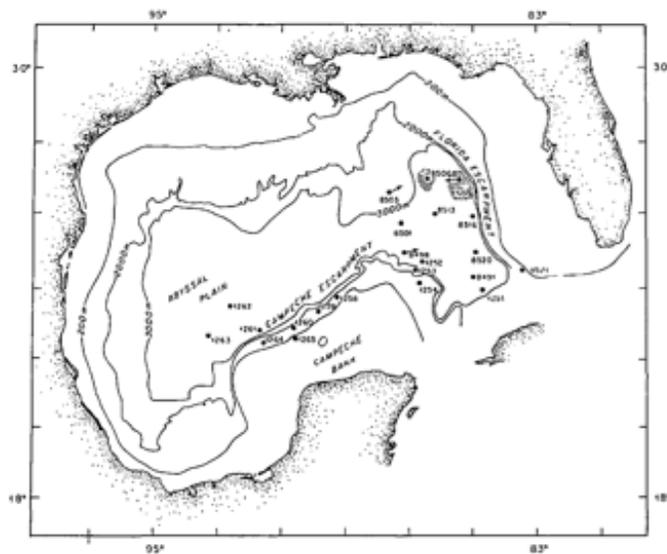


Figura 173. Red de estaciones estudiadas por Rowe y Menzel(1971) en su estudio seminal de la meiofauna profunda del G.M.

Baguley et al. (2006a) realizaron un estudio en el talud continental de la sección norte del GM con algunas estaciones en la planicie abisal (Figura 174). En ese trabajo se correlacionó la abundancia de la meiofauna con variables medioambientales, encontrando que la abundancia de ese componente infáunico varió longitudinalmente en respuesta a una fuerte influencia del río Mississippi, además de la profundidad. Se encontró que el efluente del río Mississippi altera las características sedimentarias locales, y que interactúa tanto con los eddies producidos por la corriente del Lazo como con la topografía dinámica del talud continental, lo cual incrementa los flujos de materia orgánica hacia el sedimento en la región noreste y crea regiones con una mayor abundancia meiofáunica que en otras zonas del golfo. En un estudio más funcional de esas mismas comunidades meiofáunicas, Baguley et al. (2008) analizaron la dinámica y flujos energéticos asociados a la micro- y meiofauna de la región. Encontraron que la biomasa y respiración de la meiofauna disminuyó con la profundidad, mientras que las mayores biomásas y tasas respiratorias ocurrieron en el talud continental superior de la

Más recientemente, Landers et al. (2012) reportan los resultados de la abundancia meiofaunal de aguas de la plataforma y talud continentales (entre 29 y 509 m) registrada en cruceros realizados de 2007 a 2009 desde el sur de Texas al sur de Florida. La meiofauna fue extraída del sedimento con tamices de 63 μm y concentrada por centrifugación con Ludox. Se encontró que todos los años los grupos dominantes fueron nemátodos y copépodos, seguidos por poliquetos, nauplios, kinorhincos, larvas de priapúlidos, tardígrados y ácaros. Las abundancias de los nemátodos, copépodos, poliquetos y nauplios se encontraron correlacionadas positivamente entre si y la de todos los grupos mostró una tendencia a disminuir hacia el oeste. No se encontró correlación entre la abundancia de ningún grupo taxonómico con variables ambientales como salinidad, temperatura y profundidad; sin embargo, la distribución geográfica reveló un patrón espacial significativo, en el que la meiofauna fue más abundante en las muestras de Florida que en aquellas de la plataforma central y occidental.

Finalmente, Montagna et al. (2013) reportan sobre los efectos ecológicos del derrame petrolero de la plataforma Deepwater Horizon (DWH) en las comunidades de macro y meiofauna que se analizaron en cruceros realizados en otoño del 2010, el mismo año del derrame (abril 2010). Las muestras provinieron de estaciones posicionadas en un diseño radial a partir de DWH, la más profunda situada en el paralelo 27°N a 2750 m de profundidad. Utilizando análisis multivariados de las variables ambientales se realizó un mapeo espacial de la huella del derrame, encontrándose que las mayores reducciones en abundancia y diversidad de la fauna se extendieron a una distancia de 3 km a partir de la DWH en todas las direcciones, cubriendo un área de 24 km². Se observaron impactos moderados hasta 17 km hacia el suroeste y hasta 8.5 km hacia el noreste del derrame, cubriendo un área de 148 km². De relevancia para la evaluación del impacto del derrame es el hecho de que los efectos en el sistema béntico se correlacionaron con la cantidad total de hidrocarburos del petróleo, hidrocarburos aromáticos policíclicos, concentraciones de bario y distancia al DWH. Sin embargo, no hubo correlación con la distancia a chapopoterías naturales (“hydrocarbon seeps”). Por lo tanto, los autores consideraron que es más probable que los efectos sobre la comunidad béntica se deban al derrame petrolero y no a la presencia de hidrocarburos que emanan naturalmente de las chapopoterías.

Objetivos

La meiofauna representa la gran mayoría de la biodiversidad eucariótica que habita los sedimentos marinos. Estas comunidades llevan a cabo una variedad de funciones ecológicas claves que influyen sobre la biogeoquímica sedimentaria y el acoplamiento bento-pelágico. En este proyecto se planteó caracterizar a nivel de grandes grupos taxonómicos a la comunidad meio bentónica de 9 estaciones del GM a partir de núcleos obtenidos durante el crucero XIXIMI-3 por medio de métodos morfológicos tradicionales. Mediante esta caracterización se plantea:

1. Establecer una línea de base de la diversidad de la comunidad meiofaunística utilizando análisis faunísticos.

2. Monitorear los cambios en la comunidad bentónica de mar profundo e identificar zonas que pudiesen haber sido impactadas por la contaminación petrolera.

Metodología

Estrategia de muestreo

Se recolectaron muestras de sedimento en 9 estaciones de la campaña XIXIMI-3 (Figura 175).

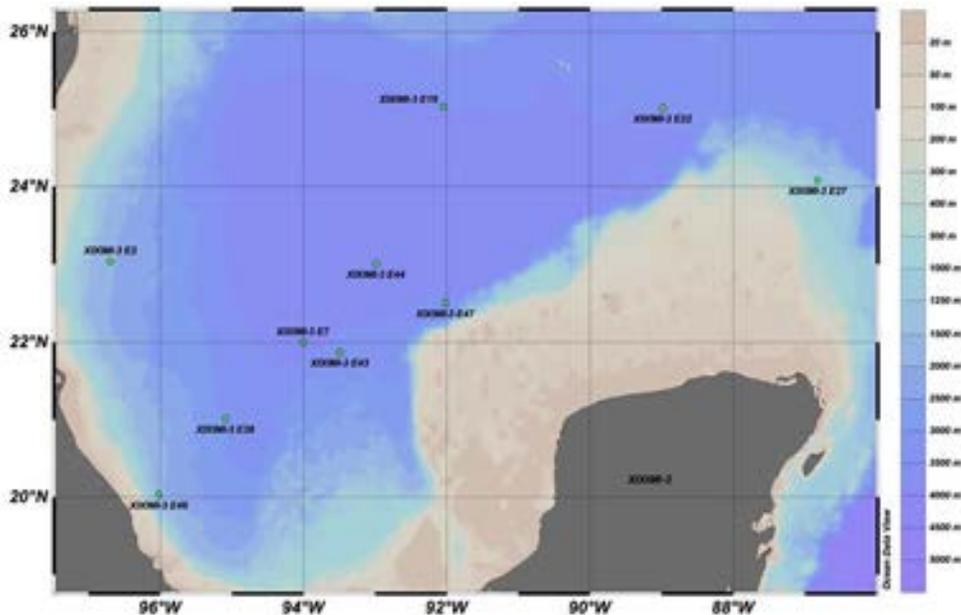


Figura 175. Localización de las estaciones del crucero XIXIMI-3 en donde se realizaron muestreos de sedimento.

De cada estación se obtuvieron muestras para tres tipos de análisis: (1) muestras para análisis morfológicos tradicionales fijados en formalina, (2) muestras para análisis genéticos moleculares fijados en solución DESS y (3) muestras que se congelaron para análisis metagenómicos. En este informe se reportan los resultados del análisis de las muestras fijadas en formalina obtenidas con ayuda de nucleadores con 10 cm de diámetro hasta una profundidad de 12 cm. El núcleo de sedimento se estratificó para analizar la estructura vertical de la comunidad. La estratificación se hizo en cuatro estratos superficiales de un cm seguidos por cuatro estratos de 2 cm hasta los 12 cm (estratos: 0-1, 1-2, 2-3, 3-4, 4-6, 6-8, 8-10 y 10-12 cm). Este diseño provee una mayor resolución en los niveles superficiales del sedimento donde ocurre la mayor parte de la biomasa infáunica (Gheskiere et al. 2004).

Métodos de laboratorio

Extracción de meiofauna

La extracción de la meiofauna (45 a 500 micras) del sedimento se hizo a través del método de flotación con sílica coloidal y tamizado, que permite recuperar arriba del 96% de la comunidad independientemente del tipo de sedimento (de Jonge and Bouwman 1977; Burgess 2001). Brevemente, el método consiste en:

- Enjuagado
- Tamizado
- Flotación en Ludox™ 50 (tres veces)
- Recuperación por tamizado (tres veces)
- Impregnación en glicerina
- Montaje de laminillas

En la extracción de la meiofauna se colaboró con el Dr. Juan Carlos Herguera para la extracción de los foraminíferos asociados al sedimento, los cuales serán analizados por él y que no se incluyen en esta sección del informe.

Cuantificación e identificación al microscopio

La cuantificación de la fauna incluida en este informe incluye el 100% de las estaciones y de los estratos. La identificación a grandes grupos taxonómicos se realizó conforme a Giere (1993). Los principales grupos taxonómicos que se encontraron son los que típicamente caracterizan a las comunidades meiofáunicas (p. ej., Smol et al. 1994).

Análisis de datos

Se realizaron análisis multivariados de escalamiento multidimensional (MDS, por sus siglas en inglés) con los datos de abundancia transformados ($\log(x+1)$) usando índices de similitud de Bray-Curtis (McGarigal et al. 2000) para determinar la similitud en la estructura de las comunidades. Para poder realizar una comparación entre los 3 cruceros de investigación, se utilizó el análisis propuesto por Micheli et al. (1999) el cual relaciona la variabilidad comunitaria agregada, utilizando el coeficiente de variación (C.V.) y la variabilidad comunitaria composicional, utilizando la distancia euclidiana media (D.E.). En este informe se relacionó el C.V., calculado como el promedio sobre la desviación estándar de la densidad meiofáunica total encontrada en las estaciones de

muestreo para cada crucero, y la D.E., calculada a partir de la abundancia relativa de cada grupo taxonómico en cada uno de los cruceros de investigación.

Resultados

Abundancia

En el tercer crucero realizado en el GM, XIXIMI-3, se recolectaron muestras en 9 estaciones distribuidas entre los 1240 y 3569 m de profundidad. Los valores de abundancia de la meiofauna variaron entre 136 y 389 inds. 10 cm^{-2} , con un promedio de 239 inds. 10 cm^{-2} . (Figura 176). La mayor abundancia, 389 inds. 10 cm^{-2} , ocurrió en la estación E27 (profundidad de 1240 m) y la menor, 136 inds. 10 cm^{-2} , en la estación E7 (profundidad de 3569 m). Tres de las 9 estaciones presentaron valores de abundancia cercanos al promedio (E22, E38 y E46). La estación E27 destacó por tener una abundancia mayor al promedio, mientras que el resto presentaron valores por debajo de este. También es posible observar que las estaciones que presentaron valores de abundancia cercanos al promedio forman una "línea divisoria" entre la estación de mayor y las de menor abundancia (Figura 176).

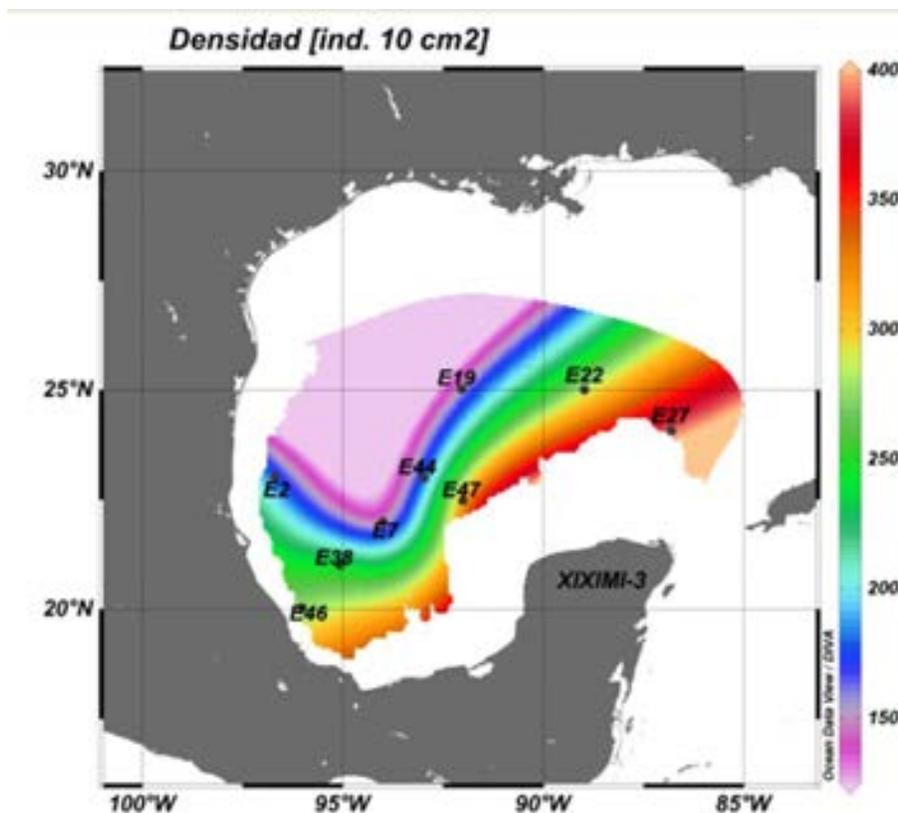


Figura 176. Abundancia de la meiofauna total en las estaciones del crucero XIXIMI-3.

Composición taxonómica

Se identificaron un total de 2770 organismos pertenecientes a un total de 11 taxa. El grupo Nematoda fue el dominante en todas las estaciones, representando el 82.27% del total de organismos identificados (Figura 177a). El segundo grupo fue Turbellaria que representó el 9.06% del total de organismos, seguido por Copepoda con un 7.6% del total. Los demás grupos en conjunto representaron el 1.08% de la meiofauna total (Figura 177a).

El mayor número de grupos meiofaunales se registró en la estación E27 (9 taxa), dentro de los cuales se encontraron 2 grupos que no se habían detectado previamente (Loricifera y Syncarida). Destaca la estación E19 en donde también se encontró un grupo meiofaunal nuevo (Tanaidacea) (Figura 177b).

Las estaciones E38, E7, E44 y E47 presentaron proporciones meiofaunales acordes con la composición total (Figura 177a); es decir, Nematoda, seguida de Turbellaria y luego Copepoda. Sin embargo, en las estaciones E46, E2, E19, E22 y E27, el segundo grupo mayoritario fue Copepoda seguido de Turbellaria (Figura 177b).

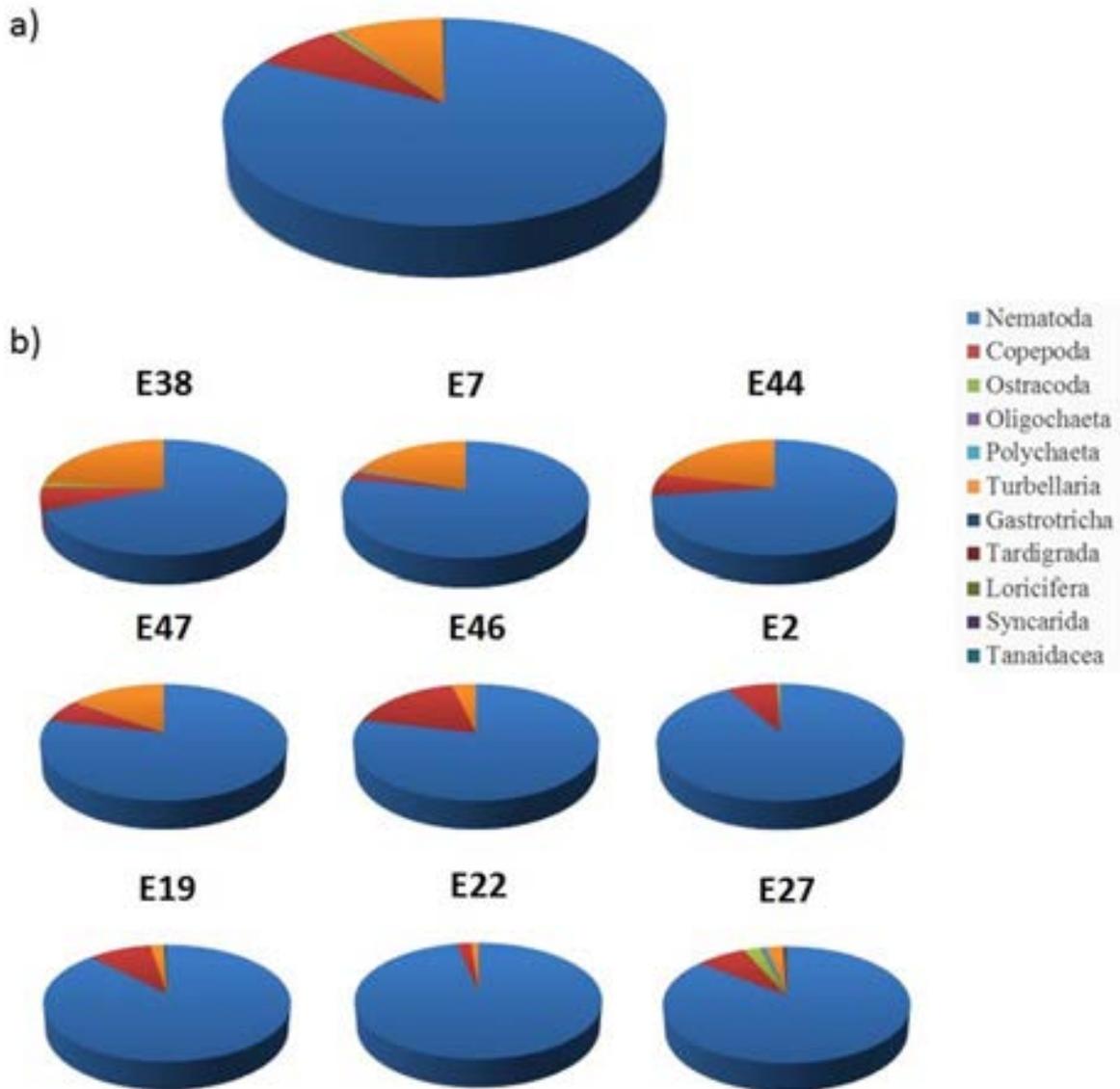


Figura 177. Composición taxonómica de la meiofauna recolectada en la campaña XIXIMI-3. a) Composición total de la meiofauna, b) Composición de la meiofauna en cada estación visitada.

Distribución espacial

Los resultados del análisis MDS indicaron una diferenciación entre todas las estaciones, y esta distribución espacial parece reflejar un patrón geográfico. Las únicas estaciones que formaron un conglomerado en el diagrama bidimensional y que presentaron cercanía geográfica fueron las estaciones E47 y E44 (Figura 178).

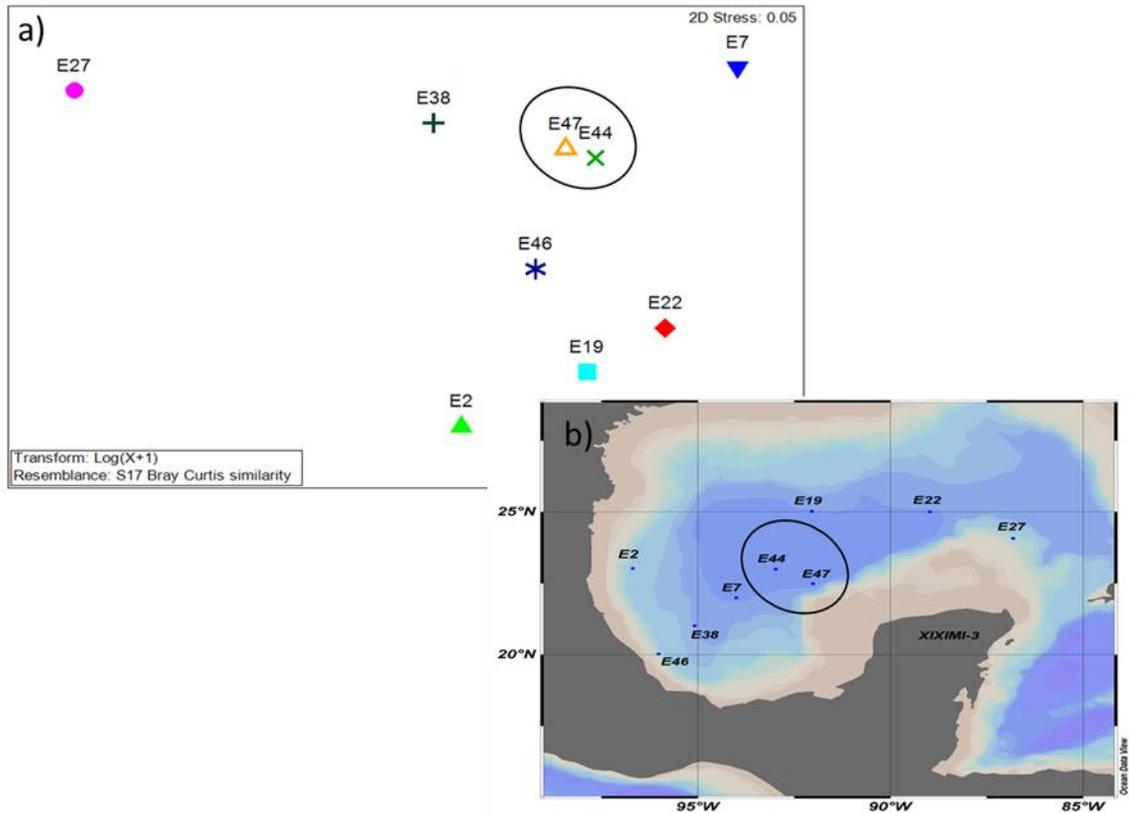


Figura 178. Patrones de la meiofauna recolectada en la campaña XIXIMI-3. a) Análisis de MSD de los datos de abundancia total de la meiofauna, b) Mapa del área de estudio con las estaciones de muestreo.

Como los grupos Nematoda, Copepoda y Turbellaria fueron los taxa principales en todas las estaciones, se construyó una representación del mismo MDS comunitario pero ahora representando la abundancia de estos grupos, es decir, el MDS fue codificado para mostrar la abundancia de cada grupo por separado y de esta manera evaluar su influencia sobre los patrones encontrados entre las estaciones de muestreo (Figura 179). Se corrobora que Nematoda fue el grupo más abundante en todas las estaciones, mientras que Copepoda y Turbellaria tuvieron una abundancia del mismo orden de magnitud (hasta 70-80 inds. 10 cm⁻²). Para Nematoda, los mayores valores de abundancia fueron observados en la estación E27, ubicada en la boca del GM mientras que la menor abundancia se encontró en la estación E7. Para Copepoda las abundancias más altas fueron registradas en la estación E46, ubicada en la región interior sur del GM, mientras que en la estación E7 se encontró la menor abundancia. Para el grupo Turbellaria los mayores valores de abundancia se presentaron en la estación E38. Sin embargo, lo más relevante es que la variabilidad en abundancia entre estaciones fue mayor en Turbellaria y Copepoda, y no tanto así en Nematoda, grupo que presentó valores menos variables espacialmente (Figura 179).

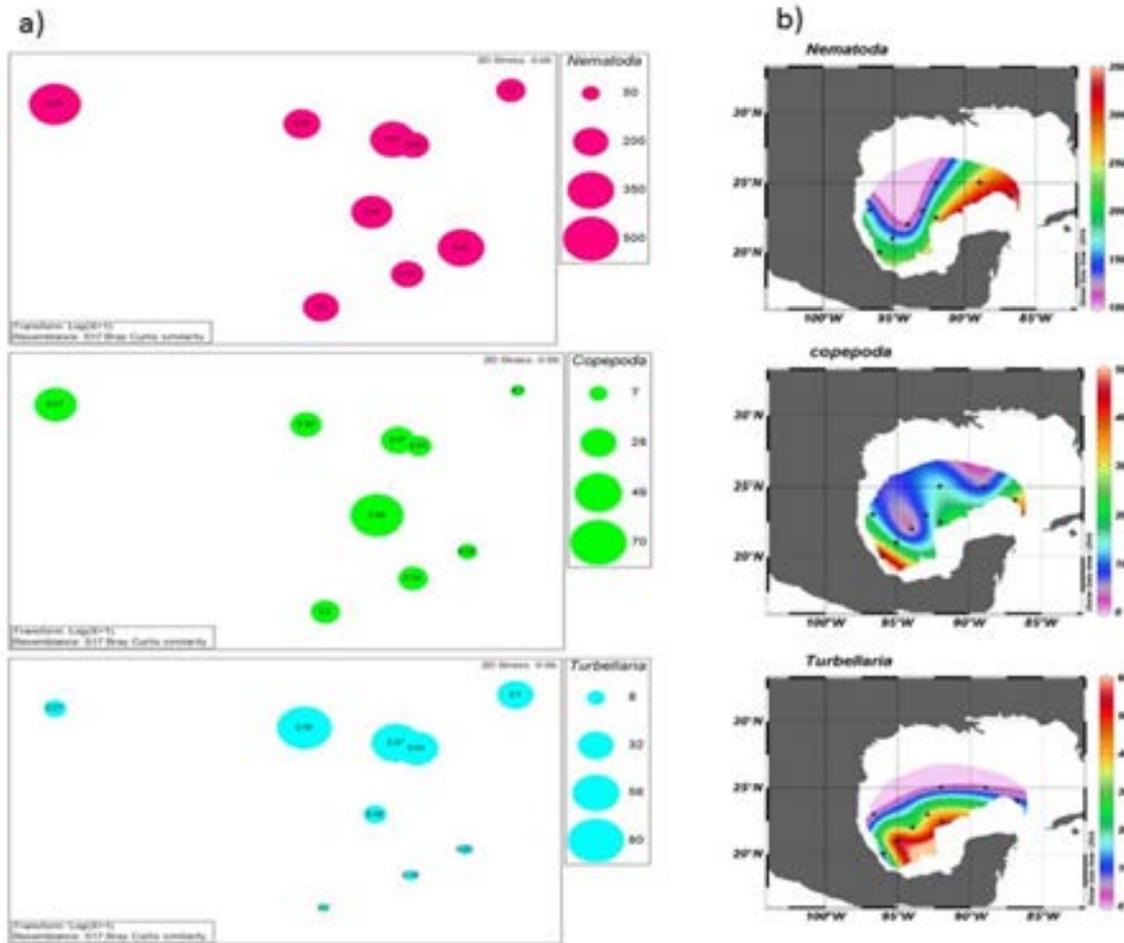


Figura 179. Abundancia de los tres principales taxa de la meiofauna profunda del GM. a) Diagramas de MDS en los que las estaciones se agrupan de acuerdo a su nivel de similitud. b) Mapas de patrones de abundancia de cada taxón.

Distribución vertical

La distribución vertical de la meiofauna se presenta hasta los 12 cm de profundidad en el sedimento, que fue la profundidad hasta la cual se cortaron los núcleos (Figura 180). Los valores de abundancia más altos se observaron en los tres centímetros superiores, en donde se registró más del 50% de la fauna total. Más abajo, se observa una reducción de la abundancia, y la abundancia en función de la profundidad fue altamente heterogénea (Figura 180).

En las estaciones E22, E47 y E27 se observa con mayor claridad un patrón de reducción logarítmica con respecto a la profundidad. Las demás estaciones presentan algunos picos de abundancia sub-superficial (p. ej. estación E7 nivel 1-2 cm). Las estaciones E2 y E44 presentaron una distribución vertical bastante heterogénea en comparación con las demás estaciones, con mayores abundancias en los niveles más profundos (Figura 180).

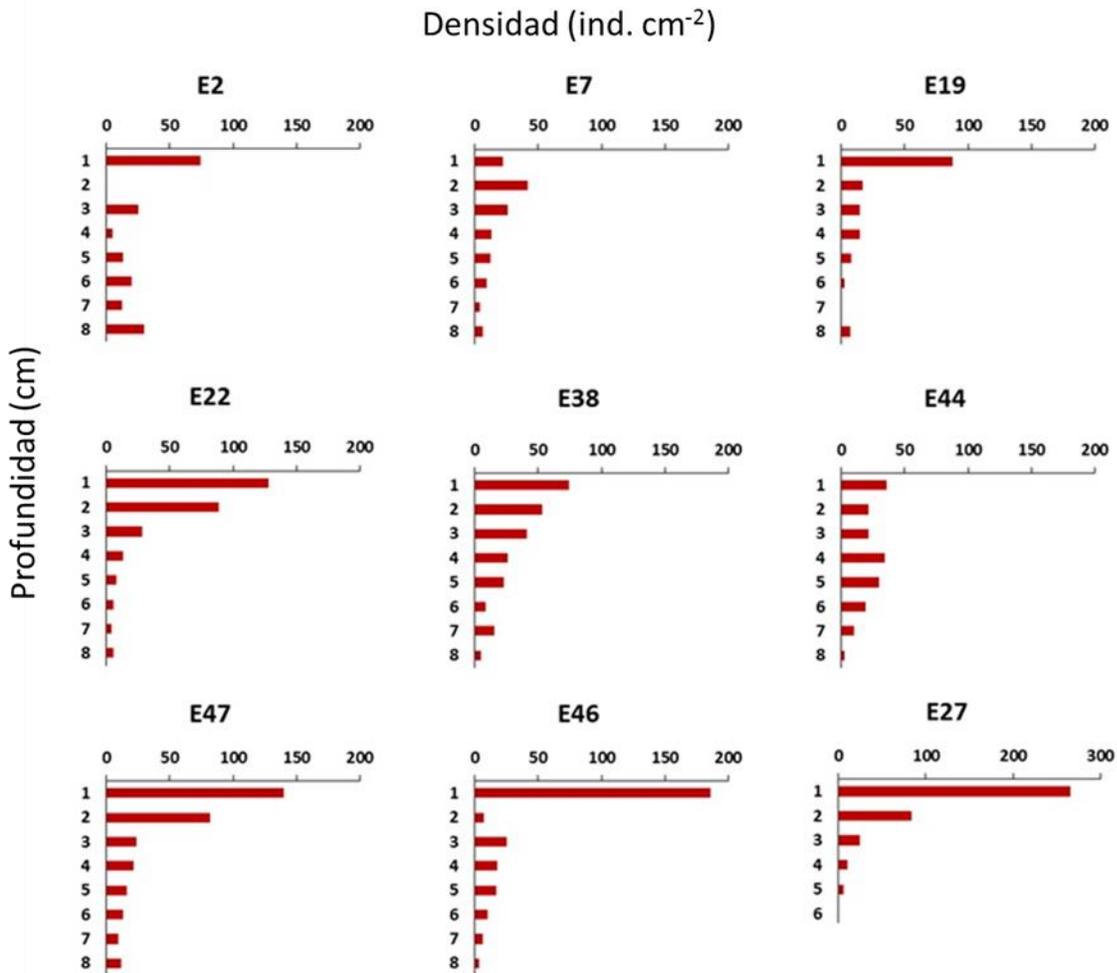


Figura 180. Distribución vertical de la meiofauna en las 9 estaciones del crucero XIXIMI-3. Estratos de profundidad del 1 al 8: 0-1, 1-2, 2-3, 3-4, 4-6, 6-8, 8-10, 10-12 cm.

El análisis multidimensional de la abundancia meiofaúnica de todos los horizontes sedimentarios por separado no revela la agrupación de los estratos de un mismo núcleo (Figura 181a). Sin embargo, al codificar los estratos en función de la profundidad dentro del sedimento se puede observar mejor que varios sí tienden a agruparse más claramente. Estas agrupaciones reflejan la similitud en la abundancia de sus comunidades, destacando la importancia del gradiente vertical de abundancia (Figura 181b). Sin embargo, existe bastante dispersión en los estratos más profundos de todas las estaciones. Al restringir el análisis a los estratos más superficiales (los 4 primeros, < 4 cm de profundidad) donde se concentra la mayor biomasa meiofaunal, dicho gradiente es mucho más conspicuo (Figura 181c).

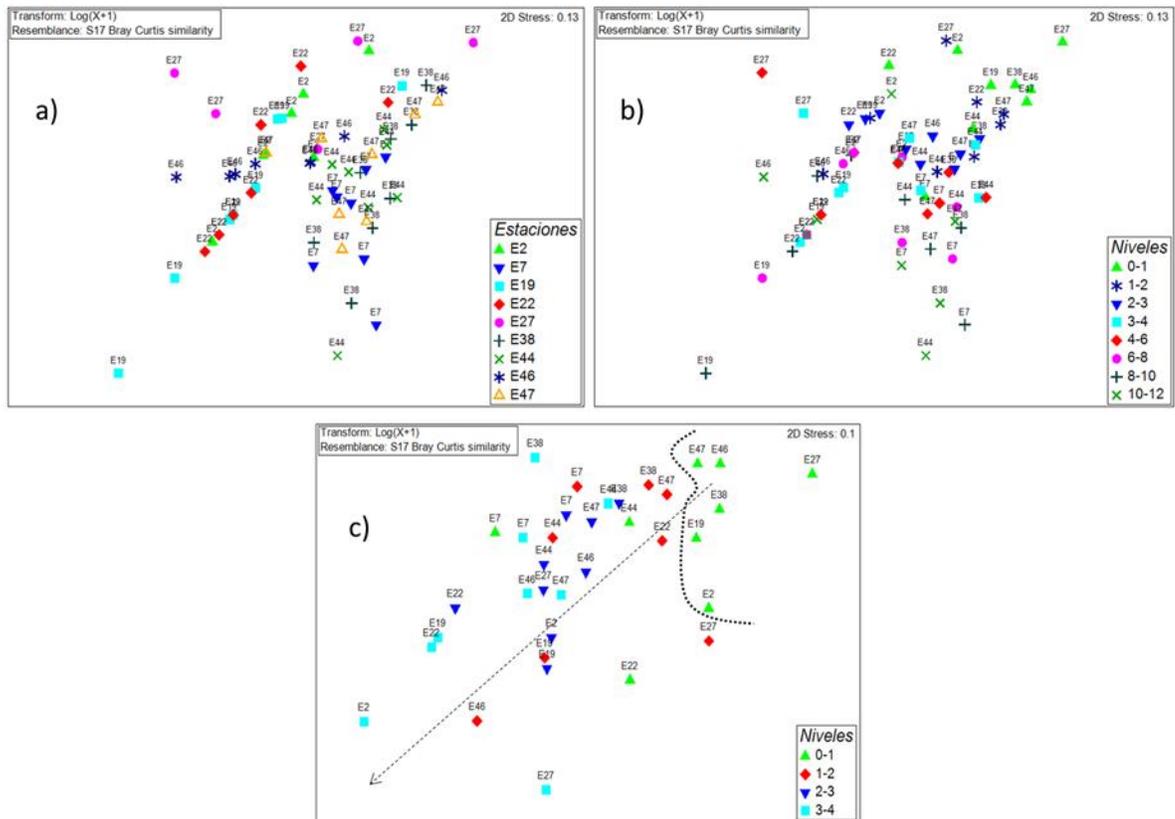


Figura 181. Análisis de MDS para los datos derivados de la composición de la meiofauna de las nueve estaciones muestreadas en el GM durante el crucero XIXIMI-3. a) Distribución espacial de acuerdo a los niveles con énfasis en los primeros (0-4cm).

Variación temporal de la estructura meiofáunica: XIXIMI-1 -2 y -3

Patrones de abundancia y composición generales

En general, la abundancia promedio disminuyó entre el primer y último crucero. La abundancia de XIXIMI-1 fue de 502 ind. 10 cm⁻², la de XIXIMI-2 fue 401 ind. 10 cm⁻² y por último, XIXIMI-3 fue de 239 ind. 10 cm⁻². Dado que no existieron cambios metodológicos fundamentales en el procesamiento de los tres cruces, dichas diferencias se asocian a variaciones temporales naturales de la comunidad estudiada.

Las tendencias cuantitativas entre cruces se observan más claramente en el análisis de escalamiento multidimensional (MDS) de los tres cruces, en el que se observa la agrupación de las estaciones de cada crucero a lo largo de un gradiente de abundancia, de las menos abundantes (XIXIMI-3) a las más abundantes (XIXIMI-1) (Figura 182).

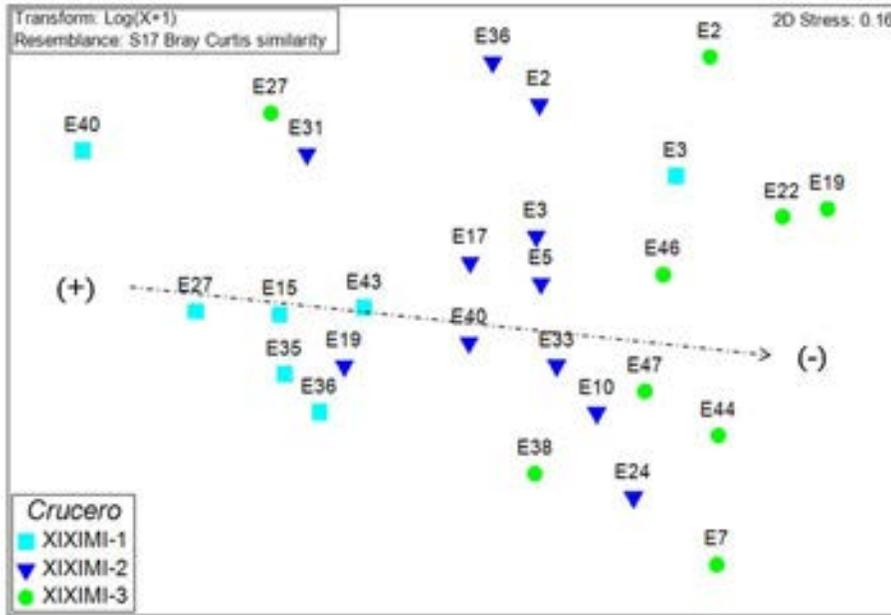


Figura 182. Análisis de MDS para todas las estaciones muestreadas durante los cruceros oceanográficos XIXIMI-1, 2 y 3 en el GM.

Al comparar los tres cruceros desde una perspectiva agregada (C.V. de la abundancia total) y composicional (D.E. Media de la abundancia relativa de cada taxón) se observa que la abundancia total comunitaria encontrada en el crucero XIXIMI-2 fue más homogénea entre las estaciones de muestreo en comparación con los cruceros XIXIMI-1 y 3, y que la diferencia en la proporción de abundancia entre cada uno de los taxa fue menor en XIXIMI-3; es decir, la abundancia de cada grupo meiofaunal fue más similar durante XIXIMI-3 que en los otros dos cruceros (Figura 183a).

Al realizar el mismo análisis, pero dejando fuera al grupo Nematoda (grupo dominante de la meiofauna) se observa que XIXIMI-3 fue el crucero que presentó mayor heterogeneidad espacial en la densidad total comunitaria; es decir, la diferencia entre las estaciones más y menos abundantes fue mayor. Por otro lado, la abundancia de los grupos meiofaunales encontrados en XIXIMI-2 presentó mayor diferencia entre ellos mientras que en los cruceros XIXIMI-1 y 3, la abundancia de cada grupo meiofaunal fue más similar entre sí (Figura 183b).

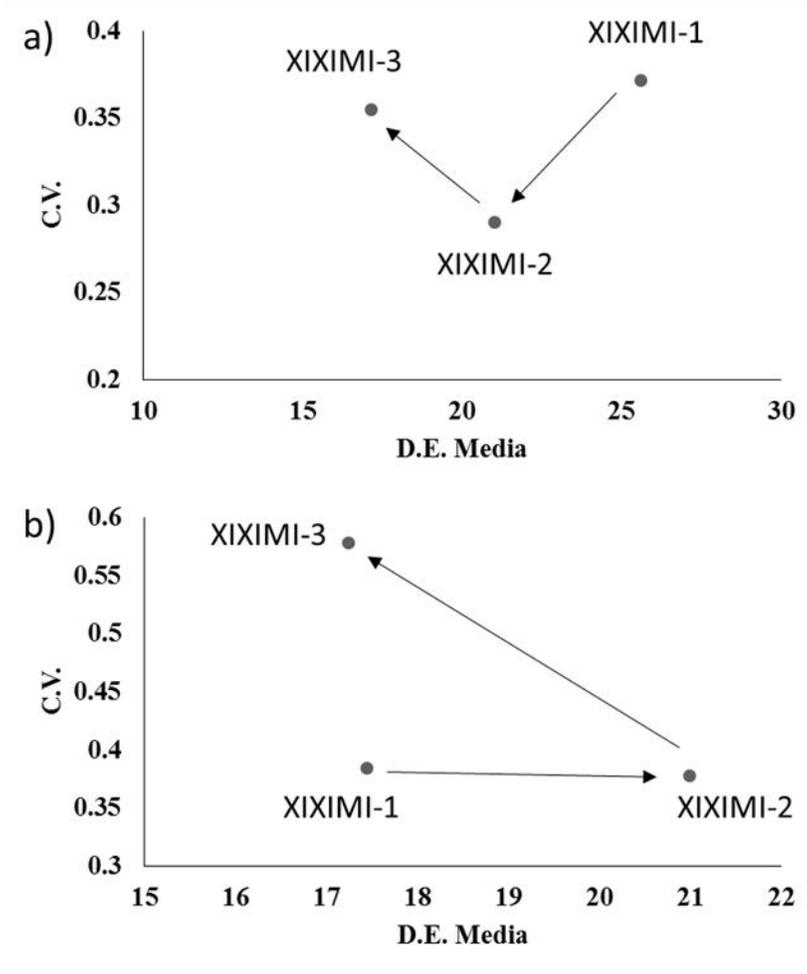


Figura 183. Variabilidad composicional y agregada de la meiofauna del GM encontrada en los cruceros XIXIMI-1, 2 y 3. a. Análisis considerando todos los grupos meiofaunales. b. Análisis excluyendo al grupo Nematoda.

Estaciones revisitadas: composición taxonómica

Dado que no se tomaron muestras de sedimento en el mismo grupo de estaciones en los tres cruceros, aquí se hace la comparación de aquellas estaciones revisitadas en las tres campañas oceanográficas XIXIMI-1, 2 y 3 (Figura 184). Cabe tomar estos resultados con la caución adecuada ya que el visitar una misma estación no garantiza que el nucleador caiga en el punto preciso que se muestreó en un crucero anterior, por lo que no son replicas temporales de un mismo punto geográfico sino de una estación oceanográfica cuyo radio de muestro del mar profundo puede abracar cientos de metros.

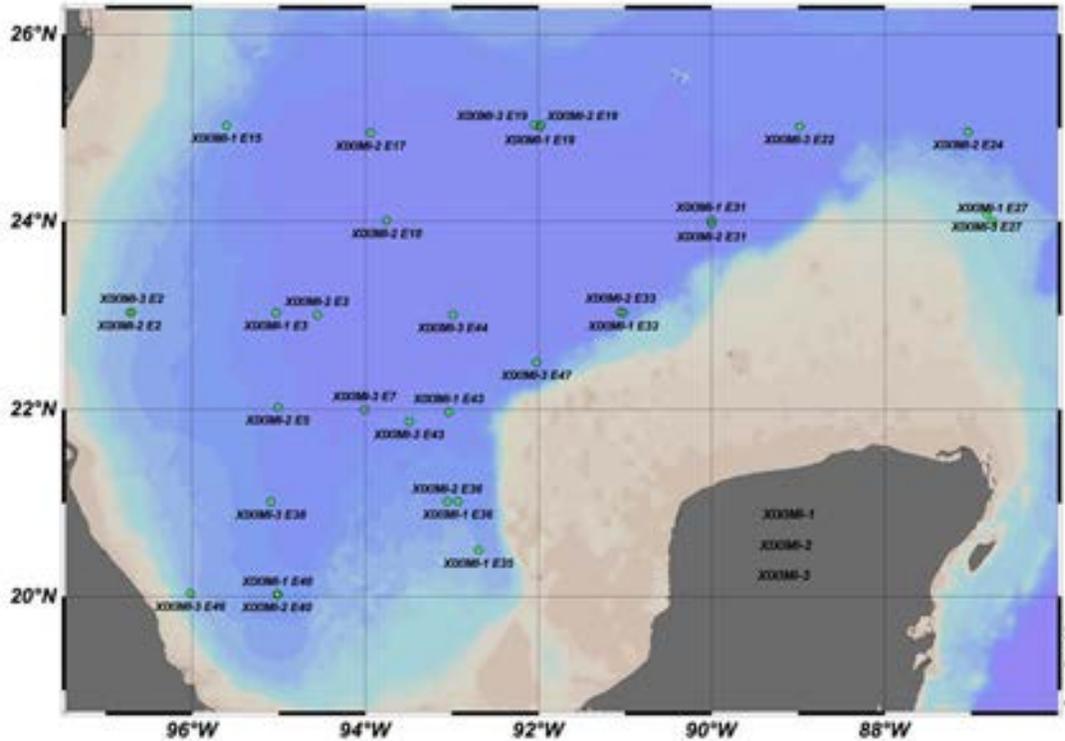


Figura 184. Mapa de las estaciones de muestreo de sedimentos de las campañas XIXIMI-1, 2 y 3.

Comparando la composición taxonómica de la meiofauna de los tres cruceros se observan algunas diferencias. En las muestras de XIXIMI-1 se encontraron siete grupos meiofaunales que también se observaron en las muestras de XIXIMI-2, aunque en este último aparecieron dos grupos adicionales, Rotifera y Tardigrada, mientras que en XIXIMI-3, de los grupos anteriores no se presentó Rotifera, pero aparecieron tres taxones adicionales, Loricifera, Syncarida y Tanaidacea (Figura 185). En general todos los taxones presentaron una abundancia decreciente en los cruceros subsiguientes a XIXIMI-1, y la menor en XIXIMI-3, con excepción del grupo Turbellaria que presentó un aumento hacia el tercer crucero y Copepoda que fue mayor en XIXIMI-2 (Figura 185).

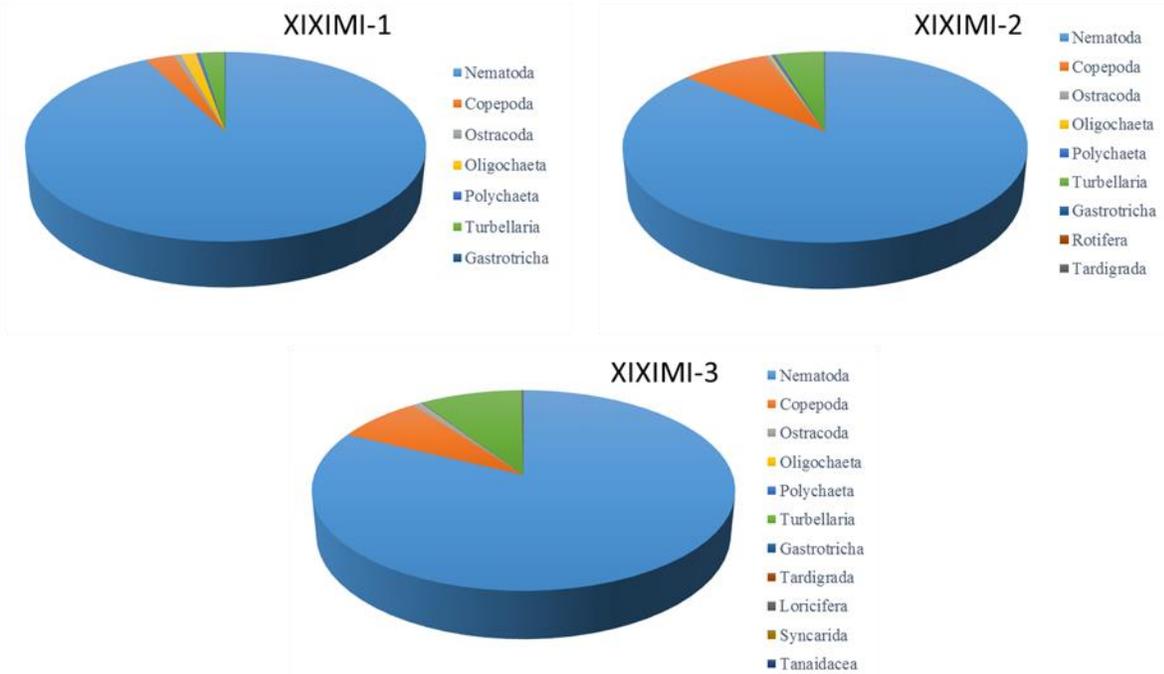


Figura 185. Composición taxonómica del total de la meiofauna recolectada en las campañas XIXIMI-1, 2 y 3 en el GM.

Estaciones revisitadas: Distribución espacial

La abundancia de la meiofauna en las muestras de las estaciones revisitadas durante los tres cruceros presentó una alta variabilidad, notándose una disminución en sus valores durante XIXIMI-3 con respecto a los dos anteriores (Figura 186). En dos de las estaciones (E3 y E40) se presentaron valores ligeramente más altos en el segundo crucero con respecto al primero, mientras que la estación E36 presentó valores ligeramente más bajos en la densidad durante el segundo crucero. El patrón de abundancia espacial las estaciones revisitadas en los tres cruceros mostró que para XIXIMI-1 y 3 los valores más altos estuvieron asociados a la estación más cercana a la boca del GM, mientras que para XIXIMI-2 la mayor abundancia se encontró en el suroeste del golfo.

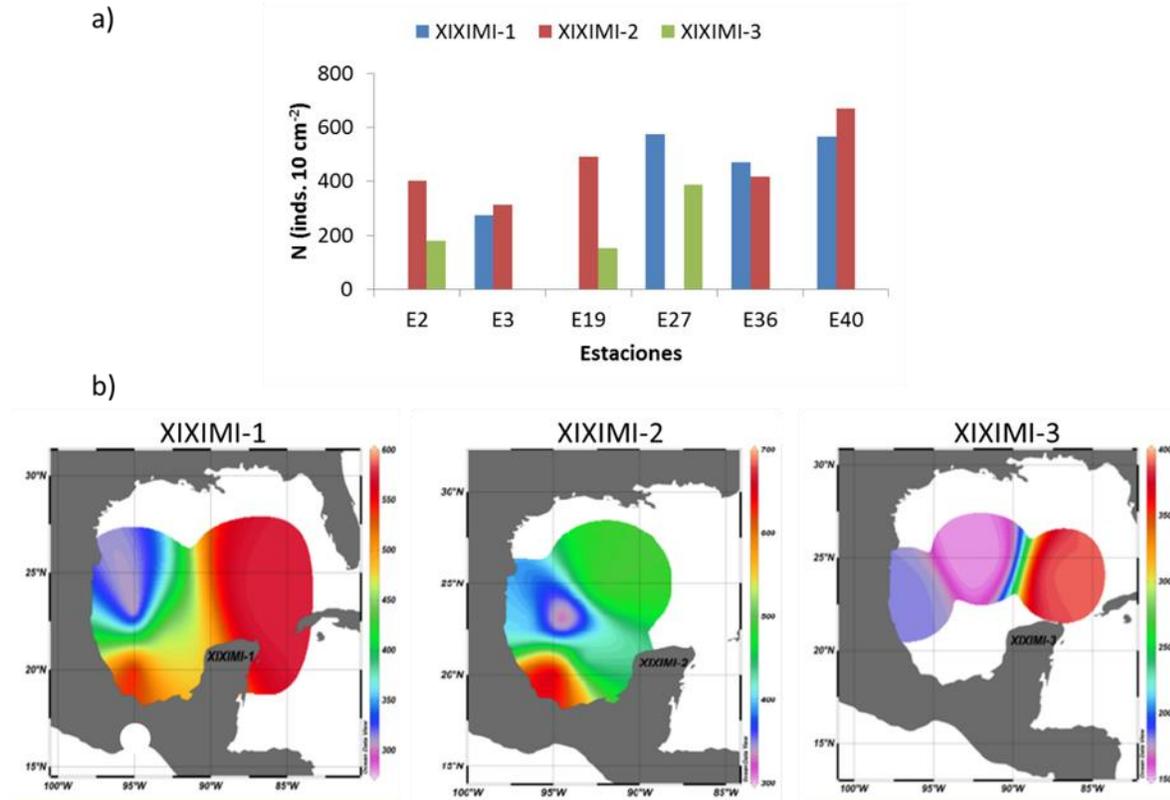


Figura 186. Abundancia de la meiofauna de las estaciones revisitadas durante los cruceros XIXIMI-1, 2 y 3. **a.** Gráfico de barras de las abundancias para las estaciones revisitadas. **b.** Densidades meiofaunales de las estaciones revisitadas en función de su ubicación geográfica.

Estaciones revisitadas: Distribución vertical

La distribución vertical de la abundancia meiofaunal en el sedimento presentó una alta variabilidad entre muestras y cruceros. Las estaciones E36 y E40 presentaron el perfil vertical típico de la meiofauna en las muestras de los cruceros XIXIMI-1 y 2, caracterizado por un máximo de abundancia superficial y una disminución rápida con la profundidad (Figura 187). Sin embargo, el perfil de la estación E3 difirió entre las muestras de ambos cruceros. Para XIXIMI-1 se observó una distribución homogénea de la abundancia en los diferentes estratos del sedimento, mientras que en el segundo se observó el patrón típico que se mencionó anteriormente (Figura 187). También queda en evidencia que la abundancia es menor en XIXIMI-3 con respecto de los cruceros anteriores.

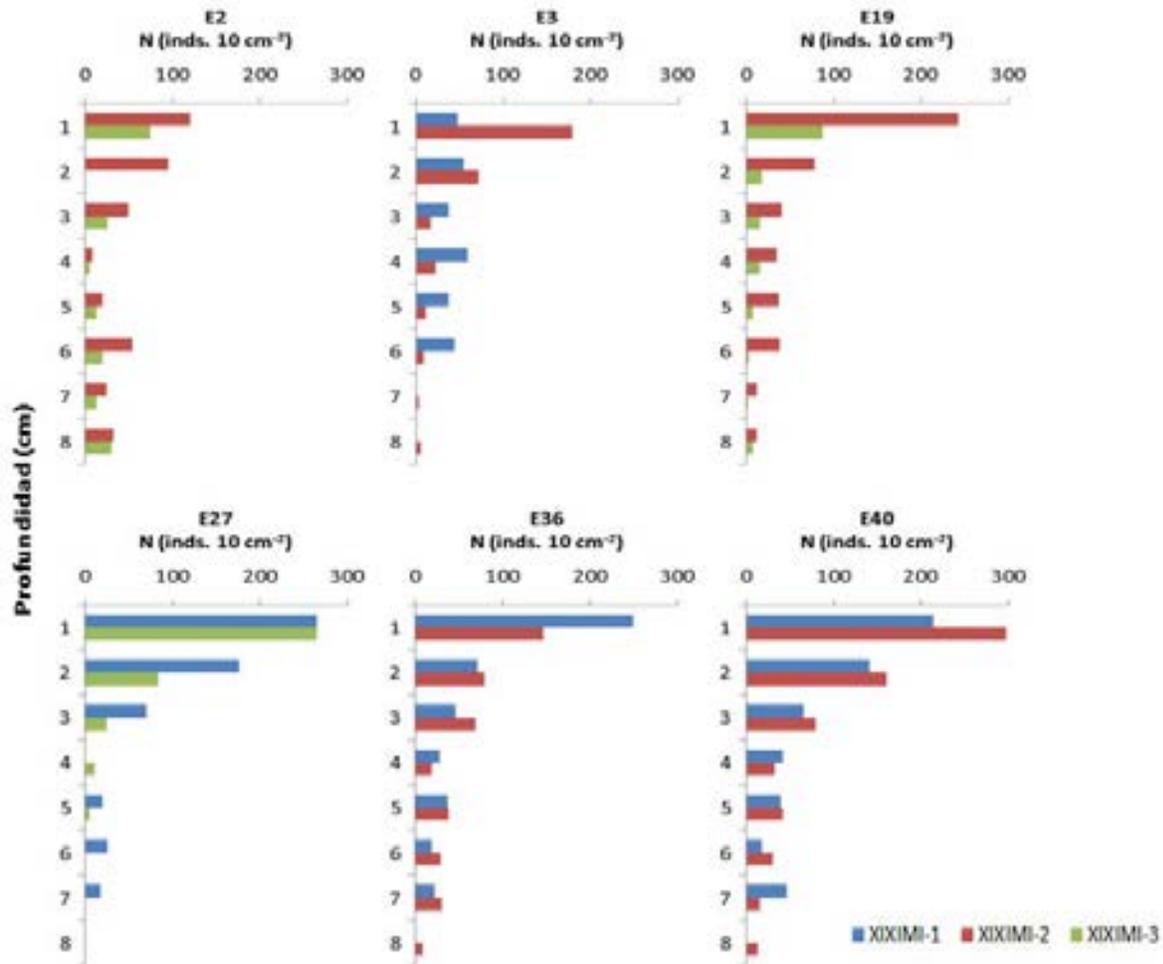


Figura 187. Distribución vertical de la meiofauna en las estaciones repetidas en los cruceros XIXIMI-1, XIXIMI-2 y XIXIMI-3 en el GM.

Conclusiones

Los patrones de distribución vertical de la meiofauna en los sedimentos profundos del GM corresponden a los perfiles de abundancia típicos de la meiofauna (en la mayoría de los casos), caracterizados por una máxima superficial y un decaimiento rápido con la profundidad dentro del sedimento.

La comunidad meiofáunica se encuentra dominada por nemátodos de vida libre.

No existe un patrón espacial evidente en la estructura comunitaria meiofáunica revelada por el análisis MDS.

Se encontraron diferencias temporales en la estructura de la comunidad meiofáunica entre XIXIMI-1, 2 y 3, que pueden asociarse tanto a variaciones estacionales en la comunidad como a variación espacial a pequeña escala en el caso de las estaciones E3 (XIXIMI-1 y 2) y E27 (XIXIMI-1 y 3). El esclarecimiento de la variación estacional en la comunidad meiofáunica requiere de un monitoreo a esa escala temporal.

Recomendaciones

Se completará el análisis taxonómico detallado de la nematofauna encontrada, pues representa el grupo taxonómico dominante de la meiofauna en todas las estaciones. Dichos análisis ya se encuentran disponibles para XIXIMI-1 y para algunas estaciones de XIXIMI-2, y darán lugar a una comparación temporal de dichas comunidades.

La caracterización morfológica de la meiofauna se complementará con herramientas genéticas que permitan una mejor valoración de la diversidad alfa y filogenética. Se cuenta con muestras fijadas en DESS y congeladas para realizar análisis genéticos. Se ha conseguido financiamiento complementario para utilizar secuenciación de ADN de última generación para análisis de metagenómica ambiental.

Es necesario realizar análisis conjuntos de las variables medioambientales con los patrones de estructura de la comunidad de la meiofauna para entender cuáles de ellas se encuentran influenciando más dicha estructura.

Referencias

- Alonso DR (2006) Variación espacio-temporal de la densidad de la macrofauna béntica de la planicie abisal en el Golfo de México. Tesis de licenciatura, Facultad de Ciencias, UNAM. México
- Baguley JG, Montagna PA, Hyde LJ, Kalke RD, Rowe GT (2006a) Metazoan meiofauna abundance in relation to environmental variables in the northern Gulf of Mexico deep sea. *Deep-Sea Res Pt I* 53: 1344-1362
- Baguley JG, Montagna PA, Hyde LJ, Rowe GT (2008) Metazoan meiofauna biomass, grazing, and weight-dependent respiration in the Northern Gulf of Mexico deep sea. *Deep-Sea Res Pt II* 55: 2607-2616
- Baguley JG, Montagna PA, Lee W, Hyde LJ, Rowe GI (2006b) Spatial and bathymetric trends in Harpacticoida (Copepoda) community structure in the Northern Gulf of Mexico deep-sea. *J Exp Mar Biol Ecol* 330: 327-341

- Bernhard JM, Sen Gupta BK, Baguley JG (2008) Benthic foraminifera living in Gulf of Mexico bathyal and abyssal sediments: Community analysis and comparison to metazoan meiofaunal biomass and density. *Deep-Sea Res Pt II* 55: 2617-2626
- Boyd SE, Rees HL, Richardson CA (2000) Nematodes as Sensitive Indicators of Change at Dredged Material Disposal Sites. *Estuar Coast Shelf Sci* 51: 805-819
- Burgess B (2001) An improved protocol for separating meiofauna from sediments using colloidal silica sols. *Mar Ecol-Prog Ser* 214: 161-165
- Cordes EE, Bergquist DC, Fisher CR (2009) Macro-Ecology of Gulf of Mexico Cold Seeps. *Annu Rev Mar Sci* 1: 143-168
- de Jonge VN, Bouwman LA (1977) A simple density separation technique for quantitative isolation of meiobenthos using the colloidal silica Ludox™. *Mar Biol* 42: 143-148
- Escobar E, Lopez M, Soto LA, Signoret M (1997) Density and biomass of the meiofauna of the upper continental slope in two regions of the Gulf of Mexico. *Cienc Mar* 23: 463-489
- Escobar-Briones E, Estrada-Santillan EL, Legendre P (2008a) Macrofaunal density and biomass in the Campeche Canyon, Southwestern Gulf of Mexico. *Deep-Sea Res Pt II* 55: 2679-2685
- Escobar-Briones E, Signoret M, Hernandez D (1999) Variation of the macrobenthic infaunal density in a bathymetric gradient: Western Gulf of Mexico. *Cienc Mar* 25: 193-212
- Escobar-Briones EG, Diaz C, Legendre P (2008b) Meiofaunal community structure of the deep-sea Gulf of Mexico: Variability due to the sorting methods. *Deep-Sea Res Pt II* 55: 2627-2633
- Gheskiere T, Hoste E, Vanaverbeke J, Vincx M, Degraer S (2004) Horizontal zonation patterns and feeding structure of marine nematode assemblages on a macrotidal, ultra-dissipative sandy beach (De Panne, Belgium). *J Sea Res* 52: 211-226
- Giere O (1993) *Meiobenthology. The Microscopic Fauna in Aquatic Sediments*. Springer-Verlag, Berlin
- Hernández RD (1999) Riqueza taxonómica, densidad y biomasa de la infauna macrobéntica a lo largo de un gradiente batimétrico en el sector occidental del Golfo de México. Tesis de Licenciatura, FES Zaragoza, UNAM. México

- Landers SC, Romano FA, III, Stewart PM, Ramroop S (2012) A Multi-Year Survey of Meiofaunal Abundance From the Northern Gulf of Mexico Continental Shelf and Slope. *Gulf of Mexico Science* 30: 20-29
- McGarigal K, Cushman S, Stafford S (2000) *Multivariate statistics for wildlife and ecology research*. Springer-Verlag, New York
- Micheli F, Cottingham KL, Bascompte J, Bjornstad ON, Eckert GL, Fischer JM, Keitt TH, Kendall BE, Klug JL, Rusak JA (1999) The dual nature of community variability. *Oikos* 85: 161-169
- Montagna PA, Baguley JG, Cooksey C, Hartwell I, Hyde LJ, Hyland JL, Kalke RD, Kracker LM, Reuscher M, Rhodes ACE (2013) Deep-Sea Benthic Footprint of the Deepwater Horizon Blowout. *Plos One* 8
- Muñiz IG (2001) Variación de la estructura comunitaria de la infauna macrobéntica en el gradiente batimétrico del sector occidental del escarpe de Campeche, suroeste del Golfo de México. Tesis de licenciatura, Facultad de ciencias, UNAM. México
- Rocha-Olivares A, Fleeger JW, Foltz DW (2004) Differential tolerance among cryptic species: a potential cause of pollutant-related reductions in genetic diversity. *Environ Toxicol Chem* 23: 53-58
- Rodríguez PP (2003) Efecto de los factores ambientales en la variación espacial y temporal de la densidad y la biomasa de la infauna macrobéntica en el sur del Golfo de México. Tesis de Maestría en Ciencias, Ciencias del Mar y Limnología. UNAM. Mexico
- Rowe GT, Menzel DW (1971) Quantitative benthic samples from the deep Gulf of Mexico with some comments on the measurement of deep-sea biomass. *Bull Mar Sci* 21: 556-566
- Rowe GT, Wei CL, Nunnally C, Haedrich R, Montagna P, Baguley JG, Bernhard JM, Wicksten M, Ammons A, Briones EE, Soliman Y, Deming JW (2008) Comparative biomass structure and estimated carbon flow in food webs in the deep Gulf of Mexico. *Deep-Sea Res Pt II* 55: 2699-2711
- Salas HA (2001) Variación espacial y batimétrica de la biomasa de microfauna del suroeste del Golfo de México. Tesis de licenciatura, Escuela Nacional de Estudios Profesionales Iztacala, UNAM. México

- Sharma J, Baguley JG, Huettel RN (2007) The role of environmental gradients in the distribution of free-living nematodes in the deep northern Gulf of Mexico. *J Nematol* 39: 82-82
- Sharma J, Baguley JG, Montagna PA, Rowe GT (2012) Assessment of longitudinal gradients in Nematode communities in the deep northern Gulf of Mexico and concordance with benthic taxa. *International Journal of Oceanography* 2012: ID903018
- Smol N, Willems KA, Govaere JCR, Sandee AJJ (1994) Composition, distribution and biomass of meiobenthos in the Oosterschelde estuary (SW Netherlands). *Hydrobiologia* 282/283: 197-217
- Street GT, Lotufo GR, Montagna PA, Fleeger JW (1998) Reduced genetic diversity in a meiobenthic copepod exposed to a xenobiotic. *J Exp Mar Biol Ecol* 222: 93-111
- Velázquez LR (2005) Variación de las comunidades de la macrofauna béntica de tres localidades de la zona abisal del suroeste del Golfo de México. Tesis de licenciatura, UAM-Xochimilco. México
- Wei C-L, Rowe GT, Escobar-Briones E, Nunnally C, Soliman Y, Ellis N (2012) Standing stocks and body size of deep-sea Macrofauna: Predicting the baseline of 2010 Deepwater Horizon oil spill in the northern gulf of Mexico. *Deep-Sea Res Pt I* in press

ESTUDIO FAUNÍSTICO DE LA MACROFAUNA (TAXONOMÍA)

Responsable, Dra. Victoria Díaz CICESE

Participante: Ocean. Maricarmen Necoechea Z. CICESE

Antecedentes

El conocimiento de la diversidad biológica es fundamental para comprender la estructura de los ecosistemas, su funcionamiento y poder determinar si hay algún impacto de origen antropogénico. Este adquiere mayor relevancia ante el cambio global (calentamiento y acidificación de los océanos) y la explotación recursos marinos a mayores profundidades. El desarrollo del proyecto XIXIMI-3 tiene como objetivo establecer la línea base en el GM y determinar si hay evidencia de la presencia de petróleo proveniente del pozo Macondo en la zona de aguas profundas del GM.

La fauna béntica es abundante en el fondo marino. Según Gage & Tyler (1991) representa alrededor del 50% del total de organismos y más de 30% de las especies, y está presente en prácticamente todas las regiones oceánicas. Los invertebrados depositivos son los metazoarios dominantes en los sedimentos marinos (biomasa, abundancia); los anélidos poliquetos, crustáceos, moluscos y equinodermos constituyen los principales grupos de la macrofauna (Snelgrove, 1999). Estos organismos mezclan partículas sedimentarias favoreciendo reacciones químicas y oxigenando los sedimentos, transportan la materia orgánica, tienen influencia en diversos procesos ecológicos y soportan variados servicios ecosistémicos (Constanza et al. 1997).

Snelgrove (1999) estima que solo 1% de la especies de los fondos marinos son conocidas y que ante el cambio climático global y el interés por la explotación de recursos marinos no renovables (petróleo, gas, minerales) es urgente estudiar y ampliar los conocimientos sobre la biodiversidad marina y su influencia en el funcionamiento de las comunidades marinas.

Los primeros estudios sobre la macrofauna béntica en la zona profunda del GM fueron realizados por investigadores del ICMYL de la UNAM; Escobar-Briones et al. (1999) y Hernández (1999) estudiaron la infauna en la zona oeste del GM (GM). Posteriormente, Alonso (2006) describe los cambios de la densidad de macrofauna béntica en relación a un gradiente batimétrico. Rowe et al. (1991) encontraron que la biomasa de la macrofauna se correlaciona con el flujo de C orgánico particulado. Rowe et al. (2008) realizaron una investigación sobre la biomasa y el flujo de carbono en las redes tróficas en la zona profunda del GM y encuentran que las bacterias y la meiofauna son dominantes y usan el 96% de la materia orgánica disponible (4 mg C/m²), mientras que la macrofauna consume solo el 4% y presentan baja diversidad y biomasa.

Escobar et al. (2008) estudiaron los megacrústáceos epibénticos de la zona SO del GM y encontraron los valores más altos de diversidad en la planicie de Sigsbee. Wei

et al. (2010) publicaron un trabajo sobre la zonación batimétrica de la macrofauna en relación a la producción primaria en superficie; estos autores determinan una relación macroecológica entre profundidad, flujo de C orgánico particulado y zonación de la macrofauna.

En general, la densidad y la biomasa de organismos de la macrofauna decrece de manera importante al alejarse de la costa y a mayores profundidades pero también está acoplada a la productividad primaria de las aguas superficiales (Escobar-Briones et al. 2008). Rowe et al. (2008) encontraron que la biomasa de la macrofauna es mayor que la de la meiofauna a menos de 2000 m de profundidad, y que a profundidades mayores la biomasa de la meiofauna es mayor. Estos autores mencionan que cuando el alimento es muy limitado, la abundancia relativa de organismos grandes como la macrofauna disminuyen drásticamente y predominan los de talla pequeña como la meiofauna. Ammons (2007) detecta una relación entre la abundancia de poliquetos y la concentración de C orgánico en los sedimentos.

La importancia de este trabajo reside en que permite ampliar el conocimiento del bentos profundo de la zona centro y sur del GM que ha sido poco estudiado comparado con la zona norte. Tiene la limitación de que son pocas muestras, no se pudieron hacer replicados y la talla de muestra mínima usada debería de ser de 3 núcleos sedimentarios por estación, pero en este proyecto es de solo 1 núcleo por limitaciones en la disponibilidad de las muestras que se usan para diversos tipos de análisis..

Según Cosson et al. (1997) el grupo dominante en el GM lo constituyen los anélidos poliquetos, tanto en sitios eutróficos, como en los mesotróficos y oligotróficos. El área que muestrearon corresponde a un nucleador de caja de 0.25 m², la cual según estos autores representa un área de muestreo adecuada para una zona con densidades bajas como es la parte profunda del GM. Por su parte, Rowe et al. (2008) muestrean utilizando un nucleador de caja de 0.2 m² lo cual permite estudiar cómo está estructurada la comunidad macrobéntica (diversidad de taxa, abundancia, densidad, aporte de carbono) en esta región del GM.

Objetivos

Describir la composición faunística macroinfaunal.

Establecer la variación hacia el interior del sedimento en 8 estratos de 0 a 12 cm de profundidad de la abundancia (ind.m²) y la riqueza taxonómica.

Metodología

Colecta de muestras

Se recolectaron muestras de sedimentos por medio de un nucleador múltiple en las estaciones E2, E7, E19, E22 E27, E38, E44, E46, E47 y E43 (Tabla 33). De estas estaciones, no tuvimos acceso a la E43 y de la estación E2 solo contamos con el estrato 1-2 cm debido a que en algunas estaciones no se recuperaron los 6 núcleos. En esta investigación solo tuvimos acceso a un núcleo por estación que cubre un área de muestro de 71 cm² (0.0071 m²).

A bordo del barco e inmediatamente después de su colecta las muestras se sacaron del núcleo de policarbonato por medio de un extrusor y fueron seccionadas en 8 estratos: 0-1, 1-2, 2-3, 3-4, 4-6, 6-8, 8-10, 10-12 cm de profundidad al interior del sedimento. Posteriormente cada estrato se fijó en una solución de formaldeído al 5% neutralizada con borato de sodio.

Tabla 33. Posición y profundidad de los núcleos sedimentarios.

Estación	Latitud N	Longitud W	Prof (m)
E2	96.69391	23.02876	1749
E7	94.00421	21.99697	3559
E19	92.04657	25.0281	3520
E22	88.98315	25.00999	3488
E27	86.82068	24.07572	1208
E38	95.08621	24.07572	3087
E43	93.49142	21.87153	2960
E44	92.98535	22.99776	3741
E46	96.01813	20.02935	1739
E47	92.01788	22.48894	3551

Procesamiento en el Laboratorio

a. Separación de la macrofauna de las muestras fijadas en formol. Cada muestra fue lavada usando una malla 350 µm bajo el agua corriente y posteriormente fue preservada en etanol al 70%. Es importante mencionar que en el procesamiento de las muestras de los cruceros XIXIMI-1y XIXIMI-2 se usó una malla de 500 µm, por lo cual los datos de este informe no son comparables con los anteriores.

b. Para separar los diferentes taxa se procedió a enjuagar el etanol de cada estrato usando un tamiz de 350 µm para concentrar la macrofauna béntica.

c. Cada muestra se revisó bajo microscopio estereoscópico y se separaron los diferentes taxa. Los organismos se identificaron usando diferentes claves taxonómicas (Rosenberg et al., 2009; Uebelacker & Johnson, 1984 entre otras) y se contaron; posteriormente se colocaron en viales con etanol al 70%.

Resultados

Composición taxonómica

En todas las estaciones se encontraron macroinvertebrados bénticos (Anexo 6). Se colectaron organismos pertenecientes a siete filos: Protozoa, Platyhelminthes, Nematoda, Nemertea, Brachiopoda, Mollusca, Arthropoda y Annelida.

El filo Mollusca fue dominante (Figura 188) representando 74.4% de la abundancia total (43.3% Gastropoda, 31.3% Bivalvia), Crustacea 9.3%, Brachiopoda 8.9%, Polychaeta 2.9%, Nematoda 2.3%, Nemertea 0.5%, Otros (1.7%). Los moluscos colectados son de pequeña talla 4-5 mm (micromoluscos).

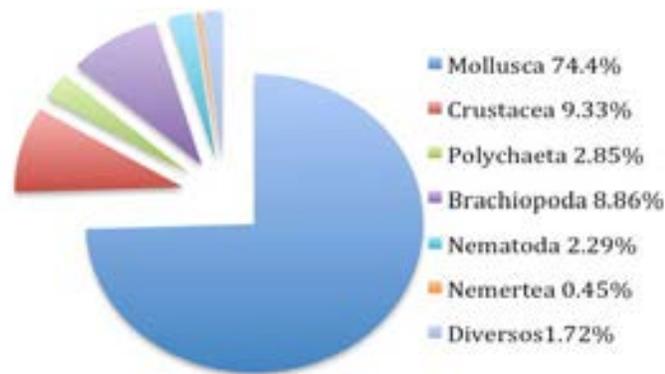


Figura 188. Porcentajes de los diferentes grupos.

Se identificaron 14 familias de moluscos: Mangeliidae, Nassaridae, Turritellidae, Pyramidellidae, Collumbellidae, Trochidae, Rissoidea, Cylichnidae, Liotiidae, Veneridae, Mytilidae, Petricolidae, Pectinidae y Fistulariidae y 10 géneros: Kurtziella, Turritella, Odostomia, Fossarina, Arene, Acteocina, Modiolus, Leptopecten, Fustiaria.

Las muestras presentaron 10 familias de anélidos poliquetos: Glyceridae, Capitellidae, Nereididae, Ampharetidae, Eunicidae, Maldanidae, Magelonidae, Nephtidae, Opheliidae y Sabellidae, y 7 géneros: Neoheteromastus, Ceratocephale, Lysidice, Maldane, Magelona, Nephtys y Amphicorina. También se identificaron platelmintos de la familia Leptoplanidae y algunos Nemertea.

Abundancia

Se colectó un total de 1309 organismos. Entre los organismos que más contribuyeron a la abundancia total están los Brachiopoda de la familia Terebratulidae (116 individuos), Mollusca Gastropoda juveniles (70 inds), familia Pyramidellidae (26 inds), Odostomia sp (21 inds), familia Trochidae (363 inds), Bivalvia juveniles (19 inds); Clase Scaphopoda (103 inds) y las especies Fustiaria liodon (129) y Fustiaria splendida (134). Los crustáceos Ostracoda (47) y el género Neonesidea sp (22); entre los anélidos poliquetos 17 juveniles que no se pudieron identificar a nivel especie, Capitellidae (5) y Nephtyidae (4).

La mayores abundancias por núcleo corresponden a las estaciones 27 y 38 (68-993 orgs); las menores abundancias a las estaciones 44, 22 y 7 (18-34 organismos) (Figura 189).

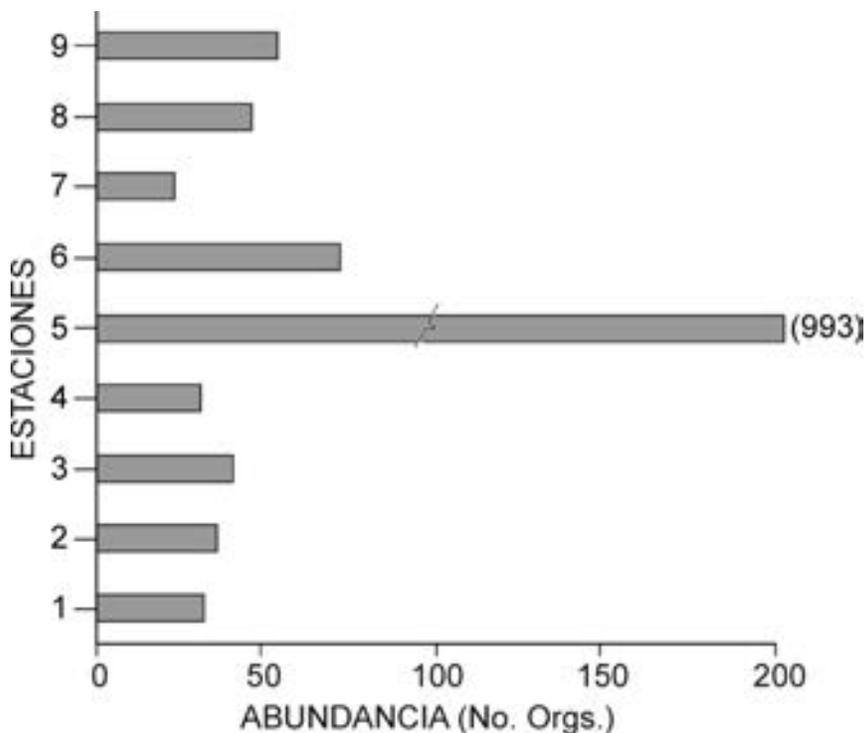


Figura 189. Abundancia de la macrofauna (>350 um) macrofauna en los núcleos colectados.

El núcleo más somero fue E27 (1208 m profundidad), seguido por E46 y E2 (1739 y 1749 m prof respectivamente). Los más profundos colectados a más de 3500 m son E7, E19, E44 y E47. La densidad de la macrofauna en cada núcleo se presenta en la

Tabla 34. En los núcleos someros varió entre 6125–140,254 inds/m², los micromoluscos son los mejor representados; en los núcleos profundos varió entre 2542 – 6215 inds/m².

Tabla 34. Densidad de la macrofauna béntica por núcleo.

Estación	Densidad/m ²
E7	4944
E19	5508
E22	4379
E27	140254
E38	9605
E44	2542
E46	6215
E47	7627

El valor más elevado de densidad y la mayor riqueza de taxa se encontró en la estación E27 que se ubica en la zona del canal de Yucatán donde la temperatura del agua es más alta y hay influencia de las masas de agua de la corriente del Lazo (Figura 190).

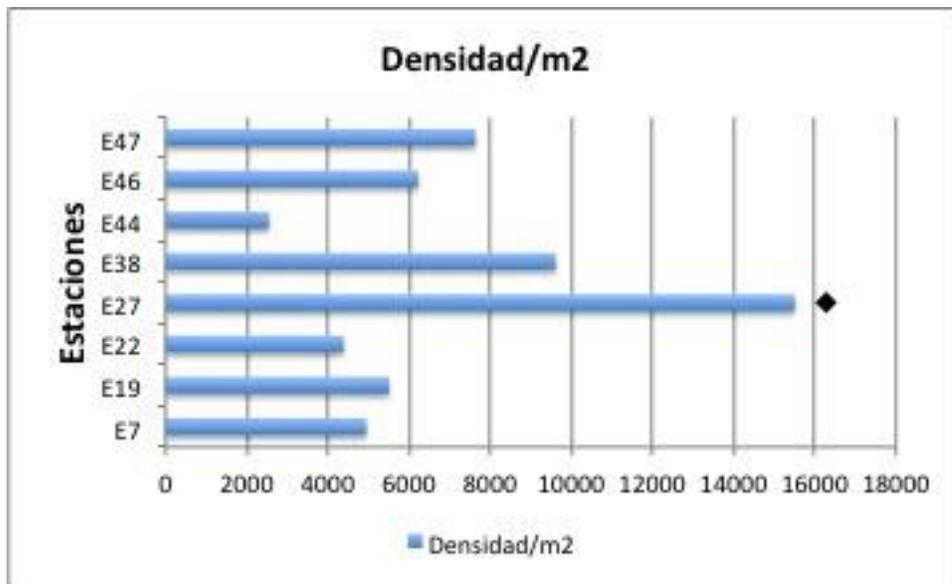


Figura 190. Densidad (individuos m⁻²) de la macrofauna (>350 µm) por núcleo.

En esta estación algunos taxa presentan densidades elevadas como los Brachiopoda, familia Terebratulidae 15,819/m², moluscos de la familia Trochidae 49,073/

m² y especies de la familia Fistularidae: *Fustiaria liodon* 15,677/ m² y *Fustiaria splendida* 17,090/ m².

Riqueza de taxa

La riqueza de taxones varió entre 0 y 17 en los diferentes estratos estudiados, siendo generalmente los tres primeros estratos (0-1cm, 1-2cm, 2-3cm), los que presentaron los valores más altos (0 a 14 individuos), excepto el núcleo sedimentario E-27 en el que el estrato 3-4 cm contó con 17 taxa y el de 4-6 cm con 16 taxa (Figura 191). La estación E27 fue la más diversa y es la más somera (1208 m prof) de las estaciones analizadas; las menos diversas 19 y 44 son estaciones profundas (3520 y 3741 m de profundidad) ubicadas en la zona central del GM (Figura 192).

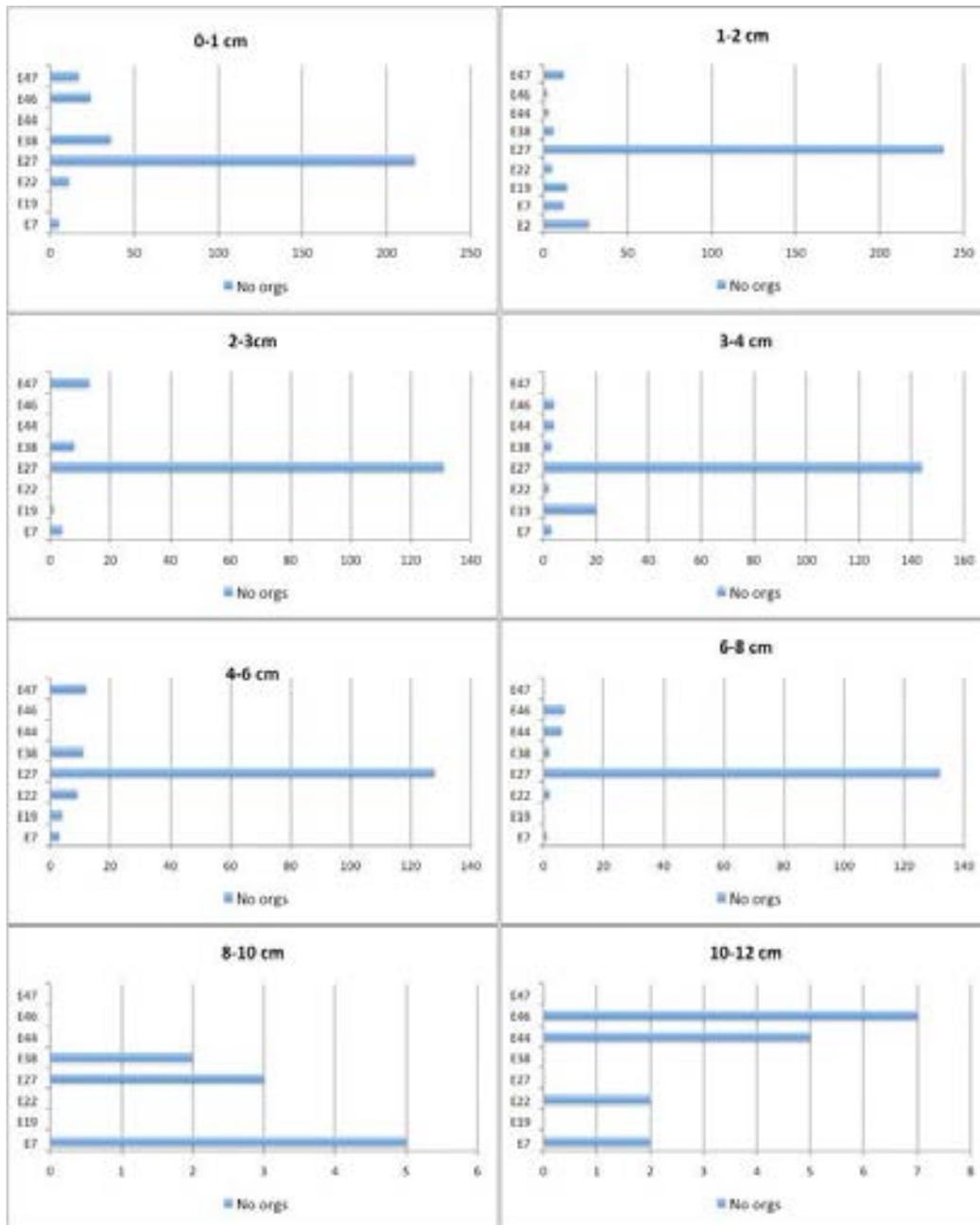


Figura 191. Abundancia de organismos por estratos sedimentarios.

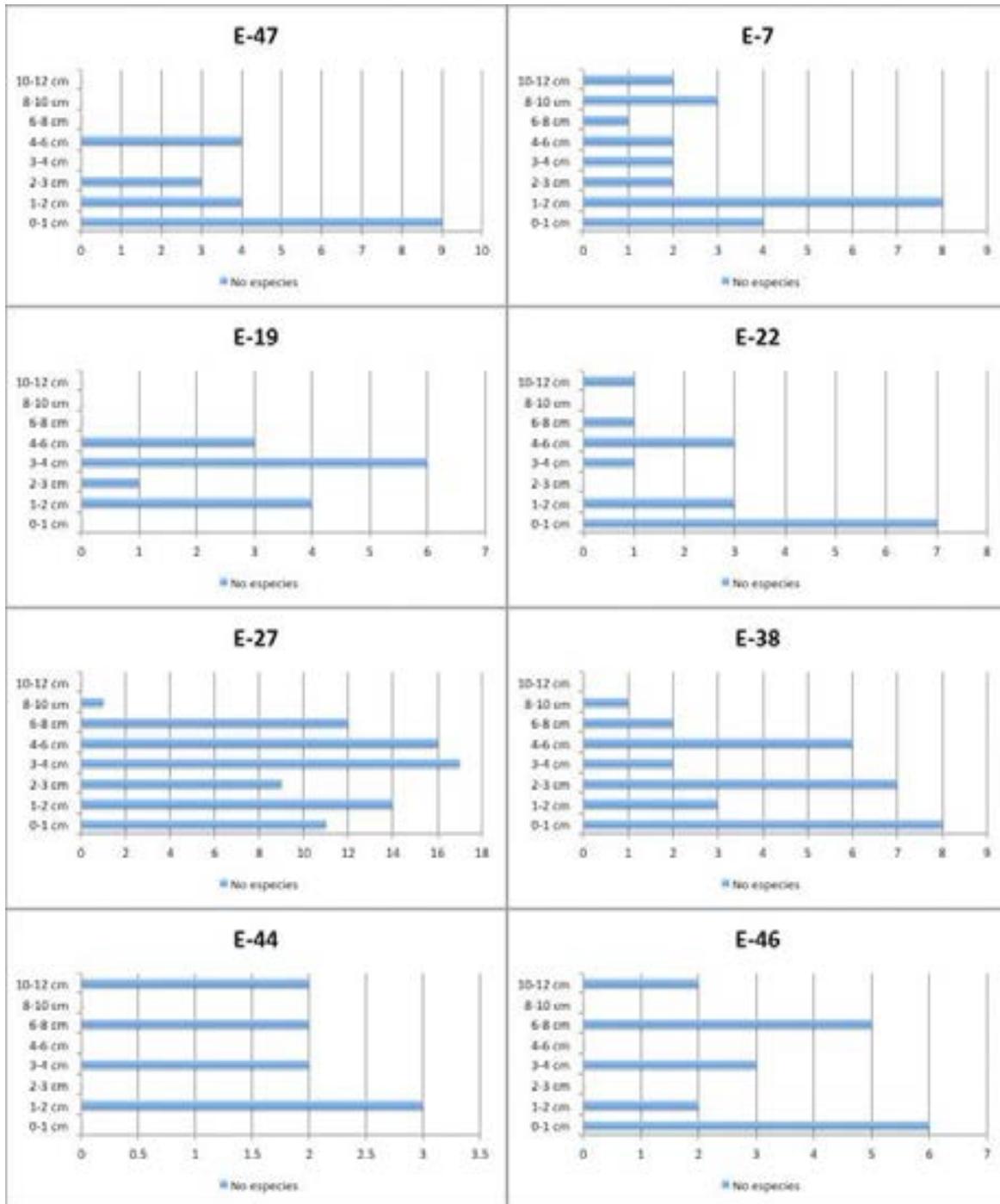


Figura 192. Riqueza de taxones por estratos sedimentarios.

Grupos tróficos

Los moluscos Scaphopoda son generalmente carnívoros, alimentándose de foraminíferos y otros pequeños invertebrados; los Gastropoda pueden ser depositóvoros ó carnívoros mientras que los Bivalvia son filtradores (Geiger et al., 2007; Geiger, 2012). Los Nemertea son carnívoros que se alimentan de poliquetos, moluscos y crustáceos peracáridos (McDermott, 2001).

Los poliquetos Glyceridae y Nephtyidae son carnívoros que se alimentan de moluscos, crustáceos y poliquetos; los Eunicidae y Nereididae son carnívoros y omnívoros. Los Capitellidae, Magelonidae, Maldanidae y Opheliidae son depositóvoros no selectivos; los Ampharetidae son depositóvoros de superficie. Los Sabellidae son filtradores, algunas especies pueden acercar sus coronas tentaculares al fondo y alimentarse de partículas sedimentarias (depositóvoros) (Fauchald & Jumars, 1979). La mayor parte de los poliquetos identificados son tubícolas.

En las muestras estudiadas predominaron los organismos depositóvoros y carnívoros.

Discusión

En ambientes con poco alimento como es el caso de la zona profunda del GM, se debe tamizar con una luz de malla de 0.35 mm como se hizo en este estudio pero la muestra debe ser de mayor tamaño, generalmente 0.2 m² (Rowe, 1996; Rowe et al. 1991). Otros autores han usado 3 núcleos/estación tomados de un nucleador de caja, en el cual cada uno es de 0.05 m² y 20 cm largo (Hernández-Arana et al. 2003). Wei et al. (2010) colectaron 5 muestras por estación con un nucleador Gomex cuya área de muestreo es de 0.17 m², por lo que contaron con 0.85 m² de muestra por estación. Debido a que la talla de muestra con la que contamos es pequeña para estudiar la macrofauna béntica no es posible realizar comparaciones con los trabajos antes mencionados.

Se observa en la Figura 193, tomada de Wei et al. (2012), que en cuanto a abundancia, los taxones Nematoda, Annelida y Polychaeta predominan, constituyendo el 30.3 y 26.2%, respectivamente, del total de macrofauna colectada (ambos grupos suman a 56% del total de la abundancia). En biomasa los poliquetos ocupan el primer lugar (63% C en g), seguido por Amphipoda (14.6%) y Mollusca Bivalvia (10.8%). Cosson et al. (1997) encontraron que los taxones dominantes son Polychaeta, Tanaidacea, Isopoda y Bivalvia. En este trabajo se encontraron 74% de moluscos, 9.3% de crustáceos (principalmente Peracárida), 8.9% Brachiopoda, y 2.9% Polychaeta. A diferencia de Wei et al. (2012) encontramos que los principales taxones en las muestras analizadas son moluscos, crustáceos y brachiópodos.

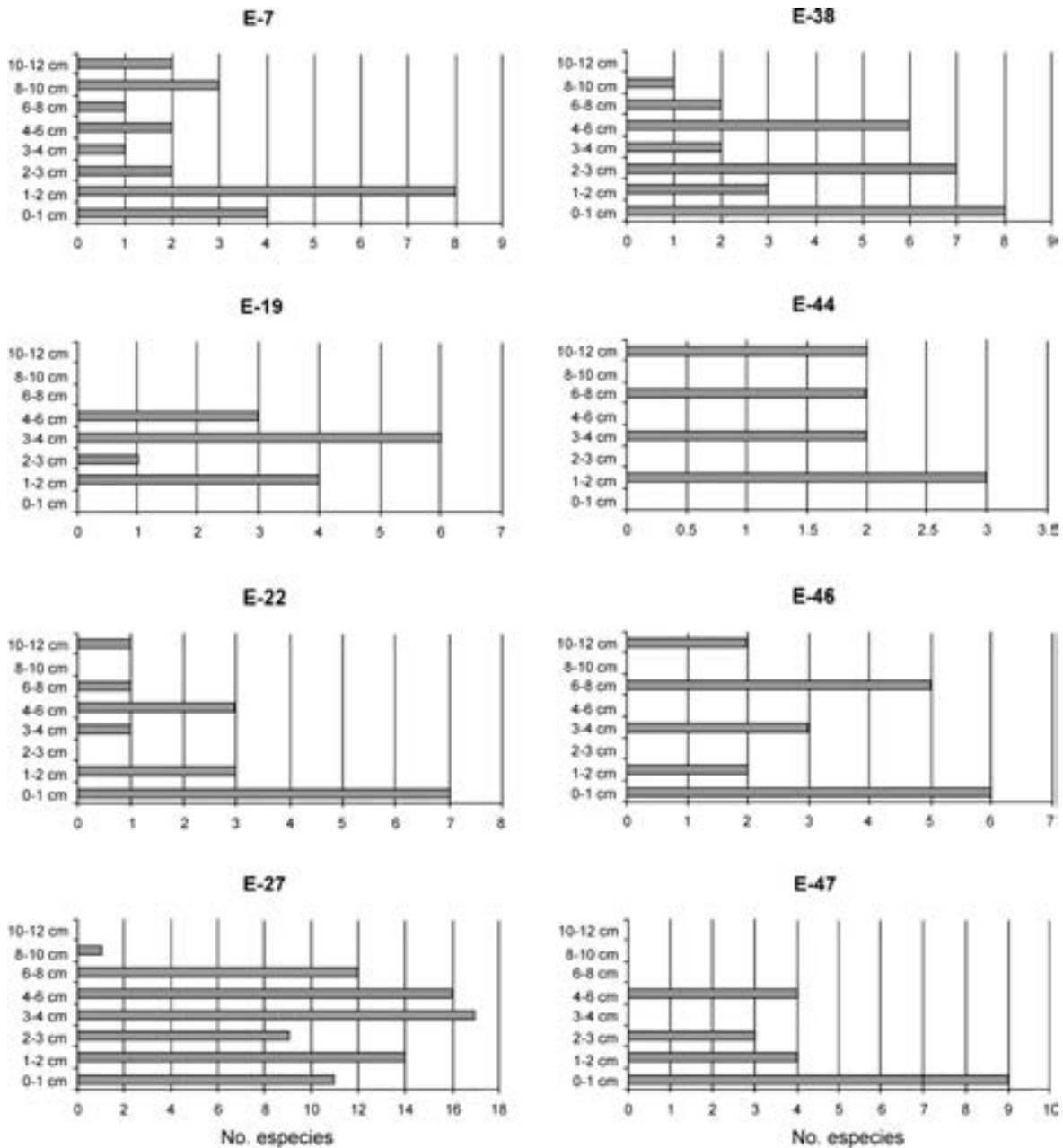


Figura 193. Abundancia de los diferentes taxones de la macrofauna (> 350 um) del GM (Wei *et al.*, 2012).

No se observa una relación entre la densidad y profundidad ya que la estación más somera (E27) y dos profundas (E38, E47) presentan los valores más elevados de densidad.

La abundancia en estos ambientes esta relacionada con una elevada productividad primaria en superficie así como otros aportes de materia orgánica (fitodetritus, cadaveres de animales). Escobar-Briones *et al.* (2008) encuentran

densidades de 9466 ± 2736 ind m^{-2} en la plataforma continental y de 1550 ± 195 ind m^{-2} en la zona más profunda; estos autores constatan una disminución de densidades al alejarse de la costa y a mayor profundidad. En todas las estaciones encuentran que los anélidos poliquetos son los que más contribuyen a la estructura de la comunidad. En este estudio la densidad varió entre 1550 y 9466 ind./ m^2 , sin considerar la E27 por el gran número de micromoluscos presentes.

No siempre el estrato 0-1 cm fue el más abundante y diverso esto puede deberse a la mayor depredación en la capa superficial sedimentaria (Ben-Elihau & Golani, 1990; Amaral et al., 1994; Iken et al., 2001).

El valor más elevado de densidad y la mayor riqueza de taxones se encontró en la estación E27 cerca del canal de Yucatán donde confluyen diversas masas de agua que entran al GM (corriente El Lazo), presentan una temperatura y salinidad más alta y donde los sedimentos son carbonatados. En esta región se presentan afloramientos que incrementan la productividad biológica (Merino, 1992; Monreal-Gómez et al., 2004) y posiblemente permiten un mayor aporte de materia orgánica al fondo favoreciendo las comunidades bénticas.

No se pudo establecer la estructura de la macrofauna y conocer el aporte de biomasa expresada en carbono ($g C/m^2$), tampoco se hicieron calculos de índices ecológicos por que el área de muestreo por estación no fué suficiente para estudiar las comunidades del bentos.

Conclusiones

Se colectaron 1309 organismos pertenecientes a siete filos. Los Mollusca son el grupo macrofaunal dominante (74.4%).

Los moluscos (14 familias, 10 géneros) y poliquetos (10 familias, 7 géneros) fueron los grupos más diversos. Los grupos tróficos dominantes fueron los depositóvoros y carnívoros.

Las densidades más altas se encontraron en las estaciones 27, 38 y las más bajas en las estaciones 7, 19 y 44. El valor más elevado de densidad y la mayor riqueza de taxa se encontró en la estación 27, ubicada cerca al canal de Yucatán.

La riqueza de taxones fue mayor en los tres primeros cm del sedimento que presentaron valores de hasta 14 taxones/estrato, excepto E-27 en que los estratos 3-4 cm y 4-6 cm tuvieron 17 y 16 taxones respectivamente. Los poliquetos fueron más abundantes en los tres primeros cm del sedimento.

Referencias

- Alonso D. R. 2006. Variación espacio-temporal de la densidad de la macrofauna béntica de la planicie abisal en el GM. Tesis Licenciatura, Facultad de Ciencias, UNAM. México.
- Amaral, A., E. Nonato & M. Petti. 1994. Contribution of the polychaetous annelids to the diet of some brazilian fishes. *Mém. Mus. natn. Rist. nat.*, Paris, 162: 331-337.
- Ammons, A. 2007. Macrofaunal community structure on the Gulf of Mexico continental slope: the role of disturbance and habitat heterogeneity at local and regional scales. PhD Dissertation Thesis, Univ. Texas A&M. 202 pp.
- Ben-Elihau, M. N. & Golani, D. 1990. Polychaete annelids on gut content of goat fish (Mullidae) with new polychaete records. Mediterranean coast and the Gulf of Elat (Red Sea). *Mar. Ecol.*, 11: 193-205. Nombrar en texto
- Constanza, R. et al. 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature* 387: 253-260.
- Cosson, N., M. Sibuet & J. Galeron. 1997. Community structure and spatial heterogeneity of the deep-sea macrofauna at three contrasting stations in the tropical northeast Atlantic. *Deep-sea Res. I* Vol. 44: 247-269.
- Escobar-Briones, E. & L. Soto. 1997. Continental shelf benthic biomass in the western Gulf of Mexico. *Continental Shelf Res.* 17: 585-604.
- Escobar-Briones E, Signoret M and Hernandez D. 1999. Variation of the macrobenthic infaunal density in a bathymetric gradient: western Gulf of Mexico. *Ciencias Marinas* 25: 193-212.
- Escobar Briones, E., L. Estrada Santillán and P. Legendre. 2008. Density and biomass of macrofauna in the Campeche canyon, southern Gulf of Mexico. *Deep sea Res.* Vol 55: 2679-2685.
- Escobar-Briones, E., A. Gaytan-Caballero & P. Legendre. 2008. Epibenthic megacrustaceans from the continental margin, slope and abyssal plain of the Southwestern Gulf of Mexico: Factors responsible for variability in species composition and diversity. *Deep-Sea Research II* 55: 2667–2678.
- Fauchald, K. & P. Jumars. 1971. The Diet of Worms. *Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev.* 17: 193-284.

- Gage, J.D. and Tyler, P.A. (1991) Deep-Sea biology: A natural history of organisms at the deep-sea floor. Cambridge University Press, Cambridge, 504 pp.
- Geiger D., Marshall B., Ponder W., Sasaki T. & Warén, A. 2007. Techniques for collecting, handling, preparing, storing and examining small molluscan specimens. *Molluscan Research* 27: 1-50.
- Geiger, D.L. 2012. Monograph of the Little Slit-Shells. Santa Barbara Museum of Natural History. 1291 pp.
- Gilinsky, E. 1984. The role of fish predation and spatial heterogeneity in determining benthic community structure. *Ecology* 65: 465-468.
- Hernández R. D. 1999. Riqueza taxonómica, densidad y biomasa de la infauna macrobéntica a lo largo de un gradiente batimétrico en el sector occidental del GM. Tesis de Licenciatura FES Zaragoza, UNAM, México.
- Iken, K., T. Brey, U. Wand, J. Voigt, P. Junghans. 2001. Food web structure of the benthic community at the Porcupine abyssal plain (NE Atlantic): a stable isotopic analysis. *Progress in Oceanography* 50: 383-405.
- McDermott, J. 2001. Status of the Nemertea as prey in marine ecosystems. *Hydrobiologia* 456: 7-20.
- Merino, M. 1992. Afloramiento de la plataforma de Yucatán: estructura y fertilización. Tesis Doctoral, ICMYL-UNAM, México.
- Monreal-Gómez, A., D. Salas & A. Gracia. 2004. GM: Circulación y productividad. *Ciencias* 76: 25-33.
- Morse, J. & M. Beazley. 2008. Organic matter in deep water sediments of the Northern Gulf of Mexico and its relationship to the distribution of benthic organisms. *Deep-Sea Res. II*, Vol. 55: 2563-2571.
- Rowe G., M. Sibuet, D. Deming, A. Khripounoff, J. Tietjan, S. Macko & R. Theroux. 1991. "Total" sediment biomass and preliminary estimates of organic carbon residence time in deep-sea benthos. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 79: 99-114.
- Rowe, G., C. Wei, C. Nunally, R. Haedrich, P. Montagna, J. Baguley, J. Bernhard, M. Wicksten, A. Ammons, E. Escobar, Y. Soliman, J. Deming. 2008. Comparative biomass structure and estimated carbon flow in food webs in the deep Gulf of Mexico. *Deep-Sea Research II* 55: 2699-2711.

- Rosenberg, G., F. Moretzsohn & E. García. 2009. Gastropoda (Mollusca) of the Gulf of Mexico, Pp. 579–699 in Felder, D.L. and D.K. Camp (eds.), Gulf of Mexico—Origins, Waters, and Biota. Biodiversity. Texas A&M University Press. 699 pp.
- Wei, C.L., G. Rowe, G. Fain Hubbard, A. Scheltema, G. Wilson, I. Petrescu, J. Foster, M. Wicksten, M. Chen, R. Davenport, Y. Soliman, Y. Wang. 2010. Bathymetric zonation of deep-sea macrofauna in relation to export of surface phytoplankton production. *Mar. ecol. Prog. Ser.* Vol 339: 1-14.
- Wei, C., G. Rowe, E. Escobar, C. Nunnally, Y. Soliman & N. Ellis. 2012. Standing stocks and body size of deep-sea macrofauna. Predicting the baseline of 2010 Deepwater Horizon oil spill in the northern Gulf of Mexico. *Deep-Sea Res. I*, Vol. 69: 82-99.
- Snelgrove, P. 1999. Getting to the bottom of marine biodiversity: sedimentary habitats. *Bioscience* 49: 129-138.
- Suess, E. 1980. Particulate organic carbon flux in the ocean-surface productivity and oxygen utilization. *Nature* 288: 260-263.
- Uebelacker, J. & P. Johnson. 1984. Taxonomic Guide to the Polychaetes of the Northern Gulf of Mexico. Final Report to the Minerals Management Service. B.A. Vittor & Associates, Inc. Mobile, Alabama. 7 Volumes.

MONITOREO DE HONGOS EN SEDIMENTOS MARINOS

Responsable: Dra. Meritxell Riquelme Pérez, CICESE

Participantes: M.C. Lluvia Vargas Gastélum, CICESE

Antecedentes

El 20 de abril del 2010 ocurrió uno de los desastres antropogénicos más importantes de la historia, a 60 km del sureste de la costa de Lousiana, en el GM; la plataforma *Deepwater Horizon* (DH) sufrió una explosión, provocando su hundimiento. Como consecuencia, se liberaron ~4.9 millones de barriles de petróleo (hasta el 15 de julio del 2010, en que fue controlado) (Lu *et al.*, 2012; Mendelssohn *et al.*, 2012).

La comunidad biológica del GM pudo haber sido altamente afectada por la exposición a una alta concentración de hidrocarburos. De hecho, ya hay reportes de cambios en la comunidad biológica del GM, como resultado de impacto ante la exposición a una alta concentración de hidrocarburos en la columna de agua; ejemplos de estos cambios son los observados en corales ubicados en Macondo (a 61 km de Lousiana, E.U.A.), como signos de estrés, pérdida de tejido, exceso de producción de mucosa (White *et al.*, 2012) y peces, siendo estos últimos los que se consideran dentro de los organismos que han sufrido un mayor impacto, tanto a nivel ambiental como económico, provocando pérdidas de millones de dólares (Mancera-Pineda *et al.*, 2013).

Se ha demostrado que el petróleo persiste en la columna de agua del GM (Kimes *et al.*, 2013). El tiempo de persistencia depende de los cambios físicos y químicos del petróleo en el agua, y su dispersión vertical depende en gran parte de que el petróleo se adhiera a otros cuerpos con mayor densidad y así sedimentarse (cetmar, <http://www.cetmar.org/documentacion/comportamiento.htm>).

La presencia de hongos en ecosistemas marinos ya ha sido reportada y su diversidad incluye diferentes formas y linajes (Richards *et al.*, 2012). Los estudios metagenómico de sedimentos marinos del GM son escasos, y menor aún los realizados para analizar el impacto del derrame petrolero en DH. Se considera que la exposición a grandes concentraciones de hidrocarburos derivadas del derrame petrolero de la plataforma DH pudo haber tenido efecto en las comunidades fúngicas presentes en los sedimentos marinos del GM.

En los últimos años se han desarrollado métodos de secuenciación masiva, los cuales permiten obtener miles de secuencias de ADN en poco tiempo. Estos avances han posibilitado profundizar en estudios de diversidad de microorganismos, incluyendo hongos. La pirosecuenciación (Roche 454) se ha convertido en uno de los métodos más empleados en proyectos de diversidad fúngica en ecosistemas terrestres (Buee *et al.* 2009; Jumpponen *et al.* 2010; Rousk *et al.* 2010; Lentendu *et al.* 2011; Dumbrell *et al.*

2011; Orgiazzi et al. 2013; Orgiazzi et al. 2012), ya que posibilita la obtención de secuencias largas de ADN (hasta 1,000 pb).

Una de las principales ventajas de estudios de diversidad de hongos mediante la utilización de métodos de secuenciación masiva, es la detección de especies crípticas, es decir, especies que son morfológicamente indistinguibles, además de especies que no son posibles de aislar por métodos convencionales de cultivo

Las campañas de muestreo XIXIMI 1 y 2 permitieron determinar qué especies fúngicas se encuentran en los sedimentos marinos, y si éstas podrían tener una participación en los diferentes procesos biológicos los cuales pudieron haber sido afectados por las altas concentraciones de hidrocarburos. En las campañas de muestreo XIXIMI 1 y 2 se procesaron un total de 10 y 11 muestras, respectivamente, en las cuales las especies de *Candida*, que fue el género dominante, disminuyeron en abundancia (número de secuencias por filotipo) entre las campañas XIXIMI. La detección de nuevas especies (i.e. *Chytriumyces angularis*) en la campaña XIXIMI 2, las cuales no se reportaron en la campaña XIXIMI 1, sugiere un proceso de sucesión de hongos en sedimentos marinos. La ampliación de los estudios de diversidad por medio de la utilización de secuenciación masiva en sedimentos marinos, permitiría detectar cambios en la abundancia y composición de las comunidades fúngicas.

Objetivo

Utilizar la pirosecuenciación 454 para identificar los diferentes filotipos fúngicos presentes en muestras de sedimentos marinos en la zona del GM obtenidos durante las campañas XIXIMI 2 y 3. Además, se pretenden comparar los resultados obtenidos previamente en la campaña XIXIMI 2 por medio de genotecas y secuenciación Sanger, con los obtenidos utilizando Pirosecuenciación como plataforma de secuenciación.

Metodología

Estrategia de muestreo.

Se obtuvieron un total de 10 núcleos (5 réplicas por núcleo) correspondientes a las siguientes estaciones: E47, E46, E44, E43, E38, E27, E22, E19, E7 y E2 (Figura 194).

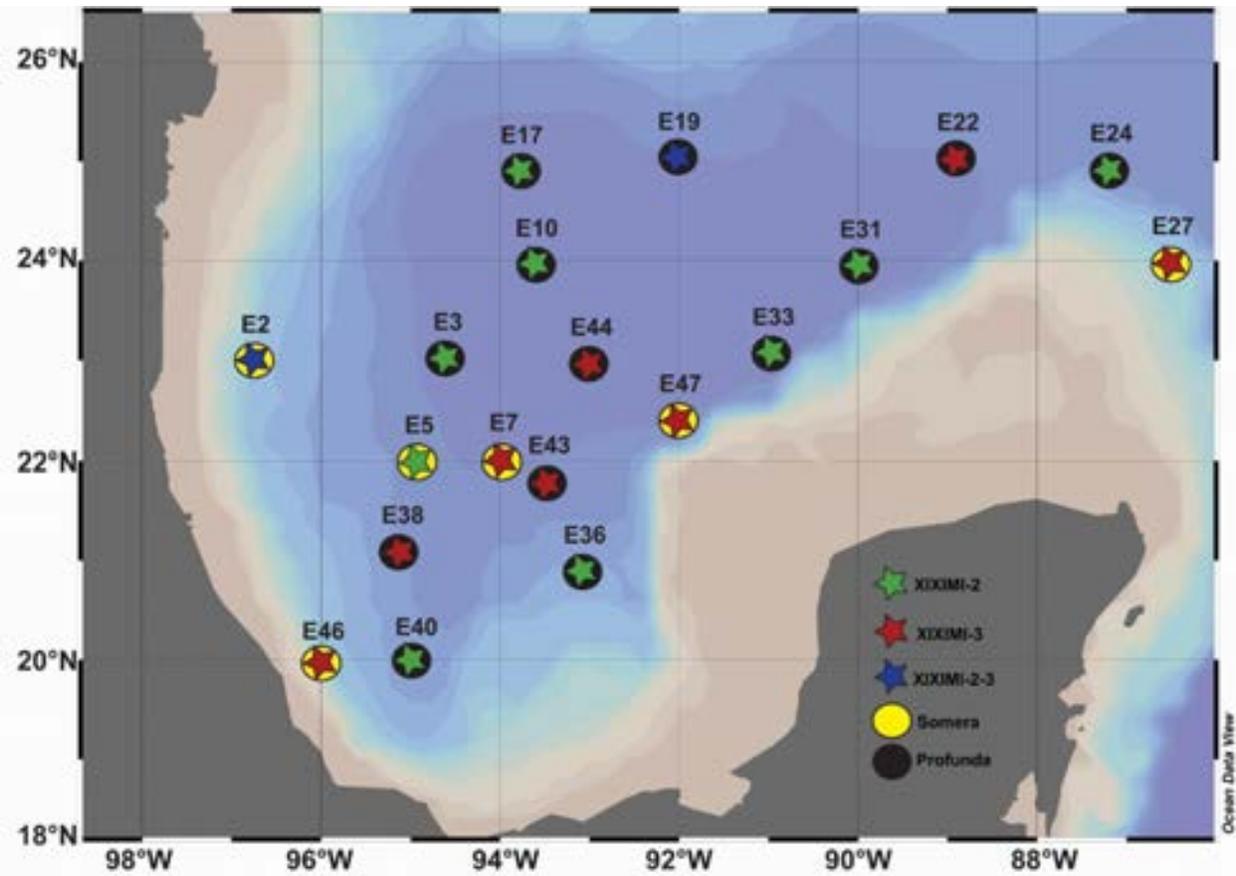


Figura 194. Mapa en el que se señalan las estaciones muestreadas con nucleador.

Para la toma de muestras en cada estación se llevó a cabo el siguiente protocolo usando guantes de nitrilo en todo momento:

1. Abrir cinco jeringas (1 ml) nuevas y cortarles la punta (con la aguja incluida) de tal forma que quede un cilindro.
2. Sumergir las jeringas (cilindro) en el núcleo (Figura 195).
3. Sacar las jeringas e inmediatamente taparlas con parafilm en lo que se transporta al laboratorio.
4. Vaciar aproximadamente 1 ml de sedimento en tubos con amortiguador de sacarosa 25% w/v (almacenados a temperatura ambiente) (Figura 195). Agitar para que se haga una muestra homogénea de amortiguador y sedimento. Sellar los tubos eppendorf con parafilm horizontal y verticalmente. Marcar cada tubo con el número de estación y número de submuestreo, por ejemplo: 1-01, 1-02, 1-03, 1-04, 1-05.
5. Sellar con parafilm la jeringa que contiene el resto del sedimento (también de forma horizontal y vertical) y marcar al igual que los tubos.

6. Las muestras se almacenan en bolsas ziploc a -20°C durante la campaña XIXIMI y su transporte al laboratorio. Posteriormente se almacenan a -80°C hasta su procesamiento.

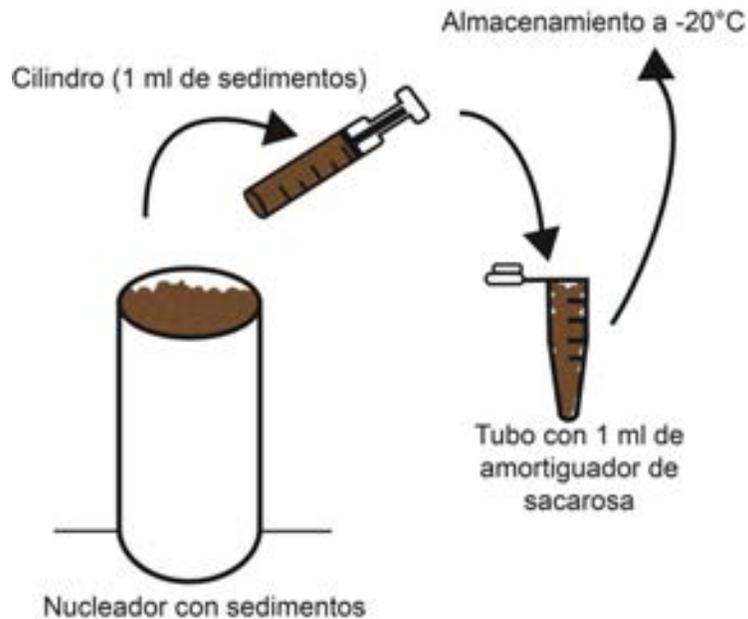


Figura 195. Esquema de la toma de muestras, así como método de almacenamiento de sedimentos en tubos de 1.5 ml con amortiguador de sacarosa 25% w/v.

Extracción y envío a secuenciación de ADN genómico.

Las muestras de sedimento fueron centrifugadas a 13,000 rpm por 1 minuto para eliminar la solución amortiguadora de sacarosa. Se extrajo ADN total de cada muestra utilizando el Power Soil DNA Extraction Kit (MoBio Lab), especial para extracción de ADN de suelos, siguiendo el protocolo proporcionado por el fabricante. Se utilizaron 0.25 gramos de sedimento por extracción; una vez extraído el ADN, se realizaron mezclas de las réplicas, conformando una sola muestra de ADN por estación.

Además de las muestras colectadas en la campaña XIXIMI 3, se enviaron a secuenciar muestras de la campaña XIXIMI 2: E2, E3, E5, E10, E17, E19, E24, E31, E33, E36, y E40.

Se llevó a cabo la cuantificación de ADN mediante un espectrofotómetro NanoDrop (Thermo Fisher Scientific Inc., Modelo: Lite Nanodrop, Waltham, MA, USA) y utilizando 1 μl de muestra y como blanco, agua.

La compañía seleccionada para el servicio de secuenciación por la plataforma de pirosecuenciación fue Research & Testing Laboratory (<http://www.researchandtesting.com/>). Se solicitó a la compañía la amplificación de toda la región ITS (ITS1-5.8S-ITS2) del rADN fúngico; esto con los oligonucleótidos ITS1F (oligonucleótido sentido) e ITS4 (oligonucleótido antisentido) y la secuenciación de dicha región.

Análisis de secuencias ITS1

Una vez que se recibieron las secuencias ITS del r-ADN, se procedió a analizar el proceso que realizó la compañía de secuenciación (Research & Testing Laboratory) para determinar la calidad de las secuencias, de la siguiente manera:

1. Calidad (Quality Trimming). Este proceso se basa en determinar la calidad de los extremos de cada lectura. Para esto se utiliza el archivo con terminación .qual (provisto por el secuenciador), el cual ayuda a determinar en qué parte de la secuencia se encuentran bases que no cumplen con el criterio de calidad. En este caso el criterio de calidad para cada base de cada secuencia fue de 25, es decir, las bases que tengan una puntuación menor a 25 son eliminadas.
2. Detección de quimeras (Chimera Checking). La formación de secuencias quiméricas se produce cuando la extensión de una secuencia es “abortada” y esta juega un papel de oligonucleótido en procesos subsecuentes de extensión durante los siguientes ciclos de PCR. El procedimiento que se utilizó para detectar secuencias quiméricas es mediante la ejecución de UCHIME en modo *de novo* (Edgar *et al.*, 2011). Este programa supone principalmente que la secuencia a analizar corresponde a una secuencia única en la muestra amplificada y que las secuencias quiméricas se encuentran en menor proporción.
3. Eliminación de *ruido*. Este proceso toma los resultados del Quality Trimming y el Chimera Checking, eliminando los errores de bases y secuencias de mala calidad. El producto de este proceso es el mencionado en el punto 4 como resultados del proceso de pirosecuenciación.

Una vez revisado el proceso de calidad al cual las secuencias fueron sometidas, se procedió a su análisis.

El software a utilizar para las primeras etapas (incisos a-g) de análisis de las secuencias es QIIME (Quantitative Insights Into Microbial Ecology, <http://qiime.org/>). Este es considerado un programa amigable para el análisis de grandes cantidades de secuencias y en la actualidad es ampliamente utilizado para el procesamiento de datos provenientes de procedimientos de secuenciación como lo es pirosecuenciación.

- a) Check Mapping File. Es necesario realizar un chequeo del archivo .txt (proporcionado por la compañía, ver punto 4 como resultados del proceso de pirosecuenciación) para determinar si contiene caracteres incompatibles con el programa QIIME.
- b) Extracción de secuencias ITS. Se utilizó el programa Fungal ITS Extractor, el cual extrae las regiones ITS1 e ITS2, excluyendo así los fragmentos que no son de interés para el análisis.
- c) Split Library. En esta etapa, se organizan las secuencias de acuerdo a su secuencia identificadora (barcode) e ID de la muestra a la que pertenecen además de que se realiza un filtro de calidad de homopolímeros (bases que se repiten de forma consecutiva) y bases ambiguas (representadas por la letra N en la secuencia).
El número de homopolímeros permitidos fue 8 (White *et al.*, 2013)
El número de bases ambiguas permitidas fue 0 (White *et al.*, 2013)
El rango de longitud de secuencias fue de 100 hasta 250 pb.
- d) Agrupamiento de OTUs. Esta etapa consiste en agrupar las secuencias de acuerdo a un porcentaje de similitud o disimilitud. En este proceso se realiza el empaquetamiento de OTUs (Operational Taxonomic Unit). El método de agrupamiento utilizado fue UCLUST (Edgar, 2010) y se fijó un porcentaje de similitud de 97% (o disimilitud del 3%).
- e) Selección de secuencias representativas. Para un mejor manejo de los datos, se realiza una selección de secuencias que representen a cada uno de los OTUs.
- f) Asignación de taxonomía. A cada una de las secuencias representativas se le asigna su taxonomía correspondiente, esto mediante la comparación con una base de datos que se debe proporcionar, en este caso la base de datos UNITE (<http://unite.ut.ee/index.php>). El porcentaje de similitud fue de 97%.
- g) Tabla de OTUs. En esta etapa se tabuló el número de OTUs encontrado en cada muestra y su correspondiente identificación taxonómica

Análisis comparativo de composición

Se realizó una comparación de la composición taxonómica entre las diferentes muestras de las campañas XIXIMI 2 y 3. Este análisis se realizó a nivel de orden.

Análisis estadístico

Con el fin de distinguir diferencias de riqueza de OTUs entre las muestras y determinar el esfuerzo de secuenciación y muestreo, un análisis de rarefacción fue implementado usando Ecosim v7 (Entsminger, 2012). Además el número de OTUs esperado fue calculado mediante el índice de Chao 1 y en términos de determinar la diversidad, los índices de Shannon y Simpson fueron también calculados con el programa EstimateS v9 (Colwell, 2013).

Con el objetivo de analizar las similitudes de la composición fúngica entre muestras de las campañas XIXIMI 2 y 3, se llevó a cabo un Análisis de Escalamiento Multidimensional No-Métrico (NMDS) y un Análisis de Varianza (ANOVA); éste último mediante la función Anosim usando el paquete MASS (Venables and Ripley, 2002) y Vegan (Oksanen *et al.*, 2013) en R v.3.01 (R Development Core Team, 2008), respectivamente.

Resultados

La concentración de ADN genómico en muestras de las campañas XIXIMI 2 y 3 variaron entre 2.5 – 33.3 y 12.6 – 21.5 ng/μl, respectivamente (Tabla 35).

Tabla 35. Concentración de ADN genómico de muestras de sedimentos de la campaña XIXIMI 2 y campaña XIXIMI 3.

Campaña XIXIMI 2		Campaña XIXIMI 3	
Estación	ADN (ng/μl)	Estación	ADN (ng/μl)
E2	18	E2	21.5
E3	34	E7	12.6
E5	33.3	E19	14.2
E10	3.2	E22	15.7
E17	2.5	E27	14.7
E19	32.9	E38	13.7
E24	35	E43	17.5
E31	36	E44	13.3
E33	32.7	E46	13.8
E36	34	E47	19.2
E40	2.6		

Amplificación de la región ITS del rADN

En las muestras de la campaña XIXIMI 2 no hubo problema alguno en su procesamiento. De un total de 10 muestras de la campaña XIXIMI 3, solo 9 muestras se lograron procesar ya que no se obtuvo amplificación de la región de interés en la cantidad de muestra restante almacenada en el caso de la E44.

Análisis de secuencias: Riqueza de OTUs e índices de diversidad

Se recibieron un total de 187,766 secuencias. Un total de 73,430 secuencias pasaron el filtro de calidad establecido. De las muestras de la campaña XIXIMI 2 se obtuvieron un total de 21,174 secuencias y de la campaña XIXIMI 3, un total de 52,083 secuencias (Tabla 36).

Tabla 36. Número de secuencias por muestra de sedimento obtenido en las campañas XIXIMI 2 y 3.

Campaña XIXIMI 2		Campaña XIXIMI 3	
Estación	# Secuencias	Estación	# Secuencias
E2	195	E2	5,873
E3	2,733	E7	8,425
E5	851	E19	1,795
E10	811	E22	10,050
E17	321	E27	18,396
E19	6,565	E38	2,061
E24	2,947	E43	949
E31	2,137	E46	1,357
E33	969	E47	3,177
E36	2,854		
E40	791		
TOTAL	21,174	TOTAL	52,083

Considerando el número de OTUs observado de la campaña XIXIMI 2 (Tabla 37), las estaciones con mayor número de OTUs son las E3, E19 y E24, mientras que las menores son las E5, E10 y E40. En contraste con la estimación del índice de Chao, E2, E10 y E40 presentan mayor número de OTUs predicho, mientras que E19 el menor (Tabla 37). Las curvas de rarefacción de la campaña XIXIMI 2 (Figura 196) muestran que el esfuerzo de muestreo no fue suficiente para caracterizar la diversidad de la comunidad, ya que las curvas no alcanzan la asíntota, además los valores en OTUs entre las campañas XIXIMI 2 y 3 varían, 14 y 33 respectivamente.

Considerando la campaña XIXIMI 3, el número mayor de OTUs observado se encuentra en la estación E27, mientras que el menor en las estaciones E19 y E38. En contraste con el estimador no paramétrico Chao 1, E19 y E46 son las que presentan un mayor número de OTUs predicho, mientras que las estaciones E2 y E27 presentan el menor (Tabla 37). Se puede observar que las curvas de rarefacción de la campaña XIXIMI 3 (Figura 197) tienden a la asíntota, lo cual indica que se cubrió casi en su totalidad el número de OTUs presentes.

De acuerdo a los índices de diversidad calculados para las estaciones de la campaña XIXIMI 2, el índice de Shannon no difiere entre estaciones y sus valores varían entre 0.8 y 0.94. En el caso del índice de Simpson, las estaciones E2, E5 y E17 presentaron mayor diversidad (0.51-0.58), mientras que las estaciones E3, E10, E19, E31 y E40 resultaron con menor diversidad con valores menores a 0.2 (Tabla 37).

Comparando las estaciones de la campaña XIXIMI 3, el índice de Shannon muestra que no hay diferencias entre las estaciones. En cuanto al índice de Simpson, la estación con mayor diversidad es E47, mientras que la menor es E7 (Tabla 37).

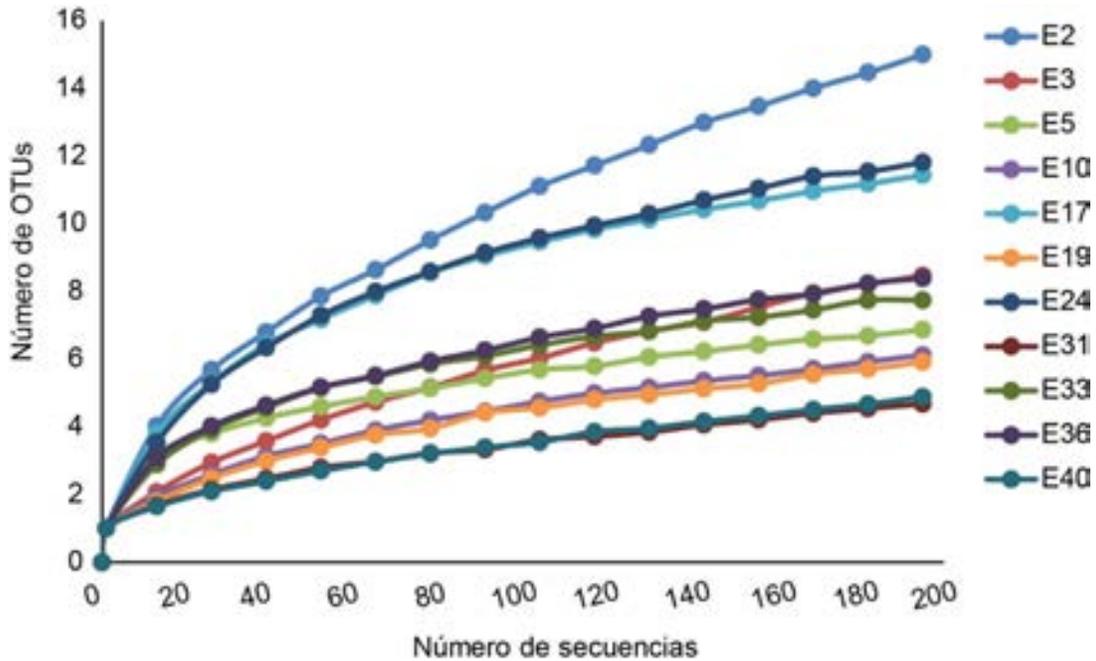


Figura 196. Curvas de rarefacción describiendo la riqueza fúngica observada entre muestras de la campaña XIXIMI 2.

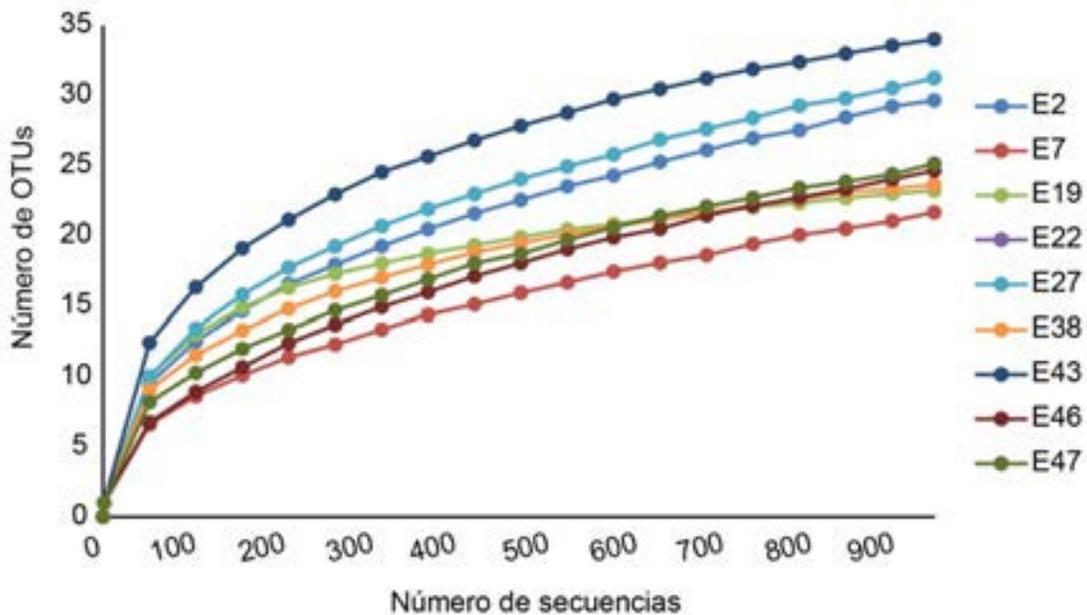


Figura 197. Curvas de rarefacción describiendo la riqueza fúngica observada entre muestras de la campaña XIXIMI 3.

Tabla 37. Número de OTUs observado e índices de riqueza y diversidad.

Campaña XIXIMI 2				
Estación	# OTUs observados	Chao 1	Shannon	Simpson
E2	15	84	0.93 ± 0.08	0.54
E3	27	75	0.9 ± 0.14	0.18
E5	13	63	0.86 ± 0.21	0.58
E10	11	86	0.94 ± 0.05	0.15
E17	13	55	0.85 ± 0.25	0.51
E19	26	24	0.8 ± 0.36	0.14
E24	31	70	0.87 ± 0.17	0.40
E31	19	82	0.93 ± 0.09	0.12
E33	17	78	0.91 ± 0.11	0.36
E36	24	40	0.84 ± 0.31	0.43
E40	10	88	0.94 ± 0	0.10
Campaña XIXIMI 3				
Estación	# OTUs observados	Chao 1	Shannon	Simpson
E2	62	78	1.87 ± 0.21	0.75
E7	54	142	2.08 ± 0.08	0.55
E19	26	163	2.15 ± 0.04	0.66
E22	67	101	1.92 ± 0.19	0.70
E27	105	50	1.83 ± 0.28	0.69
E38	28	154	2.12 ± 0.07	0.73
E43	34	131	2.05 ± 0.11	0.84
E46	29	172	2.17 ± 0	0.74
E47	39	117	1.99 ± 0.15	0.77

Análisis comparativo de composición

En la campaña XIXIMI 2, el orden de hongos más abundante en todas las estaciones es el de los *Saccharomycetales* (representando del 35% al 99% de los taxones). Además, los órdenes *Sordariales* y *Agaricales* se encuentran presentes en casi todas las muestras, excepto en E3 y E31, y E24, E31 y E40, respectivamente. El orden *Malasseziales* solo se encuentra en las estaciones E19 y E24. La estación con mayor diversidad de órdenes es la E2 (Figura 198).

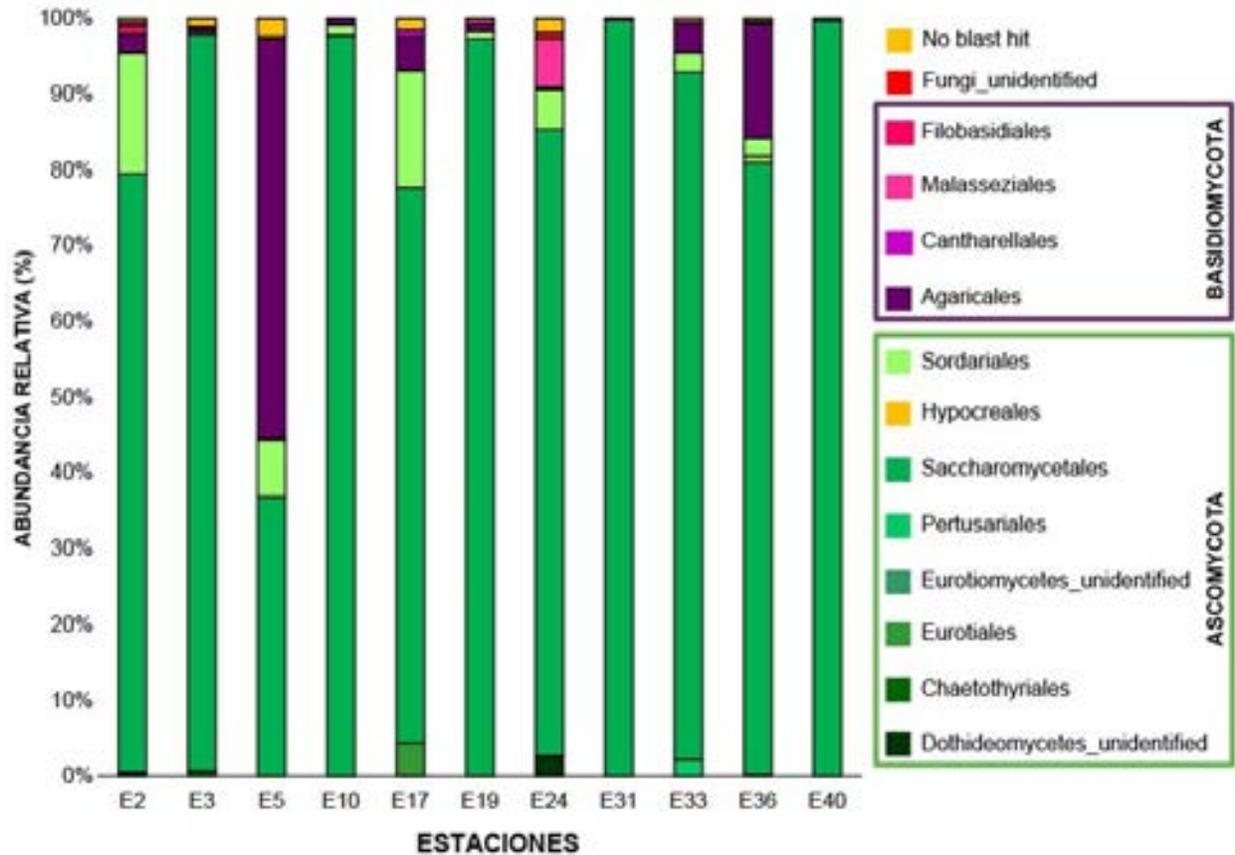


Figura 198. Análisis comparativo de composición taxonómica a nivel de clase en muestras de sedimento de la Campaña XIXIMI 2.

En la campaña XIXIMI 3, el orden más abundante y que estuvo presente en todas las estaciones también son los *Saccharomycetales*, representando desde el 30% hasta el 75% de la composición total de órdenes. En abundancia, este orden es seguido por el de los *Sordariales*. Además cabe resaltar la presencia de *Helotiales* en la estación E43, y de *Xylariales* en las estaciones E22 y E47. La estación con mayor diversidad de órdenes es la E43 (Figura 199).

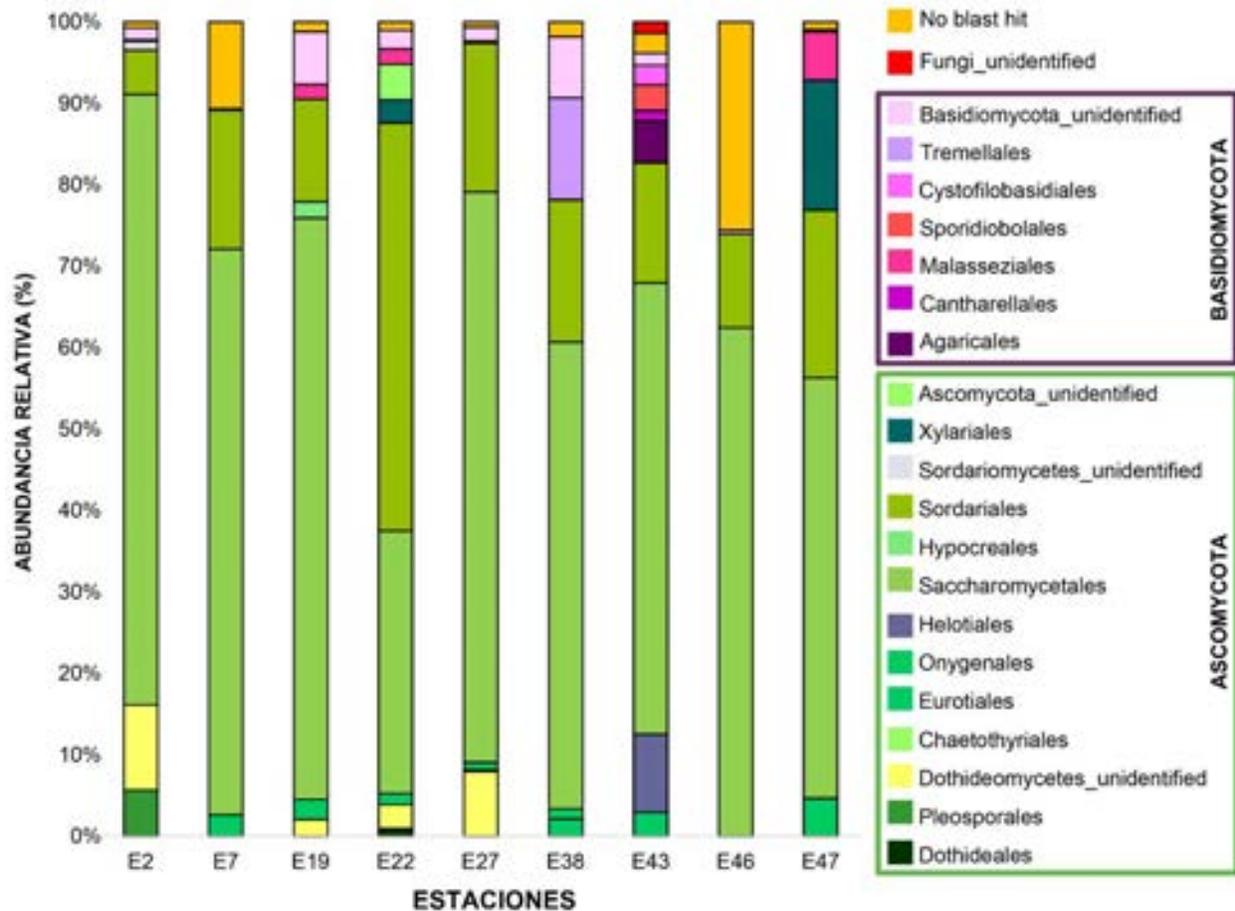


Figura 199. Análisis comparativo de composición taxonómica a nivel de clase en muestras de sedimento de la Campaña XIXIMI 3.

Comparando la estación E2 entre las campañas XIXIMI 2 y 3, se puede observar un cambio en la abundancia de la clase *Sordariales*, de un 15% en la campaña XIXIMI 2 a un 5% en la campaña XIXIMI 3. Además, en la campaña XIXIMI 2 no se detecta la presencia de *Pleosporales*, mientras que en la campaña XIXIMI 3 este orden representa el 5.5% de la comunidad; a pesar de estos cambios, el orden *Saccharomycetales* sigue siendo el más abundante (Figura 198 y Figura 199).

Para la estación E19, se observa que en la campaña XIXIMI 3 hay mayor diversidad fúngica que en la campaña XIXIMI 2. El orden *Saccharomycetales* sigue siendo el más abundante. En la campaña XIXIMI 3, se denota la presencia de *Eurotiales*, los cuales no se encuentran en la campaña XIXIMI 2, mientras que el orden *Agaricales*, solo se encuentra en la campaña XIXIMI 2 y no en la campaña XIXIMI 3 (Figura 198 y Figura 199).

Comparación entre campañas XIXIMI de filotipos identificados

Existen tanto coincidencias como diferencias entre los filotipos encontrados en las campañas XIXIMI 2 y 3. Los filotipos que persisten en todas las estaciones de la campaña XIXIMI 2 y 3 son *Candida albicans* y *Gelasinospora tetrasperma*. En la campaña XIXIMI 2, se denota la presencia de los filotipos *Coprinopsis candidolanata* y *Uncultured Candida*, los cuales se encuentran en casi todas las estaciones. En la campaña XIXIMI 3, los filotipos presentes que no coinciden con la campaña XIXIMI 2 son *Penicillium chrysogenum*, *Meyerozyma* sp., *Hanseniaspora tetrasperma* y *Xylaria* sp. (Tabla 38).

Tabla 38. Filotipos identificados por estación en las campañas XIXIMI 2 y 3. El color indica presencia del filotipo en la estación.

Filotipos	Campaña XIXIMI 2											Campaña XIXIMI 3								
	2	3	5	10	17	19	24	31	33	36	40	2	7	19	22	27	38	43	46	47
<i>Aureobasidium pullulans</i>																				
<i>Biscogniauxia</i> sp. HHP54																				
<i>Candida albicans</i>																				
<i>Candida dubliniensis</i>																				
<i>Candida glabrata</i>																				
<i>Candida tropicalis</i>																				
<i>Candida viswanathii</i>																				
<i>Cantharellales</i> sp.																				
<i>Ceratobasidium</i> sp. FPUB156																				
<i>Clavicipitaceae</i> sp. NGp20a																				
<i>Coccidioides posadasii</i>																				
<i>Coprinopsis candidolanata</i>																				
<i>Coprinopsis</i> sp. MUC1																				
<i>Cryptococcus albidus</i>																				
<i>Cryptococcus</i> sp. SM13L02																				
<i>Cystofilobasidium infirmominiatum</i>																				
<i>Debaryomyces prosopidis</i>																				
<i>Dothideomycetes</i> sp.																				
<i>Eurotium repens</i>																				
<i>Exophiala crusticola</i>																				
<i>Fusarium oxysporum</i>																				
<i>Gelasinospora tetrasperma</i>																				
<i>Hanseniaspora thailandica</i>																				
<i>Lobothallia alphoplaca</i>																				
<i>Malassezia restricta</i>																				
<i>Meyerozyma</i> sp. ALV																				
No blast hit																				
<i>Onygenales</i> sp. BC8																				
<i>Penicillium chrysogenum</i>																				
<i>Periconia macrospinosa</i>																				
<i>Rhodotorula mucilaginosa</i>																				
<i>Schizophyllum commune</i>																				
<i>Sistotrema brinkmannii</i>																				
<i>Soil fungal</i> sp. 7M2																				
<i>Sordariomycetes</i> sp. genotype 302																				

Discusión

En comparación con los estudios de diversidad fúngica realizados con las muestras de las campañas XIXIMI 1 y 2, por medio de la creación de genotecas y posterior secuenciación Sanger, los análisis realizados por pirosecuenciación con las muestras de XIXIMI 2 y 3 han aportado mucha más información. Esto es debido principalmente al cambio en la metodología utilizada. El uso de secuenciación masiva de siguiente generación, en este caso, pirosecuenciación 454, ha permitido profundizar en los estudios de diversidad fúngica en sedimentos marinos del GM, descubriendo así una gran variedad y abundancia de taxones que no se habían identificado en los estudios anteriores.

En ambas campañas (XIXIMI 2 y 3), el orden de los *Saccharomycetales* fue el más abundante y se encontró presente en todas las estaciones (Figura 198 y Figura 199). Al parecer este orden de *Saccharomycetales* así como también *Eurotiales*, *Dothideales*, *Hypocreales*, y *Xylariales*, entre otros, han sido relacionados a las esponjas marinas (Richards *et al.*, 2012). Esta asociación ha sido estudiada para determinar la actividad biológica y la producción de metabolitos secundarios con actividad antifúngica, antialgal y antibacteriana (Ulrich *et al.* 2000).

Estudios de metagenómica de organismos eucarióticos (Bik *et al.*, 2012), indican la presencia de hongos en un período antes y después del derrame petrolero del DH, en las costas de E.U.A. En ese estudio la presencia de hongos era mucho menor antes que después del derrame y, además, se observó un cambio dramático en la estructura de la comunidad fúngica. A pesar de que este estudio se realizó en costas, se detectó la reacción de las comunidades fúngicas ante una alteración en el hábitat.

Al no haber estudios previos sobre la estructura de la comunidad fúngica de hongos en sedimentos marinos de la zona de aguas profundas de la ZEE mexicana del GM, hacer una comparación pre y post-derrame es imposible. Por lo tanto, este estudio provee de una amplia perspectiva sobre la importancia de los hongos y su papel en el tiempo ante la alteración de estos hábitats como consecuencia de disturbios de origen antropogénicos y naturales. En el informe de la campaña XIXIMI 1 se observaron filotipos de *Candida albicans*, *C. dubliniensis* y *Penicillium citrinum*, los cuales como se indicó en dicho informe son capaces de utilizar hidrocarburos como sustrato (Riquelme & Romero-Olivares, 2010).

El análisis de escalamiento multidimensional no-métrico sugiere que la estructura de la comunidad fúngica de las estaciones muestreadas es diferente entre campañas XIXIMI, indicando que estas comunidades están cambiando con el tiempo, posiblemente porque estén desempeñando diferentes actividades en el hábitat en el que se encuentran. Sin embargo, tenemos que tomar en cuenta que las muestras de la campaña XIXIMI 2 estuvieron almacenadas 1 año a -80° C antes de extraer ADN para secuenciar por

pirosecuenciación. De manera que pudiera ser que hubiera degradación de ADN y los cambios observados de la comunidad fúngica no refleje realmente los cambios de la comunidad ocurridos en el medio ambiente.

Las curvas de rarefacción y el índice de Chao 1 calculado para las estaciones de las campañas XIXIMI 2 y 3 indican que a pesar del número de secuencias y OTUs obtenidos, aún se está lejos de alcanzar el número esperado de OTUs, lo que indica que posiblemente no se alcanzó una secuenciación óptima. La metodología de pirosecuenciación permite determinar la cobertura, es decir, el número de lecturas (*reads*) por muestra, por lo que si la cobertura aumenta, podríamos obtener un mayor número de secuencias por muestra en el futuro.

Las estaciones que se repiten en ambas campañas XIXIMI son la E2 y la E19. Tras realizar una comparación de la estación E2 entre campañas XIXIMI, se observó que hubo un aumento de un orden no identificado de la clase *Dothideomycetes*, desde un 1% en la campaña XIXIMI 2 hasta un 16% en la campaña XIXIMI 3, así como una disminución de *Sordariales*, desde un 15% en la campaña XIXIMI 2 hasta casi un 7% en la campaña XIXIMI 3. En el caso de la estación E19, se observaron diferencias más claras entre campañas XIXIMI. En la campaña XIXIMI 2 no hay presencia del orden no identificado de *Dothideomycetes*, así como del orden no identificado de la clase *Eurotiomycetes*, mientras que en la campaña XIXIMI 3 su abundancia es de 8% y 4%, respectivamente. Estas diferencias indican cambios en la composición de la comunidad fúngica, ya que se lograron identificar un mayor número de clases pertenecientes a los filos Ascomycetes y Basidiomycetes, en la campaña XIXIMI 3, que en la 2, así como también incrementos y decrementos de abundancia de las clases que persisten en el tiempo en las campañas XIXIMI (Figura 198 y Figura 199) lo cual podría indicar que puede haber una sucesión de comunidades. Esto además puede ser observado en los índices de diversidad como el de Simpson (Tabla 37), donde se aprecia un incremento de la diversidad en la campaña XIXIMI 3. Cabe mencionar que los puntos muestreados en las campañas XIXIMI 2 y 3, a pesar de ser clasificados como la misma estación, hay pocas probabilidades de que realmente correspondan exactamente al mismo punto de muestreo, lo cual podría explicar las diferencias en la estructura de la comunidad fúngica.

El hábitat de los sedimentos marinos parece poseer una estructura de comunidad fúngica no diversa (siendo comparado con estudios de diversidad en ecosistemas terrestres: Porrás-Alfaro *et al.*, 2011; Roesch *et al.*, 2007), aunque podría ser abundante en especies que cumplen roles específicos en el hábitat.

Se desconoce el papel ecológico que están desarrollando los hongos en los sedimentos marinos. *Candida albicans* ha sido reportada como capaz de utilizar una fuente de hidrocarburos como sustrato (Kaczorek *et al.*, 2008). Otros filotipos identificados en el presente estudio, como *Cryptococcus* sp. y *Malassezia* sp. se han encontrado en sedimentos marinos; la primera como especie dominante (de mayor abundancia que otras), y la segunda como posible patógeno oportunista de mamíferos marinos (Edgcomb *et al.*, 2011).

Hongos que son comúnmente encontrados en ecosistemas terrestres, tales como los órdenes *Eurotiales* y *Saccharomicetales*, pueden adaptarse y ser funcionales en ecosistemas marinos, ya que algunos hongos tienen la capacidad de modificar su membrana y tolerar cambios en el ambiente como por ejemplo la alta presión hidrostática (Raghukumar *et al.*, 2010; Richards *et al.*, 2012).

Conclusión

El uso de pirosecuenciación 454 ha permitido ampliar la información sobre la diversidad y abundancia de hongos en sedimentos marinos del GM. A nivel global, la diferencia observada entre campañas, sugiere cambios de comunidades fúngicas.

Los resultados del presente estudio indican que los sedimentos marinos del GM albergan comunidades fúngicas con una diversidad más amplia de lo que podría esperarse debido a las condiciones, que hasta hace poco, se creían inhóspitas.

Referencias

- Bik, H.M., Halanych, K.M., Sharma, J., Thomas, W.K., 2012. Dramatic shifts in benthic microbial eukaryote communities following the Deepwater Horizon oil spill. *PLoS one* 7, 1-6.
- Buee M, Reich M, Murat C, Morin E, Nilsson RH, Uroz S, Martin F., 2009. 454 Pyrosequencing analyses of forest soils reveal an unexpectedly high fungal diversity. *The New phytologist* 184, 2, 449-456.
- Colwell, R.K., 2013. *Estimates: Statistical Estimation of Species Richness and Shared Species from Samples*.
- Dumbrell A. J., Ashton P. D., Aziz N., Feng G., Nelson M., Dytham C., Fitter A. H., Helgason T., 2011. Distinct seasonal assemblages of arbuscular mycorrhizal fungi revealed by massively parallel pyrosequencing. *The New phytologist* 190, 3, 794-804.
- Edgar, R.C., 2010. Search and clustering orders of magnitude faster than BLAST. *Bioinformatics* 26, 2460-2461.
- Entsminger, G.L., 2012. *ECOSIM: Null Modeling Software for Ecologist*.
- Jumpponen A., Jones K. L., Blair J., 2010. Vertical distribution of fungal communities in tallgrass prairie soil. *Mycologia* 102, 5, 1027-1041.

- Kaczorek, E., Chrzanowski, L., Pijanowska, A., Olszanowski, A., 2008. Yeast and bacteria cell hydrophobicity and hydrocarbon biodegradation in the presence of natural surfactants: rhamnolipides and saponins. *Bioresource technology* 99, 4285-4291.
- Kimes, N.E., Callaghan, A.V., Aktas, D.F., Smith, W.L., Sunner, J., Golding, B., Drozdowska, M., Hazen, T.C., Suflita, J.M., Morris, P.J., 2013. Metagenomic analysis and metabolite profiling of deep-sea sediments from the Gulf of Mexico following the Deepwater Horizon oil spill. *Frontiers in microbiology* 4, 50.
- Lentendu G., Zinger L., Manel S., Coissac E., Choler P., Geremia R. A., Melodelima C., 2011. Assessment of soil fungal diversity in different alpine tundra habitats by means of pyrosequencing. *Fungal diversity* 49, 1, 113-123.
- Lu, Z., Deng, Y., Van Nostrand, J.D., He, Z., Voordeckers, J., Zhou, A., Lee, Y.J., Mason, O.U., Dubinsky, E.A., Chavarria, K.L., Tom, L.M., Fortney, J.L., Lamendella, R., Jansson, J.K., D'Haeseleer, P., Hazen, T.C., Zhou, J., 2012. Microbial gene functions enriched in the Deepwater Horizon deep-sea oil plume. *The ISME journal* 6, 451-460.
- Mancera-Pineda J. E., Gavio B., Lasso-Zapata J., 2013. Principales amenazas a la biodiversidad marina. *Actual Biol*, 35, 99,111-133
- Mendelssohn, I.A., Andersen, G.L., Baltz, D.M., Caffey, R.H., Carman, K.R., Fleeger, J.W., Joye, S.B., Lin, Q., Maltby, E., Overton, E.B., Rozas, L.P., 2012. Oil Impacts on Coastal Wetlands: Implications for the Mississippi River Delta Ecosystem after the Deepwater Horizon Oil Spill. *BioScience* 62, 562-574.
- Oksanen, J., Blanchet, F.J., Kindt, R., Legendre, P., Minchin, P.R., O'Hara, R.B., Simpson, G.L., Solymos, P., Stevens, M.H.H., Wagner, H., 2013. *Vegan: Community Ecology Package*. pp. Ordination methods, diversity analysis and other functions for community and vegetation ecologists.
- Orgiazzi A., Lumini E., Nilsson R. H. , Girlanda M., Vizzini A., Bonfante P., Bianciotto V., 2012. Unravelling soil fungal communities from different Mediterranean land-use backgrounds. *PloS one*, 7, 4.
- Orgiazzi A., Bianciotto V., Bonfante P., Daghino S., Ghignone S., Lazzari A., Lumini E., Mello A., Napoli C., Perotto S., Vizzini A., Bagella S., Murat C., Girlanda M., 2013. 454 Pyrosequencing Analysis of Fungal Assemblages from Geographically Distant, Disparate Soils Reveals Spatial Patterning and a Core Mycobiome. *Diversity* 5, 1, 73-98.

- Porras-Alfaro, A., Herrera, J., Natvig, D.O., Lipinski, K., Sinsabaugh, R.L., 2011. Diversity and distribution of soil fungal communities in a semiarid grassland. *Mycologia* 103, 10-21.
- Raghukumar, C., Damare, S.R., Singh, P., 2010. A review on deep-sea fungi: occurrence, diversity and adaptations. *Bot Mar* 53, 479-492.
- Richards, T.A., Jones, M.D., Leonard, G., Bass, D., 2012. Marine fungi: their ecology and molecular diversity. *Annual review of marine science* 4, 495-522.
- Riquelme M., Romero-Olivares, A. L., 2010 Reporte de la Campaña XIXIMI-1. 6-22 Noviembre 2010; GM, BO/ Justo Sierra
- Roesch, L.F., Fulthorpe, R.R., Riva, A., Casella, G., Hadwin, A.K., Kent, A.D., Daroub, S.H., Camargo, F.A., Farmerie, W.G., Triplett, E.W., 2007. Pyrosequencing enumerates and contrasts soil microbial diversity. *The ISME journal* 1, 283-290.
- Rousk J., Baath E., Brookes P. C., Lauber C. L., Lozupone C., Caporaso J. G., Knight R., Fierer N., 2010. Soil bacterial and fungal communities across a pH gradient in an arable soil. *The ISME journal*, 4, 10,1340-1351.
- Ulrich H., Anthony D. W., Gesa F. M., Gabrielle M. K., Siegfried D., Hans-Jürgen A., Barbara S. 2000 Fungi from marine sponges: diversity, biological activity and secondary metabolites. *Mycological research* 104
- Venables, W.N., Ripley, B., 2002. MASS. pp. Functions and datasets to support Venables and Ripley, 'Modern Applied Statistics with S'.
- White H. K., Hsing P. Y., Cho W., Shank T. M., Cordes E. E., Quattrini A. M., Nelson R. K., Camilli R., Demopoulos A. W., German C. R., Brooks J. M., Roberts H. H., Shedd W., Reddy C. M., Fisher C. R. 2012. Impact of the Deepwater Horizon oil spill on a deep-water coral community in the Gulf of Mexico. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 109, 50, 20303-20308.
- White, J.R., Maddox, C., White, O., Angiuoli, S.V., Fricke, F., 2013. CloVR-ITS: Automated internal transcribed spacer amplicon sequence analysis pipeline for the characterization of fungal microbiota. *Microbiome* 1, 1-11.

BASE DE DATOS DE XIXIMI-3

Responsable: M. en C. Vicente Ferreira

Base de datos: Excel

Los datos entregados por los responsables de cada sección fueron compilados en tablas Excel (MS corp). Cada tabla incluye los metadatos y las variables primarias que se obtuvieron para cada estación y cada profundidad y representa un registro completo de variables que permite la comparación rápida entre ellas. Las variables están documentados con las características de unidades y niveles de calidad que corresponden (ver Parámetros de Calidad, abajo).

Metadatos

Son las variables comunes para cada estación y reflejan la identidad no repetitiva de la medición. Son considerados metadatos el nombre de estación, la posición geográfica (longitud este y latitud norte en formato de grados y fracción de grado), la fecha y hora del muestreo (en formato yyyy.mm.dd Thh.mm) y la profundidad del fondo en metros.

Variables primarias

Son las variables obtenidas instrumentalmente de forma básica para cada estación. Proviene esencialmente de los sensores del CTD, que generan series de datos que tienen una alta frecuencia de medición tanto en el tiempo como en profundidad. Las variables medidas con estos sensores son: temperatura, salinidad (a partir de la conductividad), oxígeno disuelto y fluorescencia.

Para obtener un valor puntual correspondiente a la profundidad de muestreo con la roseta, los valores de estas variables fueron leídos de las series a las profundidades correspondientes a los disparos de las botellas Niskin y GoFlo..

Para la profundidad indicada como 0 m, se incluyen los valores de temperatura y salinidad del termosalinómetro del barco. Este instrumento colecta agua por debajo de la línea de flotación, así que la determinación es solo indicativa de los valores en superficie.

VARIABLES DETERMINADAS POR SECCIÓN

Los valores de cada una de las variables son exactamente los mismos que entregaron los investigadores responsables. En algunos casos, cuando hubo iteración entre tablas, corresponden al último valor aceptado. Cuando no se colectó una muestra o cuando esta no se analizó, se presenta como una celda vacía. Los valores reportados como 0, indican que sí hubo muestra y si se analizó, teniendo ese valor como resultado. Todos los casos reportados de la dupla estación-profundidad de cualquier tabla cumplen con las condiciones anteriores.

El archivo de Excel contiene secciones que corresponden a diferentes juegos de datos (Tabla 39). Los datos primarios tienen exactamente los mismos valores en cada sección.

Tabla 39. Nombres de los archivos que conforman la base de datos correspondiente al crucero oceanográfico XIXIMI-3.

NOMBRE DEL ARCHIVO	CONTENIDO	INVESTIGADOR RESPONSABLE
COLUMNA DE AGUA		
XIXIMI-3-HIDROGRAFÍA	TEMPERATURA, SALINIDAD OXÍGENO, FLUORESCENCIA	Dr. Julio Sheibaum
XIXIMI-3-CID-AT	CARBÓN INORGÁNICO DISUELTO (CID); ALCALINIDAD TOTAL	Dr. Martín Hernández- Ayón
XIXIMI-3-ISÓTOPOS-CID	ISÓTOPOS ESTABLES (¹³ C) EN CARBÓN INORGÁNICO DISUELTO	Dr. Juan Carlos Herguera
XIXIMI-3-ISÓTOPOS-MOP	ISÓTOPOS ESTABLES (¹⁵ N Y ¹³ C) EN MATERIA ORGÁNICA PARTICULADA	Dr. Juan Carlos Herguera
XIXIMI-3-ISÓTOPOS- ZOOPLANCTON	ISÓTOPOS ESTABLES (¹⁵ N Y ¹³ C) EN <i>Copepoda</i> y <i>Euphausida</i>	Dra. Sharon Herzka
XIXIMI-3-NUTRIENTES-COD	NITRATO, NITRITO, FOSFATO, SILICATO Y CARBÓN ORGÁNICO DISUELTO	Dr. Victor Camacho
XIXIMI-3-METALES-TRAZA- AGUA	Ni, Cu, Co, V EN COLUMNA DE AGUA	Dra. Lucila Lares
BIOVARIABLES		
XIXIMI-3-FITOPLANCTON	FITOPLANCTON EN COLUMNA DE AGUA	Dr. Rubén Lara
XIXIMI-3-PIGMENTOS	VARIABILIDAD BIO-ÓPTICA DEL FITOPLANCTON	Dr. Eduardo Millán
XIXIMI-3-ZOOPLANCTON	ZOOPLANCTON	Dr. Jaime Farber
XIXIMI-3-BACTERIAS	BACTERIAS EN COLUMNA DE AGUA	Dr. Alexei Licea

Tabla 39, continuación.

SEDIMENTO		
XIXIMI-3-HONGOS	HONGOS EN SEDIMENTOS	Dra. Merixtell Riquelme
XIXIMI-3-ISÓTOPOS- SEDIMENTO	ISÓTOPOS ESTABLES (C Y N) EN SEDIMENTO; CALCITA, TERRÍGENOS, AGUA	Dr. Juan Carlos Herguera
XIXIMI-3-MACROFAUNA	MACROFAUNA EN SEDIMENTOS (MAYOR 0.5 mm)	Dra. Victoria Díaz
XIXIMI-3-MEIOFAUNA	MEIOFAUNA EN SEDIMENTOS (MENOR 0.5 mm)	Dr. Axayácatl Rocha
XIXIMI-3-METALES-TRAZA- SEDIMENTO	Mn, Fe, Cu, Ni,Cd, Co, Pb EN SEDIMENTO	Dr. Miguel Ángel Huerta
CONCENTRADOS XIXIMI-3		
XIXIMI-3-CONCENTRADO-AGUA	HIDROGRAFÍA, CID, AT, pH, NUTRIENTES, FITOPLANCTON	Varios
XIXIMI-3-CONCENTRADO- SEDIMENTO	COMPOSICIÓN, ISÓTOPOS, MEIOFAUNA, MACROFAUNA, HONGOS	Varios

Base de datos: Ocean Data View (ODV)

En cada carpeta de la base de datos correspondiente a las secciones de este reporte, está incluido el archivo ODV y su base asociada, que incluye los valores reportados así como las metavARIABLES generales del crucero y las variables físicas asociadas.

EL software utilizado fue Ocean Data View (ODV) que de manera libre se entrega a los solicitantes para su uso en investigación y enseñanza por el Alfred Wegener Institut (AWI). Ocean Data View (ODV) <http://odv.awi.de>. La versión utilizada es la 4.5.1. OceanDataView (ODV). ODV permite el acceso, análisis activo y visualización de datos en forma de perfil o de serie temporal o espacial.

Basada en la estructura de almacenamiento del programa ODV, se diseñó el formato de la base de datos. Esta estructura permite agrupar los resultados de los diferentes parámetros y determinaciones resultantes del proyecto tanto en Excel como ODV. El utilizar ODV plataforma permite el almacenamiento organizado de los datos y la

obtención rápida de figuras de distribuciones de parámetro vs. parámetro, de secciones verticales de valores de los parámetros y de la generación de iso-superficies de una manera bastante accesible. También permite la subselección de datos selectos. Muchas de las figuras que se presentan en este informe se generaron en ODV.

El formato general de la base es NetCDF, en la cual la estructura básica esta dividida en dimensiones, variables y atributos. La unidad fundamental es la estación.

Las colecciones de datos y los archivos parciales de las bases son independientes de la plataforma computacional y pueden ser utilizados en todos los sistemas (Windows, Mac OSX, Linux y UNIX) sin modificación.

La estructura interna de la base permite el almacenamiento de grandes conjuntos de datos de numerosas estaciones de una manera comprimida y accesible. Eso permite tener un ilimitado numero de variables, tipos de datos específicos y parámetros de calidad determinados por el usuario tanto para los datos como para los metadatos.

La estructura de los metadatos incluidos en la base de datos diseñada está basada en los Estándares Internacionales ISO 19115:2003 recomendados para colecciones de datos en forma discreta o de serie, y consiste en bases de datos de orden geográfico que incluyen características de las propiedades tanto de los valores como de la posición.

Los vocabularios utilizados (nombres de variables) siguen lo propuesto por Marine Data Interoperability: Vocabularies References. Lo mismo se aplica a las unidades de cada variable (<http://marinemetadata.org/>). Esto se puede ajustar en la organización final de la base de datos global; sin embargo se requiere que desde el inicio se especifiquen correctamente las unidades y los parámetros.

Parámetros de calidad

Asociado a cada medición, se agregó un valor de calidad (QF) asignado de acuerdo a la siguiente clasificación propuesta, donde los posibles valores son 0, 1, 4, y 8, representando:

0 = buena calidad

1= calidad desconocida

4= calidad cuestionable (posiblemente corregible)

8= mala calidad

Los parámetros de calidad fueron designados por los investigadores responsables de cada juego de datos.

Referencias

Marine Data Interoperability: Vocabularies References. <http://marinemetadata.org/>

Schlitzer R, Ocean Data View, 2011 <http://odv.awi.de>

CONCLUSIONES

Los resultados de este informe complementan la información generada en los proyectos anteriores, en los cuales se reportaron los resultados de los cruceros oceanográficos XIXIMI-1 y XIXIMI-2. Este informe complementa la línea de base de las condiciones oceanográficas, biogeoquímicas y ecológicas del GM considerando el aún escaso conocimiento que existe sobre esta extensa y estratégica región de las aguas patrimoniales de México. Los resultados de algunos de las variables que se midieron representan información completamente nueva.

En los análisis realizados hasta la fecha en la región de aguas profundas de la ZEE mexicana del GM no se aprecian indicios claros o unívocos del derrame de gran escala de hidrocarburos y gases asociados provenientes del pozo Macondo. Sin embargo, sí se presentan anomalías en algunos de los análisis que se han generado a lo largo de este proyecto que aún requieren de explicación. Estos resultados resaltan la necesidad primordial de continuar con el establecimiento de la línea de base de las condiciones físicas, biogeoquímicas y ecológicas de una zona relativamente poco conocida en la ZEE de México.

La evaluación integral de los impactos del derrame debe de considerar las características del plan de muestreo que se implementó con la finalidad de establecer la línea de base en una red de estaciones puntuales que abarcan una extensa región. El diseño y ejecución de la red de observaciones y la recolecta de muestras estuvo fundamentalmente enfocada a establecer una línea base de parámetros físicos, biogeoquímicos y ecológicos selectos de la zona de aguas profundas. No se pretendía localizar ni cartografiar la extensión espacial de filamentos de hidrocarburos originarios del derrame del pozo Macondo, ya que se consideró que no se contaba con el conocimiento suficiente para predecir el desplazamiento del petróleo ni en aguas mexicanas ni en aguas americanas. Tampoco se evaluaron los posibles efectos del derrame sobre niveles tróficos superiores.

Los datos que representan la línea de base abarcan solo un corto intervalo de tiempo y condiciones discretas de otoño (2010), verano (2011) e invierno (2013). Es urgente y perentorio continuar con el esfuerzo de establecimiento de la línea de base de condiciones físicas, geoquímicas y ecológicas de esta región relativamente desconocida de las aguas patrimoniales mexicanas. Por último, Este proyecto se ha llevado a cabo con el compromiso de que los datos serán entregados al INECC-SEMARNAT para la consulta futura de diversas instancias del gobierno que provea de la información relevante y necesaria dentro de los contextos que se consideren convenientes.

REFERENCIAS

Herguera JC, Herzka S, Ferreira V, Flores C, Siqueiros A, Pedraza A (2012) Reporte de la campaña XIXIMI-2 2 al 16 julio 2011, Golfo de México, *Buque Oceanográfico Justo Sierra*

Herzka S, Herguera JC, Licea A, Sheinbaum J y Ferreira V et al. (2012) Fase II para el establecimiento de la línea base en aguas profundas del Golfo de México en respuesta al derrame petrolero asociado a la plataforma Deepwater Horizon. Informe final 294 pp.

Herzka S, Herguera JC, Ferreira V, Siqueiros A, Barradas, MR, González R, Cabrales G, Flores C, García, J (2013) Reporte de la Campaña XIXIMI-3, 19 de Febrero al 10 de Marzo del 2013, Golfo de México, *Buque Oceanográfico Justo Sierra*.

RECOMENDACIONES

Consideramos de suma importancia continuar con este esfuerzo para el establecimiento de línea de base en el GM. Considerando la variabilidad física, bioquímica y ecológica del gran sistema del GM, la tarea de hacer una caracterización integral adecuada solo se puede alcanzar realísticamente si se mantiene un programa de evaluación y monitoreo de esta área tan extensa y desconocida como es la región de aguas profundas del GM. Esta tarea es imprescindible para poder distinguir entre los efectos de la variabilidad natural y los disturbios antropogénicos de gran escala, como fue el derrame petrolero del pozo Macondo.

GLOSARIO DE TÉRMINOS

AATC: Agua del Atlántico Tropical Central

AIW: Antarctic Intermediate Water

CCAR: Colorado Center for Aerodynamics Research, Universidad de Colorado

CID: Carbono inorgánico disuelto

COD: Carbono orgánico disuelto

GM: Golfo de México

OD: Oxígeno disuelto

ODV: Ocean Data View, programa de exploración y visualización de datos oceanográficos (<http://odv.awi.de/>).

SUW: Subtropical Under-Water

TACW: Tropical Atlantic Central Water

WOCE: World Ocean Circulation Experiment

CRÉDITOS

Este proyecto no se hubiese realizado sin el esfuerzo comprometido del Dr. Eduardo Peters, Coordinador del Proyecto Línea Base y Monitoreo del Golfo de México por parte de CONABIO-INECC, y la Dra. Margarita Caso Chávez, Directora de Conservación de los Ecosistemas del INECC-SEMARNAT y de su grupo de trabajo. De manera oportuna, reconocieron la importancia de establecer una línea de base de las condiciones oceanográficas del GM para contribuir al entendimiento de una de las zonas menos conocidas del país, evaluar los posibles impactos del derrame petrolero, y sentar las bases para tener la capacidad de evaluar otros impactos en el futuro. Les agradecemos sinceramente su confianza y apoyo a lo largo de casi cuatro años.

Desde un inicio, el apoyo decidido y visionario del Dr. Federico Graef Ziehl, Director General del CICESE, fue fundamental. Respaldó un proyecto ambicioso que surgió de un momento a otro, que integraba el esfuerzo de varias instituciones, y cuyos resultados serán útiles para el país a largo plazo. Un equipo enorme de personas apoyaron en diversos aspectos administrativos de este proyecto. Agradecemos a la Maestra Leonor Falcón, Directora Administrativa del CICESE, y su equipo de trabajo por sus gestiones y apoyo. Ruby Granados fue de gran apoyo en la elaboración y firma de los convenios. Julieta Castro, Delegada Administrativa de la División de Oceanología, y nuestra secretaria, Karen Sandoval Leira, llevaron a cabo y le dieron seguimiento a cientos de solicitudes y en la elaboración de numerosos contratos. En particular, Julieta Castro supo orientarnos y ayudarnos incansablemente a lo largo de este proyecto. El personal del Departamento de Compras nos brindaron su cooperación y apoyo para conseguir e importar el material de trabajo.

La tripulación del *BO Justo Sierra* cooperaron incansable y cordialmente para conseguir los objetivos propuestos para la campaña. Nuestro trabajo a bordo del *BO Justo Sierra* sería imposible sin el apoyo y conocimiento de su capitán Capitán Leobardo Ríos, sus oficiales, y el resto de la tripulación. Agradecemos sinceramente su disposición para compartir su conocimiento y experiencia con el fin de ayudarnos a cumplir con nuestros objetivos.

Agradecemos también a los técnicos electrónicos del CICESE, Ricardo Solís, Carlos Flores y Miguel Ojeda, sin cuyo trabajo, ayuda, tesón y motivación no habría sido posible la recolecta de datos y muestras sin interrupciones de sol a sol a lo largo de toda la campaña. Así mismo, el Ocean. Arturo Siqueiros del IIO-UABC aportó su experiencia práctica y organizativa a los preparativos para el crucero y al crucero en sí, y trabajando infatigablemente para asegurarse que el trabajo de todos saliese adelante. Le agradecemos a todos los participantes de la campaña XIXIMI-3 por su gran esfuerzo, que contribuyó mucho a que podamos cumplir con nuestros objetivos. El M en C Joaquín García nos ayudó con los preparativos del equipo electrónico antes de zarpar y estuvo pendiente de nuestras actividades durante el crucero. Reconocemos su esfuerzo para lograr que los datos hidrográficos que se incluyen en este informe sean de la calidad adecuada.

La M. En C. Reyna Barradas apoyó durante el desarrollo de la organización del crucero, la revisión de documentos, el seguimiento de compras, la preparación de muestras para diversos tipos de análisis, captura de datos, y la coordinación de reuniones de trabajo. También trabajó en la compilación minuciosa de este informe. Siempre ha mantenido una actitud positiva y le estamos muy agradecidos.

La extensa experiencia en cruceros oceanográficos del M. en C. Vicente Ferreira, particularmente en la toma de muestras de sedimentos, aportó sustancialmente al éxito de la campaña. También puso a nuestra disposición sus talentos computacionales. Integró y manejó la base de datos, exigiéndonos a todos cumplir con el esquema de organización y estándares de calidad que esto implica. Asistió en la generación de un número incontable de gráficas que los investigadores solicitaron para entender y presentar sus datos, y brindó comentarios constructivos y bien fundamentados en su conocimiento de la oceanografía en general.

Por último, los coordinadores de este proyecto, Sharon Herzka, Juan Carlos Herguera, Alexei Licea y Julio Sheinbaum, agradecemos a cada uno de los investigadores del CICESE y del IIO-UABC que participaron en este proyecto. Reconocemos su voluntad y disposición de abrir las puertas de sus laboratorios para cumplir con las metas comunes de un proyecto sumamente ambicioso que surgió de un momento a otro. Somos conscientes del compromiso y dedicación que este proyecto a implicado. Ha sido y sigue siendo un enorme reto para todos.

Tripulación científica del crucero XIXIMI-3.



ANEXOS

Los anexos se presentan en formato digital en cd adjunto.